UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS E INFORMÁTICA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

TESIS:
"Telemática Aplicada al Transporte Urbano. Caso. Sistema de Gestión Automatizado de la Red Semafórica de la Ciudad de Lima"

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

AUTOR:
Bach.: Tarquino Torres, Fernando Mauricio

ASESOR:
Mg. Hidalgo Palomino, Fernando Guillermo
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9155-445X
DNI 06844769

LIMA- PERÚ
2021

DEDICATORIA

A Flavia y Mauricio

AGRADECIMIENTO

Al Universo por ayudarme a soportar las cargas de predicar en este desierto.

A Ingeniero Miguel Ángel Martínez Villarruel por la integración del Modelo de Simulación en Aimsun Next20 y su gran amistad a toda prueba.

A mi Asesor de Tesis por las facilidades y deferencia para el desarrollo y la culminación de la presente investigación.

A mis Padres Fernando y Dora Cristina por el apoyo incondicional en mi crecimiento profesional, aún en las circunstancias más difíciles y sus casi 90 años de vida.

PRESENTACIÓN

Hoy en día, las formas de pensar las ciudades son diferentes. La calidad de vida en las ciudades es ahora el principal objetivo de la planificación estratégica de las ciudades. Se han desarrollado nuevos sistemas de tráfico para dar respuesta a estas estrategias. Las nuevas áreas del sistema de tráfico, a saber, el Sistema de Transporte Inteligente (ITS), combinan la tecnología existente con la inteligencia artificial y las tecnologías de comunicación inalámbrica (WCT en sus siglas en inglés) que, en el límite de sus capacidades, algún día pensarán por sí mismas. Los investigadores del Massachusetts Institute of Technology – MIT, Senseable City Lab han lanzado el proyecto DriveWAVE, un sistema que además de descongestionar las calles y reducir los tiempos de desplazamiento, también reduzca en consecuencia las emisiones y por tanto el impacto medioambiental. La solución se centra en la eliminación de los semáforos, y cuenta con la conducción autónoma de los vehículos. DriveWAVE explora las formas en que este "controlador digital del tráfico" puede llegar a ser una realidad en las ciudades. Una interfaz de usuario especialmente diseñada permite a los visitantes de la instalación tomar el control de la intersección y da a cada persona la oportunidad de interactuar a través de su proyección dinámica, ajustando el flujo de automóviles y presionando un botón “de peatones” para probar cómo responde el sistema. Un modelo físico iluminado de la intersección y la comparación en tiempo real con un semáforo tradicional muestran un cambio muy significativo en el juego de la movilidad urbana – “la llegada del vehículo autónomo”. Esto constituye, la mejor expresión práctica de la aplicación de la telemática, como el conjunto de la Ingeniería de las Telecomunicaciones y la Informática en el transporte urbano.

Evidentemente, para nuestras ciudades peruanas, esta percepción tecnológica es una utopía, que tardará varias décadas en llegar, por la falta de preparación de Profesionales altamente especializados, que puedan ser y/o ayudar a los tomadores de decisiones políticas, a cambiar disruptivamente las ciudades, en estricto: “hacerlas de nuevo”; y que sean capaces de recibir adecuadamente el mañana. En este contexto, presentamos esta investigación como un aporte a acercarnos a esa realidad, en el largo camino del progreso tecnológico para desarrollar ciudades inteligentes, sostenibles, amigables, amables; usen el término que mejor les agrade para el beneficio de sus ciudadanos.

ÍNDICE

DEDICATORIA **II**

AGRADECIMIENTO **III**

PRESENTACIÓN **IV**

RESUMEN **XII**

ABSTRACT **XIII**

I. INTRODUCCIÓN **1**

1.1. Realidad problemática **2**

1.2. Planteamiento del problema **5**

1.3. Hipótesis de la investigación **6**

1.4. Objetivos de la investigación **7**

1.5. Variables, dimensiones e indicadores **7**

1.6. Justificación del estudio **8**

1.7. Trabajos previos **13**

1.8. Marco Teórico **16**

1.9. Definición de términos básicos **94**

II. MÉTODO **98**

2.1. Tipo y diseño de la investigación **98**

2.2. Población y muestra **98**

2.3. Técnicas para la recolección de datos **101**

2.4. Validez y confiabilidad de instrumentos **101**

2.5. Procesamiento y análisis de datos **101**

2.5.1. Metodología **102**

2.5.2. Modelado de simulación **105**

2.5.3. Elección del área de estudio **126**

2.6. Aspectos éticos **154**

III. RESULTADOS **155**

3.1. Resultados descriptivos **155**

3.2. Prueba de normalidad **157**

3.3. Contrastación de las hipótesis **159**

IV. DISCUSION **161**

V. CONCLUSIONES **164**

VI. RECOMENDACIONES **165**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **166**

ANEXOS **170**

Anexo 1: Matriz de Consistencia **170**

Anexo 2: Instrumento de recolección de datos **171**

Anexo 3: Base de datos **174**

Anexo 4: Evidencia de similitud digital **181**

Anexo 5: Autorización de publicación en repositorio **188**

Anexo 6: Vistas en 3D de los escenarios modelados **189**

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales componentes metodológicos para la predicción a corto plazo del estado del tráfico 27
Figura 2 esquema computacional del método de estimación de matrices OD de dos niveles 33
Figura 3. La red de vitoria, país vasco, españa: disposición de los sensores del detector de bucle (izquierda) y disposición de los detectores AVI bluetooth (derecha) 36
Figura 4. Valores filtrados a lo largo de 1 h para el escenario anterior D9 para el enfoque de filtrado de kalman modificado 38
Figura 5. Cronología de los sistemas de control del tráfico interconectados 49
Figura 6. Arquitectura típica para un sistema de cómputo distribuido de tres niveles (circuito cerrado) 55
Figura 7. Disposición típica para la arquitectura de control central 57
Figura 8. Representación del ciclo de vida de la ingeniería de sistemas 60
Figura 9. Relación de las prácticas de ingeniería de sistemas identificadas en la parte de evaluación del ciclo de vida 61
Figura 10. Sistemas básicos de comunicaciones 64
Figura 11. Plan de comunicación para el sistema de control de tráfico de boston 67
Figura 12. Uso de bit de desbordamiento para reducir los requisitos de comunicación 71
Figura 13. Secuencia directa versus salto de frecuencia 76
Figura 14. Sistema de radio mas de amplio espectro SS 78
Figura 15. Sistema de redes peer-to-peer (P2P) de amplio espectro SS 78
Figura 16. Clasificación de arquitecturas de comunicación 81
Figura 17. NTCIP facilita la interoperabilidad e intercambiabilidad de los equipos de campo 86
Figura 18. Estructura NTCIP 90
Figura 19. Asignación de capa OSI a nivel NTCIP 91
Figura 20. Medición de los beneficios del control semafórico adaptativo 104
Figura 21. Emulación de control adaptativo en AIMSUN next 107
Figura 22. Serie de tiempo que valida el conjunto datos reales versus la salida del experimento con el detector de tráfico 111

Figura 23. Serie de tiempo que valida el conjunto datos reales versus la salida del modelo 111
Figura 24. Comparación de resultados estadísticos de simulación versus datos reales, con fines de calibración del modelo 112
Figura 25. Vista del resultado de calibración del modelo con el estadístico U de theil 114
Figura 26. Vista del resultado de calibración del modelo con el estadístico GEH 115
Figura 27. Configuración típica de geometría y detectores asignados a una intersección semaforizada 116
Figura 28. Patrones de detección en aimsun next 20 117
Figura 29. Comunicación de datos del detector con el controlador del semáforo 120
Figura 30. Controlador adaptativo SCATS 120
Figura 31. Grupo de señales semafóricas AIMSUN con SCATS 122
Figura 32. Detección de peatones en AIMSUN con SCATS 123
Figura 33a. Comparación de perfiles de detección de tráfico meso y microsimulados 124
Figura 34. Área de estudio 126
Figura 35. Ejemplo de ubicación de detectores en todos los accesos 128
Figura 36. Ejemplo de ubicación de detectores en las calles secundarias 129
Figura 37. Parámetros de modelación utilizados – situación actual 131
Figura 38. Parámetros de modelación utilizados – situación propuesta 133
Figura 39. Flujos vehiculares – situación actual y propuesta 135
Figura 40. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección: Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio 137
Figura 41. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho 137
Figura 42. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros 138
Figura 43. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández 138
Figura 44. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección: Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado 139
Figura 45. Diseño de red modelada, Av. Petit Thouars tramo Av. 28 de Julio – Jr. Madre de Dios 140
Figura 46. Diseño de red modelada, Av. Petit Thouars tramo Jr. Madre de Dios – Av. Alejandro Tirado 141

Figura 47. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS: Intersección: Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio 142
Figura 48. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS: Intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho 142
Figura 49. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS: Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros 143
Figura 50. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS: Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández 143
Figura 51. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS: Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado 144
Figura 52 comparación de escenarios vista 2D, intersección: Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio 147
Figura 53. Comparación de escenarios vista 2D, intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho 148
Figura 54. Comparación de escenarios vista 2D, intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros 148
Figura 55. Comparación de escenarios vista 2D, intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández 149
Figura 56. Comparación de escenarios vista 2D, intersección: Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado 149
Figura 57. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouars con Av. 28 de Julio 150
Figura 58. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouars con Jr. Manuel Corpancho 151
Figura 59. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouars con Jr. Saco Oliveros 151
Figura 60. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouars con Jr. Emilio Fernández 152
Figura 61. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouars con Av. Alejandro Tirado 152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Conjunto de Aplicaciones de ITS 4
Tabla 2. Aplicaciones de Sistemas Inteligentes De Transporte – ITS Por Categorías y Específicas al Transporte Urbano 39
Tabla 3. Funciones Típicas del Sistema de Control de Tráfico 40
Tabla 4. Opciones de Sistemas de Control Semafórico 45
Tabla 5. Opciones de Sistemas de Semáforos 51
Tabla 6. Niveles de Rendimiento de los Sistemas de Control Semafórico del Tráfico 53
Tabla 7. Resultados Representativos de las Pruebas de Desempeño 59
Tabla 8. Ventajas y Desventajas de los Sistemas de Control Sensible al Tráfico y Adaptable al Tráfico 59
Tabla 9. Estructuras de Formato de Datos, Reloj de Comentarios CCU a RCU, del Sistema de Control de Tráfico de Boston 68
Tabla 10. Estructura del Formato de Datos, Bloque de Respuesta de RDU a CCU, del Sistema de Control de Tráfico de Boston 68
Tabla 11. Comandos del Centro de Operaciones de Tráfico para la Intersección 69
Tabla 12. Transferencia de Datos de Campo al Centro de Operaciones de Tráfico 69
Tabla 13. Ventajas y Desventajas de Períodos de Sondeo Más Largos 72
Tabla 14. Funciones de Procesamiento de Control de Tráfico 83
Tabla 15. Aplicación Común de la Arquitectura de Comunicaciones 84
Tabla 16. Intersecciones Evaluadas 127
Tabla 17. Tipología de Arco y Entorno de Capacidades 129
Tabla 18. Descripción del indicador estadístico GEH 145
Tabla 19. GEH del Escenario Actual 145
Tabla 20. GEH del Escenario Propuesto 1 146
Tabla 21. GEH del Escenario Propuesto 2 146
Tabla 22. Resultados de las Medidas de Efectividad Según Escenario Modelado 153
Tabla 23. Diferencia Entre Escenarios Modelados 154
Tabla 24. Demoras (Seg) Según Número de Corrida y Escenario Modelado 157
Tabla 25. Parámetros Utilizados, y Valores Obtenidos de la Muestra de Demoras (Seg) del Escenario Actual 158
Tabla 26. Parámetros Utilizados, y Valores Obtenidos de la Muestra de Demoras (Seg) del Escenario Propuesto 1 158

Tabla 27. Parámetros Utilizados, y Valores Obtenidos de la Muestra de Demoras (Seg) del Escenario Propuesto 2 158

RESUMEN

Los elevados flujos de vehículos urbanos que están en constante expansión y los bloqueos del tráfico que generan congestión, son una consecuencia no deseada. Como los sistemas de semáforos convencionales no se han mantenido al día con las mejoras en la calidad de vida en los grandes centros urbanos, estos elevados niveles de congestión, ha motivado la necesidad de estudiar otras soluciones para mejorar estos sistemas. Los sistemas de semáforos avanzados incorporan en la actualidad, dispositivos de recepción de señales (sensores) con algoritmos de control y métodos de telecomunicación, con altos estándares de desarrollos tecnológicos registrados en la última década. Asimismo, estos sistemas de semáforos que siempre han dependido de complejas redes de cableado y servidores; hoy, se muestran fuertemente soportados por sistemas de comunicación inalámbrica que permite mejorar las capacidades de control y minimizar los costos que actualmente tienen los sistemas de control de tráfico de circuito cerrado. Esta investigación permitirá medir los beneficios de la implementación de controladores semafóricos con sistema de detección SCATS en un eje altamente congestionado de la ciudad de Lima.

Palabras clave: sistemas avanzados de semáforos, redes de sensores inalámbricos, sistemas SCATS.

ABSTRACT

The high flows of urban vehicles that are constantly expanding and the traffic bottleneck that generate congestion, are an unintended consequence. As conventional signalized traffic systems have not kept up with improvements in quality of life in large urban centers, these high levels of congestion have led to the need to study other solutions to improve these systems. Advanced signalized intersections systems currently incorporate signal reception devices (sensors) with control algorithms and telecommunication methods, with high standards of technological developments registered in the last decade. Also, these traffic light systems that have always depended on complex cabling and server networks; Today, they are strongly supported by wireless communication systems that allow to improve the control capabilities and minimize the costs that currently have closed-circuit traffic control systems. This research will make it possible to measure the benefits of the implementation of traffic light controllers with a SCATS detection system in a highly congested road of the city of Lima.

Keywords: advanced signalized intersections systems, wireless sensor networks, SCATS systems.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de investigación desarrolla la realidad problemática de muy grave gestión del tráfico en la ciudad de Lima; la misma que, según reportes de Naciones Unidas y prestigiadas organizaciones internacionales, la han convertido en la 3ra ciudad más congestionada del planeta. En ese sentido, presentamos un resumen y establecemos criterios específicos de aplicación de los Sistemas Inteligentes de Transporte a la implementación de Centros de Control del Tráfico, acondicionados directamente para el manejo a distancia de la red semafórica de la ciudad, mediante telecomunicación inalámbrica. Asimismo, estas instituciones forman parte de un conjunto más amplio de Centros de Gestión Avanzada del Tráfico, que no solamente se encargan de la optimización del desempeño de la red semafórica, sino que implementan e integran la gestión de Centros de Emergencias, Sistemas de Seguridad Vial, Sistemas de Información al Usuario, Sistemas de Prioridad al Transporte Público, Sistemas de Soporte a Personas con Movilidad Reducida, y futuros Sistemas de Integración vehículo a infraestructura (VII) e Integración vehículo – vehículo (V2V) como los principales.

El marco teórico involucra la revisión de la literatura especializada más actualizada, en el estado del arte y de la práctica en la implementación de diferentes Arquitecturas del Centro de Control del Tráfico, desde sus inicios en la década de los 50´s hasta nuestros días; detallando las especificidades de los sensores para el control semafórico, la predicción del comportamiento del tráfico a partir de la implementación correcta de dichos sensores en los accesos a las intersecciones del área de estudio y la aplicación de algoritmos matemáticos que permiten adaptarse a futuras condiciones y responder en tiempo “casi real”, a las necesidades de gestión de la demanda en la red semafórica mediante el sistema SCATS. El estudio establece los fundamentos para comunicaciones del Centro de Control de tráfico efectivo de datos; el mismo que se requiere la coordinación de elementos del sistema que se encuentran ampliamente dispersos en una ciudad de gran tamaño como Lima. Para proporcionar una coordinación efectiva, un sistema de comunicaciones debe transferir información de los componentes del campo al centro de operaciones de tráfico, y transmitir respuestas y comandos a varios componentes de campo.

Finalmente, se ofrece el desarrollo del modelado de simulación avanzada del tráfico, de una pequeña red vial de área central de la ciudad de Lima, la Avenida Petit Thouars

entre las Avenidas 28 de Julio y Alejandro Tirado, mediante la utilización del software AIMSUN Next20, que es la última actualización de esta formidable herramienta de Ingeniería de Tránsito y Transporte Urbano. El área de estudio elegida, es un eje de flujo mixto de alta carga vehicular durante todos los días de la semana (transporte público en buses, automóviles privados, transporte de carga y peatones), que fue sometida a la implementación de un proceso de coordinación de semáforos de tiempo fijo, hace más de 15 años y que se encuentra totalmente desfasado en la progresión de banda verde para la optimización del sistema, por la elevada tasa de motorización que ha sufrido la ciudad en adquisición de vehículos privados (del orden del 4% anual durante los últimos 15 años); y porque no utiliza sistemas de control adaptativo SCATS, que hubiera permitido mitigar este efecto de incremento en la motorización. Demostramos que, con la implementación de este sistema, y comparándolos con la situación actual en dos escenarios: el primero colocando los detectores en todos los accesos de las intersecciones y el segundo, colocándolos solo en las calles secundarias, obtenemos, reducción de longitudes de cola importantes (de 70 veh en situación actual a 43 veh y 51 veh en los escenarios 1 y 2 respectivamente), esto supera el 40 por ciento de reducción de esa medida de congestión. Este es un resultado concluyente de efectividad del sistema y demuestra positivamente la hipótesis general de la investigación. Las Tablas 22 y 23 muestran mayores resultados matemáticos expresados en medidas de efectividad adicionales como tiempo de viaje, demoras y velocidad de circulación por el sistema. En todas ellas obtenemos beneficios significativos ***por cada vehículo por segundo***; que, si lo llevamos a evaluaciones económicas de rendimientos de inversión anualizados en infraestructura de transporte urbano, cualquier medida de desempeño económico como: beneficio/costo, valor actual neto económico – VANE, tasa interna de retorno económica – TIRE o períodos de retornos de inversión, entregarían rentabilidades sin precedentes en este país, que ningún proyecto de infraestructura mayor otorga, por sus muy altos costos de inversión, operación y mantenimiento anual.

1.1. Realidad problemática

Las condiciones de deterioro del transporte asociadas al crecimiento urbano desordenado y a la creciente motorización están dañando la economía de las grandes ciudades. Políticas estructurales como una buena planificación de la expansión de la infraestructura del transporte, una desconcentración planificada, una gestión integral de

la estructura de uso del suelo, o la liberalización de los mercados de tierras pueden ayudar, pero requieren de una cuidadosa coordinación de las políticas en el sector transporte dentro de una estrategia más amplia de desarrollo de la ciudad.

Asimismo, desde hace más de 15 años, la CEPAL viene advirtiendo sobre el cambio de implementación de políticas organizacionales, donde los actores económicos están cada vez más conectados e interconectados (CEPAL, GTZ. Julio 2003). El auge de internet y de las telecomunicaciones están provocando un profundo cambio en la forma en cómo se estructuran y comercian las empresas. El transporte no solamente no está ajeno a esta influencia, sino que puede ser uno de los sectores donde se podrá sentir más fuerte el nuevo paradigma económico y organizacional de las empresas (CEPAL, 2001).

En ese sentido, una de las principales estrategias para el control ordenado de la movilidad urbana, es la implementación de Sistemas Inteligentes de Transporte – ITS (siglas en inglés); los cuales, son sistemas de transporte que aplican tecnología de información y control para apoyar sus operaciones. De este modo, una definición más comúnmente aceptada de ITS es *"la aplicación de tecnologías computacionales, de control y de comunicaciones para ayudar a los conductores y operadores a tomar decisiones inteligentes mientras conducen vehículos inteligentes o controlan el tránsito en caminos o vías férreas inteligentes"* (UPM, 2003). Aunque no es muy rigurosa, esta definición deja en claro la noción de que ITS mantiene al operador y conductor humano al centro. Por lo tanto, ITS no es de ningún modo sinónimo de automatización, aun cuando la conducción automática es una opción para el futuro bajo el mundo ITS. El destalle completo de las 41 aplicaciones de ITS, se presentan en la Tabla 01. Cada aplicación, por coherencia, se presentan en siete grupos (WB, 2011); donde, el presente trabajo está inmerso en el *quinto grupo*, aplicaciones de *prioridad semafórica e interfaz con sistemas adaptativos de control de tráfico.*

1. Gestión de operaciones
2. Ayudas al conductor
3. Tarificación
4. Información del viajero
5. Gestión del tráfico
6. Seguridad

7. Transporte responsivo a la demanda

Cada aplicación de ITS se describe desde tres perspectivas:

- Objetivos y funcionalidad.
- Tecnologías, datos y recursos necesarios para entregar la aplicación
- Beneficios y precauciones relacionadas con la aplicación.

Tabla 1. Conjunto de aplicaciones de ITS

Gestión de operaciones	Ayudas al conductor	Tarificación
Monitoreo vehicular automatizado	Programa de apoyo al cumplimiento de horarios	Venta de viajes y pago
Monitoreo de las condiciones en ruta	Advertencia de colisión y evitación	Cálculo de tarifas y carga
Programa de apoyo al cumplimiento de horarios	Acoplamiento de precisión	Autorización de viaje y evidencia
Cumplimiento del contrato de servicio	Asistencia de conducción económica	Autoridad de intercambio/transferencia
Cumplimiento de normas de manejo	Monitoreo de la condición del vehículo.	Descuento de intercambio/transferencia
Administración de emergencia/incidente	Vigilancia de pasajeros	Contabilidad y distribución de ingresos.
Reprogramación dinámica		
Información al viajero	**Gestión del tráfico**	**Seguridad**
Información del viajero en PC/Internet	Prioridad semafórica	Vigilancia en el vehículo
Información del viajero en teléfonos/PDA	Control de acceso	Vigilancia en la estación
Información en tiempo real en estaciones/terminales	Interfaz con sistemas adaptativos de control de tráfico.	Vigilancia en pista
Información en tiempo real en las paradas de autobús	Monitoreo de violaciones al carril/instalación de transporte público	Infraestructura/vigilancia de instalaciones
Información en tiempo real en vehículos.		**Transporte responsivo a la demanda**
Anuncio de parada del vehículo		Contrataciones y reservas
Planificadores de viaje dinámicos		Asignación de viajero
Servicios de alerta		Optimización de ruta
Consejos de emergencia/incidentes		Gestión de recogida/traslado de clientes
		Recuperación de ingresos y gestión administrativa

Fuente: Adaptado de WB, 2011.

La implementación de ITS en ciudades metropolitanas de gran tamaño como nuestra capital, es un tema sumamente amplio y complicado, que conlleva el involucramiento de actores políticos, técnicos, empresariales y consultores especializados para su implementación y sostenimiento en el tiempo. Es por eso que, después de más de 25 años que ciudades como Santiago de Chile han desarrollado una política nacional de ITS e implementado una Central Operativa de Control de Tránsito (UOCT) que es modelo o referente mundial, los gestores municipales de Lima (provincial y distrital) NO tienen el mayor conocimiento del tema. El elemento tecnológico principal para iniciar esta implementación es del diseño de una Arquitectura ITS (***arquitectura funcional y lógica***) y la consecuente implementación de la Central de Control de Tránsito como unidad física operacional del Sistema, para atender en principio, la ***Gestión Automatizado de la Red Semafórica*** de la ciudad. En este trabajo de investigación, desarrollaremos los conceptos detallados de estos dos componentes y propondremos las medidas de adopción para la ciudad de Lima.

1.2. Planteamiento del problema

- **Delimitación del Problema**

Espacial
Ciudad de Lima, no incluye Callao.

Temporal
2020 – 2030 (los proyectos de infraestructura de tránsito urbano se suelen evaluar a 10 años de vigencia, con mantenimientos preventivos y correctivos cada 2 y 5 años respectivamente).

1.2.1 Problema General

Siendo la ciudad de Lima considerada la tercera ciudad con mayor tráfico vehicular del mundo (El Comercio, 25/11/2019), ¿necesita un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica, que ayude a mitigar la congestión?.

1.2.2 Problemas Específicos

a) ¿Está la Autoridad Municipal preparada técnicamente para los cambios fundamentales en la planificación, el diseño e implementación de sistemas de gestión automatizado ITS?
b) ¿La red semafórica de la ciudad de Lima, tiene un mecanismo de interfaz entre el sistema de control actual de tiempo fijo y una aplicación de control adaptativo-responsivo?
c) ¿Está preparada la red semafórica de la ciudad para implementar una aplicación de control de prioridad?
d) ¿Existe un presupuesto potencialmente disponible para implementar un programa ITS?

1.3. Hipótesis de la investigación

1.3.1 Hipótesis General

La implementación de un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica de la ciudad de Lima, podría aliviar la congestión del tráfico vehicular hasta en un 30% durante todas las horas del año.

1.3.2 Hipótesis Específicas

a) La Autoridad Municipal NO está preparada técnicamente para los cambios fundamentales en la planificación, el diseño e implementación de sistemas de gestión automatizado ITS.
b) La red semafórica de la ciudad de Lima, NO tiene un mecanismo de interfaz entre el sistema de control actual de tiempo fijo y una aplicación de control adaptativo-responsivo.
c) La red semafórica de la ciudad, NO está preparada para implementar una aplicación de control de prioridad.
d) SI existe un presupuesto potencialmente disponible para implementar un programa ITS, que está siendo mal utilizado.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar una propuesta técnica, basada en el estado del arte y de la práctica internacional, para la implementación de un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica de la ciudad de Lima, que ayude a aliviar la congestión del tráfico vehicular.

1.4.2 Objetivos Específicos

a) Presentar los conceptos técnicos y procedimientos metodológicos, para conocimiento de las Autoridades Municipales sobre la implementación de un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica.

b) Proponer un mecanismo de interfaz entre el sistema de control actual de tiempo fijo y una aplicación de control adaptativo-responsivo.

c) Proponer un mecanismo de aplicación de control de prioridad para la red semafórica.

d) Revisar el presupuesto designado por la Autoridad Municipal para la implementación del Sistema ITS de control semafórico de la ciudad.

1.5. Variables, dimensiones e indicadores

1.5.1 Variable Dependiente

- ✓ *Congestión del tráfico (horas/año, S/ año)*

1.5.2 Variables Independientes

- ✓ Detenciones en las intersecciones semaforizadas
- ✓ Demoras en las intersecciones semaforizadas (seg/veh/h)
- ✓ Costo de la implementación del sistema ITS (S/)

1.5.3 Dimensiones

- ✓ *CONGESTIÓN:*

- *Social: Estrés, Calidad de Vida*
- *Económica: Pobreza*

1.5.4 Indicadores de las Variables:

Dependiente:

- ✓ Pérdidas H-H: horas/año y valorizado promedio en Soles/año

Independientes:

- ✓ Detenciones: número vehículos en cola/hora (anualizado)
- ✓ Demoras: segundos/vehículo/hora (anualizado)
- ✓ Costo del sistema ITS: Soles

1.6. Justificación del estudio

- **Justificación Teórica**

Los sistemas inteligentes de transporte no son un fin en sí mismos; más bien, pueden ser un medio importante para lograr un fin más amplio. Es importante identificar los objetivos para el programa de mejora del transporte antes de examinar la idoneidad de un enfoque dirigido por ITS. Los sistemas inteligentes de transporte solo son verdaderamente efectivos cuando existe la voluntad de cambiar los procedimientos organizacionales y operativos para aprovechar las oportunidades que se crean. Usar tecnología para hacer las mismas cosas que antes, hará poca diferencia en el resultado general. Solo se comprenderá completamente el potencial de los ITS, cuando comience a cambiar los procedimientos operativos, y luego podrá refinar su aplicación. Muchas ciudades solo han podido aprovechar al máximo el ITS en sus segunda o tercera vez de sus programas de implementación (WB, 2011).

Los ITS generalmente no son baratos de implementar, y es posible que no tengan un rendimiento financiero directo obvio. Sin embargo, puede ayudar en muchos aspectos del negocio del transporte, y mejorar el uso del sistema y la experiencia del cliente para retener o aumentar la cantidad de pasajeros de transporte público. Todos los ITS tienen un costo continuo de administración y mantenimiento, que puede ser bastante significativo. A menos que exista la capacidad y el compromiso

de cumplir con estos gastos, y la capacidad de realizar estas tareas de manera efectiva, entonces un programa ITS debe simplificarse o no implementarse. Los sistemas de transporte inteligentes a menudo son más fáciles de financiar en el sector público, donde los rendimientos pueden evaluarse con criterios económicos y financieros. Sin embargo, su costo de oportunidad debe evaluarse frente a otras prioridades de gasto local, especialmente cuando los recursos son limitados. El compromiso con un programa de Sistemas Inteligentes de Transporte por parte de una Autoridad corre el riesgo de que sus proveedores potenciales capturen el proceso. La Autoridad necesita desarrollar su propia gestión y capacidad técnica para contrarrestar esto (WB, 2011).

- **Justificación Práctica**

La señal del tiempo del semáforo impacta virtualmente a todos los días. Incluso en rutas no congestionadas, las paradas en las intersecciones con semáforo, marcan un viaje de área urbana o suburbana. Los escolares esperan obedientemente una señal de verde para interrumpir el tráfico y poder cruzar una calle concurrida. Los conductores colocan con seguridad su propia seguridad física y la de sus pasajeros en una asignación de señal de derecho de paso.

La gente acepta y en algunos casos exige colocar semáforos para garantizar la seguridad y la movilidad. Por lo general, los conductores asumen que la agencia responsable puede operar de manera eficiente los tiempos y las fases del semáforo; por lo que, los automovilistas generalmente informan solo las fallas más obvias. La operación ineficiente molesta a algunos automovilistas pero no produce una reacción pública fuerte[1]. Sin embargo, las inefectividades roban silenciosamente dinero del público en un mayor costo de combustible y tiempos de viaje más largos. Los usuarios normalmente perciben que las señales del semáforo funcionan si se ponen rojas y verdes; si operan sub-óptimamente, esto se convierte en una preocupación, no en una crisis. La investigación y la aplicación demuestran la efectividad de las mejoras del sistema de señal en la reducción:

- Demoras,

[1] En el Perú, aún con el caos vehicular latente, no ha sido suficiente para pedir la destitución de un Alcalde Municipal, a diferencia de países como Chile y Colombia.

- Detenciones,
- Consumo de combustible,
- Emisiones de gases contaminantes, y
- Accidentes

La ***optimización sistemática*** de los planes de sincronización de los tiempos de las señales de los semáforos, *representa un elemento esencial y continuo de la* gestión *del sistema de control de tráfico*. Esta optimización es laboriosa y costosa para muchos sistemas de control de tráfico existentes. Como resultado, el número de planes de tiempo y la frecuencia de actualización de los planes de tiempo a menudo están limitados por los recursos disponibles para realizar estas funciones. Ciertos sistemas de tráfico se han denominado **adaptativos**, es decir, tienen la capacidad de cambiar automáticamente la temporización de la señal del semáforo, en respuesta a variaciones de tráfico tanto a corto como a largo plazo. Estos sistemas no solo proporcionan un control más efectivo del tráfico, sino que también requieren menos recursos humanos[2] y financieros para actualizar la base de datos de tráfico del sistema.

- **Justificación Legal**

Ley Orgánica de Municipalidades LEY Nº 27972, Artículo 81°. - TRÁNSITO, VIALIDAD Y TRANSPORTE PÚBLICO. Las municipalidades, en materia de tránsito, vialidad y transporte público, ejercen las siguientes funciones:

"1. Funciones específicas exclusivas de las municipalidades provinciales:

1.3. Normar, regular, organizar y mantener los sistemas de señalización y semáforos y regular el tránsito urbano de peatones y vehículos.

1.10. Instalar, mantener y renovar los sistemas de señalización de tránsito en su jurisdicción, de conformidad con el reglamento nacional respectivo.

2. Funciones específicas compartidas de las municipalidades provinciales:

2.4. Instalar, mantener y renovar los sistemas de señalización de tránsito en su jurisdicción y establecer la nomenclatura de vías, en coordinación con las municipalidades distritales".

[2] Menos policías intentando gobernar las intersecciones en horas de máxima demanda o punta.

- **Justificación Económica**

La buena sincronización de la señal del semáforo, contribuirá a la circulación segura y eficiente de bienes y personas, no sólo de automóviles; a través del sistema de transporte de una ciudad. A diferencia de otras mejoras en el transporte, mejorar la periodicidad de la señal del semáforo normalmente requiere poca estructura de costos y produce un beneficio muy alto en relación con el funcionamiento del sistema existente, al colaborar con una mayor efectividad y reducción de la congestión. Como referencia, el costo para recalcular y optimizar el tiempo una intersección señalizada es de aproximadamente $ 2.500 a $ 3.100 (FHWA, 2007). Costo podrá variar dependiendo de las condiciones locales para recolectar la información de campo (p.j. si existen detectores en las intersecciones o cámaras de conteo vehicular de formato continuo, etc.); también de la cantidad de horas a la semana que se desea aforar y los planes de tiempo del semáforo que se pretenden recalcular. Más allá de la optimización de la temporización de la señal, el establecimiento o la mejora de la coordinación de la señal entre varias intersecciones semaforizadas, o la actualización del software y equipos de hardware pueden añadir más beneficios del sistema a los viajeros.

Los siguientes son algunos ejemplos específicos de los beneficios y de las mejoras en el sistema de transporte experimentadas en diversas comunidades en todo el país en los Estados Unidos, sobre la base de la optimización de la sincronización de la señal; tal como se documenta en el Departamento de Transporte:

- El Programa de Sincronización del Semáforo en Texas demostró una relación costo-beneficio de 62:1, con reducciones del 24.6 por ciento en la demora, un 9.1 por ciento en el consumo de combustible, y el 14.2 por ciento en paradas (colas).
- El Programa Gestión Eficiente del Combustible y la Semaforización en California demostró una relación costo-beneficio de 17:1, con reducciones del 14 por ciento en la demora, el 8 por ciento en el consumo de combustible, 13 por ciento en las paradas y el 8 por ciento del tiempo de viaje.
- Mejoras en la intersección once de la vía arterial San Agustín, en la Florida, mostraron reducciones de 36 por ciento en las demoras, 49 por ciento en

paradas, y 10 por ciento en ahorros del tiempo de viajes, lo que resulta en un ahorro anual de combustible de 26.000 litros y de $ 1.1 millones.

- Un proyecto en Syracuse, Nueva York, que conecta las intersecciones en una red de comunicaciones, produce reducciones en el tiempo de viaje de hasta el 34 por ciento. Los sistemas de semáforos coordinados mejoran la efectividad operativa y pueden simplificar el proceso de temporización de la señal.
- En las zonas de rápido cambio o con volúmenes de tráfico impredecibles, el control de los tiempos del semáforo mediante un sistema adaptativo (*actuated*), puede mejorar el rendimiento del sistema en un 5 a 30 por ciento, pero debe aplicarse con precaución especialmente en redes de intersecciones o corredores previamente sincronizados.

- **Importancia del estudio**

En Lima Metropolitana existen diferentes esfuerzos aislados realizados por dependencias de la Municipalidad Metropolitana a través de Instituto Metropolitano Protransporte de Lima, la Gerencia de Transporte Urbano y los Gobiernos Locales (Municipalidades Distritales); en la implementación de soluciones “inteligentes” de tránsito, que permitan administrarlo y gestionarlo adecuadamente en la red vial de la ciudad, **sin éxito**.

Estos esfuerzos aislados, con **protocolos de comunicación diferentes**, normas **no** estandarizadas, hacen imposible la sincronización de los elementos activos de la solución, si poder atender el problema de la congestión vehicular, no existen criterios de priorización del tráfico, incumplimiento de la señalización vial, trasgresión de las normas de educación vial, etc. Como consecuencia del diagnóstico presentado, se tiene:

- Intervenciones aisladas y no sincronizadas
- Accidentes de tránsito por la congestión vehicular.
- Inadecuado tránsito peatonal.
- Demora en los tiempos de viaje de los conductores
- Se debe implementar una solución única integrada de gestión del tránsito

1.7. Trabajos previos

1.7.1 Antecedentes internacionales

Ciudad de Boston, Massachusetts

En un esfuerzo por mejorar las operaciones de tráfico y la seguridad en las carreteras de Boston y obtener los beneficios asociados de esas mejoras, el Departamento de Transporte de Boston (BTD) seleccionó a Howard/SteinHudson Associates (HSH) para proporcionar asistencia técnica para mejorar la operación de las señales de tráfico en toda la ciudad. A partir de 2007, el esfuerzo se concentró en aproximadamente 280 intersecciones semaforizadas en más de 20 corredores viales, que representan aproximadamente un tercio de las intersecciones de la ciudad (BTD, 2010). El Proyecto propuso 2 fases de recomendaciones:

- La Fase 1 incluyó solo recomendaciones de tiempos de semáforo y no incluyó ningún cambio físico en la señal o intersección, aparte de las mejoras en la interconexión o el mantenimiento de los detectores de tráfico. Las recomendaciones de la Fase I se pueden implementar directamente desde el Centro de Gestión de Tráfico de la Ciudad (TMC[3] – siglas en inglés).

- La Fase 2 incluyó tanto las recomendaciones de sincronización de la señal de los semáforos en la Fase 1, como las recomendaciones de mejora física, las fases de las intersecciones, los cambios en los dispositivos cabezales del semáforo, los cambios en el uso de la acera, las mejoras geométricas y/o las mejoras en el marcado del pavimento.

Evaluación de impactos socio-económicos de las aplicaciones telemáticas en el transporte de ciudades europeas

[3] El Departamento de Transporte de Boston gestiona las intersecciones semaforizadas desde el Centro de Gestión de Tráfico (TMC) ubicado en el Ayuntamiento. Los ingenieros de BTD monitorean y controlan el flujo de tráfico en toda la ciudad, utilizando una combinación de software de tráfico, monitoreo de video, información en tiempo real y experiencia técnica. En el Centro, los Ingenieros pueden ajustar los tiempos de los semáforos en respuesta a los patrones de viaje de la hora del día, las condiciones climáticas o como parte de la gestión de incidentes.

Las actividades de investigación sobre aplicaciones telemáticas en el transporte comenzaron en Europa en 1989 con el programa exploratorio DRIVE y continuaron durante el período 1992-94 con el tercer programa marco (European Commission, August 1997). Se apoyaron más de 60 proyectos que involucraron a más de 30 ciudades y 13 principales corredores de transporte y acercaron muchas nuevas tecnologías a la implementación a gran escala. El grado de impacto de las aplicaciones telemáticas en la seguridad, la efectividad y el medio ambiente puede afectar el proceso de elaboración de políticas, especialmente cuando se tienen que considerar cuestiones financieras.

Hubo muchos actores en el campo del transporte que cubrían temas de investigación, políticas y finanzas que no estaban directamente involucrados en el Programa. Es esencial que los diversos actores identifiquen fácilmente los beneficios que se obtendrán de las aplicaciones más prometedoras en relación con los principales problemas de transporte. Por esta razón, los impactos telemáticos del transporte también se presentan por categoría de beneficios y características principales del usuario que son más relevantes para la explotación futura, como seguridad, efectividad, medioambiente y energía, costo, política socioeconómica, respuesta y aceptación del usuario.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados e impactos más relevantes sobre el Sistema de Gestión Automatizado de Control Semafórico.

- GESTIÓN Y CONTROL DEL TRÁFICO – Las pruebas de control de tráfico urbano – UTC[4] de los nuevos sistemas avanzados, han indicado reducciones típicas en el tiempo de viaje del 10% con los ahorros asociados en el consumo de combustible y las emisiones. El control de la contaminación que incorpora

[4] El Control de tráfico urbano (UTC) es el método de coordinación de tiempos del semáforo y distribución de fases en una red vial mediante el uso de planes de sincronización cargados en una computadora central. Los planes de tiempo que varían según la hora del día (por ejemplo, para adaptarse a los flujos de marea asociados con los picos AM y PM) son cargados automáticamente por la computadora y así, los tiempos en las calles cambian. Se pueden crear planes de tiempos especiales para hacer frente al tráfico asociado con eventos irregulares tales como partidos de fútbol que generan grandes volúmenes de tráfico en un período de tiempo relativamente corto. La información del plan de tiempos se envía a través de una ***red de comunicaciones*** con confirmación enviada desde el controlador electromecánico en el sitio. La red de comunicaciones también se usa para que el controlador informe cualquier falla en la calle, como fallas en las lámparas y problemas con los sensores de detección de presencia vehicular.

UTC y VMS (Señales de Mensajes Variables – siglas en inglés), ha logrado reducciones pronosticadas en emisiones de alrededor del 26-30% (CO, NOx, HC) en el área controlada en condiciones de contaminación severa con tráfico que ingresa al área central reducido en un 5%.

Se ha estimado una reducción máxima del 25% en el tiempo de viaje para todos los modos una vez que se haya completado la integración completa de 10 aplicaciones planificadas interconectadas a una red común.

La implementación de la Prioridad Semafórica de Transporte Público – TP en Sistemas Avanzados de Control de Tráfico Urbano (ATMS – siglas en inglés), ha sido respaldada por una gama de tecnologías de localización/detección de vehículos, que incluyen transponedores de autobuses con bucles inductivos, etiquetas de autobús con balizas de carretera y tecnologías de radio AVM (Automatic Vehicle Monitoring).

Los ahorros de demora en intersecciones con semáforo, para autobuses y tranvías debido a la implementación de señales de prioridad, promediaron alrededor del 50% en todas las evaluaciones (hasta 97% en una aplicación) con impactos insignificantes en el tráfico privado. Otros beneficios operacionales medidos incluyeron reducciones de hasta el 25% en los tiempos de viaje del TP y la variabilidad de los retrasos, hasta un 11% de regularidad mejorada de los servicios de TP. Los estudios de simulación de UTC mejorada con uso de prioridad de PT, indicaron posibles ahorros en el consumo de combustible/emisiones y los análisis de costo-beneficio económico indicaron tasas de rendimiento muy favorables, con períodos de amortización que varían de 3 a 16 meses.

1.7.2 Antecedentes nacionales

En el Repositorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica. Universidad Nacional Del Altiplano – Puno, se encuentra una Tesis de Pregrado intitulada: “Diseño e implementación de un sistema de control

neuro-difuso en un centro de control y monitoreo de tráfico vehicular centralizado para la ciudad de Puno", que propone el diseño e implementación del sistema de control, a partir de un equipo controlador de semáforo con tecnología electrónica de control neuro-difuso ANFIS. El trabajo postula que el controlador de semáforo cuenta con sensores de tráfico para obtener el flujo vehicular por vía, la cantidad de tiempo libre por ciclo en verde y la temporización de los controladores. Con la información de los sensores en estos parámetros, se entrena el sistema ANFIS y se proyecta valores de temporización considerando flujo máximo y tiempo libre cero (desperdicio de señal en verde). El sistema de control cuenta con un software como sistema de supervisión control y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés) (Gutiérrez Cayo, Cesar.; 2017). El trabajo es muy interesante pero se concentra en la tecnología electrónica del equipo de control y el sistema de gestión de la información; más no se involucra en los sistemas de comunicaciones digitales que son el puente entre los controladores de campo para los semáforos y el sistema centralizado.

1.8. Marco Teórico

1.8.1 Principios de Ingeniería Telemática

La telemática es la disciplina científica y tecnológica que analiza e implementa servicios y aplicaciones que usan tanto los sistemas informáticos como las telecomunicaciones, como resultado de la unión de ambas disciplinas. La palabra "telemática" proviene de la fusión de los términos "telecomunicación" e "informática". También es usado en ocasiones el término «teleinformática», término que nació en la disciplina de telecomunicación para designar el control remoto de sistemas informáticos, aunque no describe la telemática como tal. Son servicios o aplicaciones telemáticas, por ejemplo, cualquier tipo de comunicación a través de internet o los sistemas de posicionamiento global por ejemplo mandar un Email a otro país.

La telemática cubre un campo científico y tecnológico de una considerable amplitud, englobando el estudio, diseño, gestión y aplicación de las redes y servicios de comunicaciones, para el transporte, almacenamiento y procesado de cualquier tipo de información (datos, voz, vídeo, etc.), incluyendo el análisis y diseño de tecnologías y sistemas de conmutación. La telemática abarca entre otros conceptos los siguientes planos funcionales:

- El plano de usuario, donde se distribuye y procesa la información de los servicios y aplicaciones finales;
- El plano de señalización y control, donde se distribuye y procesa la información de control del propio sistema, y su interacción con los usuarios;
- El plano de gestión, donde se distribuye y procesa la información de operación y gestión del sistema y los servicios, y su interacción con los operadores de la red.

Cada uno de los planos se estructura en subsistemas denominados entidades de protocolo, que a su vez se ubican por su funcionalidad en varios niveles. Estos niveles son agrupaciones de funcionalidad, y según el modelo de interconexión de sistemas abiertos (modelo OSI) de la Organización Internacional de Normalización (ISO) se componen de: nivel físico, nivel de enlace, nivel de red, nivel de transporte extremo a extremo, nivel de sesión, nivel de presentación y nivel de aplicación. Trata también servicios como la tele-educación, el comercio electrónico (e-commerce) o la administración electrónica (e-government), servicios Web, TV digital, la conmutación y la arquitectura de conmutadores, y también toca temas como el análisis de prestaciones, modelado y simulación de redes: optimización, planificación de la capacidad, ingeniería de tráfico y diseño de redes. Otra modalidad es encontrarla focalizada en una actividad específica como telemática educativa en donde se desarrolla el uso de los recursos telemáticos dirigidos a la Educación; entre ellos la comunicación interactiva, la distribución de la información y el uso pedagógico de los servicios.

El término telemática se acuñó en Francia (télématique). En 1976, en un informe encargado por el presidente francés y elaborado por Simon Nora y Alain Minc (conocido como informe Nora-Minc y distribuido por el título: Informatización de la Sociedad), en el que se daba una visión increíblemente precisa de la evolución

tecnológica futura. Pero al igual que en Francia, en los países anglosajones también existe la disciplina telemática, la cual es denominada como Computer and Communications (del inglés: 'Ordenador y Comunicaciones') o Compunication (concepto acuñado por Wen Gao4 en su artículo Compunication: From Concept to Practice5). No obstante, hay matices claves a distinguir entre los dos términos. Para aclarar esto, conviene situarse en el contexto de la época: por una parte, Francia que ponía claro énfasis en las telecomunicaciones como motor de su transformación social en los años 70, mientras que Estados Unidos estaba viviendo una gran revolución de la informática. Así, Compunication (computadores + comunicación) apunta a un modelo con mayor relevancia de los sistemas informáticos; telemática (télématique) por su parte, refiere a un mayor énfasis en la telecomunicación en sí. En la actualidad, esta diferencia de origen se ha perdido, ya que esta disciplina científica y tecnológica ha convergido por completo a nivel mundial, para formar un único cuerpo de conocimiento bien establecido. Naciendo de esta forma el actual significado de la telemática.

El perfil profesional técnico del Ingeniero Telemático es sumamente amplio. Los titulados en esta especialidad tienen la capacidad de efectuar todas o algunas de las principales tareas que, tienen relación directa con la presente investigación y se nombran a continuación:

- Planificación, despliegue, mantenimiento y gestión, operación, integración de tecnologías, para entornos LAN[5], MAN[6] y WAN[7], que puedan hacer uso tanto de tecnologías de cable como inalámbricas, así como Internet/Intranets, etc. para la prestación tanto de servicios de voz como de datos para diversas aplicaciones, desde servicios comunes de Internet hasta otros más sofisticados como podrían ser las actividades relacionadas con el despliegue y la operación con las redes de telecomunicaciones en urbanizaciones y polígonos industriales

[5] Una red de área local o LAN (por las siglas en inglés de Local Area Network) es una red de computadoras que abarca un área reducida a una casa, un departamento o un edificio.
[6] Una red de área metropolitana (MAN, siglas del inglés Metropolitan Area Network) es una red de alta velocidad (banda ancha) que da cobertura en un área geográfica extensa, proporcionando capacidad de integración de múltiples servicios mediante la transmisión de datos, voz y vídeo, sobre medios de transmisión tales como fibra óptica y par trenzado (MAN BUCLE).
[7] Una red de área amplia, o WAN (Wide Area Network en inglés), es una red de computadoras que une varias redes locales, aunque sus miembros no estén todos en una misma ubicación física. Muchas WAN son construidas por organizaciones o empresas para su uso privado, otras son instaladas por los proveedores de Internet (ISP) para proveer conexión a sus clientes.

y de viviendas o las redes de telefonía móvil privadas (Servicio Móvil Terrestre) para flotas de vehículos, etc..

- Supervisión, administración, participación o asistencia técnica en desarrolladores y suministradores de equipos y sistemas de telecomunicación.

1.8.2 Sistema de Gestión de Tráfico Avanzado – ATMS

- **Introducción**

Uno de los componentes clave de las ciudades inteligentes del futuro es el uso de Sistemas de Gestión de Tráfico Avanzados (ATMS en sus siglas en inglés), para una gestión y control eficientes de los flujos de tráfico. El propósito del ATMS es mejorar el rendimiento general del sistema de tráfico, por ejemplo: reducir las emisiones, el ruido y los tiempos de viaje. Para lógralo, se deben capturar las condiciones del tráfico vial. El estado del tráfico vial se puede describir utilizando *la velocidad, el flujo* y *la densidad* en un segmento específico de la red. La longitud del segmento puede variar según la *geometría de la vía*. Al estimar el estado del tráfico, se utilizan comúnmente diferentes tipos de *modelos de tráfico*. Sin embargo, los modelos no pueden incluir todos los aspectos del *sistema real*, y para tener una buena representación de la realidad, los modelos deben combinarse con datos medidos del estado del tráfico, por ejemplo, recuentos de tráfico y mediciones de velocidad/tiempo de viaje.

En la actualidad, la mayoría de los ATMS existentes se basan en mediciones de punto fijo (Euleriano) de *detectores de radar y de bucle*. Los sensores eulerianos pueden recopilar observaciones en términos de flujo, velocidad y densidad, pero no pueden proporcionar *ninguna medición basada en la trayectoria* (mediciones lagrangianas), como observaciones directas de viaje o tiempos de viaje en rutas, lo que puede contribuir aún más a la comprensión del comportamiento del flujo de tráfico. Las ciudades ya generan grandes cantidades de datos de ubicación de *espacio-tiempo* de diferentes sistemas, como redes celulares, redes sociales y sensores participativos. Cuando los sensores eulerianos se combinan con los sensores lagrangianos disponibles en vehículos conectados y dispositivos de

usuario, la posibilidad de observar patrones de movilidad a gran escala cambiará drásticamente (Vangelis E., et al., 2017). Cantidades masivas de sensores lagrangianos, permiten una nueva era de detección de tráfico vial, lo que hace posible observar directamente los viajes para una penetración mucho mayor que antes. Estas observaciones permiten una nueva comprensión dinámica de los tiempos de viaje experimentados, así como la hora de salida, el modo y las opciones de ruta, que se relacionan con la demanda de viajes. Si se dispone de datos detallados, también se pueden capturar patrones de actividad a nivel individual.

En una estructura ATMS, estamos interesados en hacer uso de las nuevas fuentes de datos para mejorar el rendimiento general del sistema. Sin embargo, los datos recopilados no mejorarán automáticamente las estimaciones del estado general del tráfico ni respaldarán las decisiones de gestión del tráfico. Por lo tanto, se necesitan *modelos de tráfico* que, dado un estado de tráfico actual, pueden predecir las condiciones del tráfico en el futuro cercano. La cantidad de datos de sensores disponibles para la estimación y predicción del tráfico ha aumentado drásticamente en los últimos años, pero también ha aumentado la cantidad de diferentes tipos de sensores. La gran cantidad de datos de sensores de sensores heterogéneos hace que sea importante utilizar métodos eficientes para la fusión. Mejores estimaciones de la demanda dinámica de viajes junto con datos de sensores mejorados también permiten calibrar y estimar las condiciones de los límites para modelos de tráfico más avanzados en tiempo real. Los *modelos de tráfico más avanzados y mejor calibrados*, permiten mejores posibilidades de control del tráfico, pero también hacen que los métodos para combinar modelos con datos de sensores, es decir, asimilación de datos, sean más importantes.

Un componente clave del marco de estimación y predicción propuesto, incluye un mapeo coherente entre los *modelos de demanda de viajes*, utilizados tradicionalmente para la *planificación a largo plazo*, y los *modelos de tráfico dinámico* utilizados para la asimilación, fusión y predicción a *corto plazo de datos*.

- **Sensores**

Tradicionalmente, los sensores eulerianos se han utilizado para las observaciones del tráfico rodado. Los sensores como los detectores de bucle y los radares están muy extendidos en muchas redes viales importantes de las ciudades de todo el mundo. Estos sensores observan o estiman uno o varios de flujo, velocidad y densidad para una ubicación específica con una tasa de penetración muy alta. En las últimas décadas se han realizado esfuerzos significativos en el área de los sensores langrangianos y en muchas ciudades se han utilizado los tiempos de viaje o las observaciones de velocidad puntual, para la estimación del estado del tráfico en tiempo real, (ver p.j.: Herrera JC., et al., 2010; Kong QJ, et al., 2013). Sin embargo, los sensores que permiten un puente entre los *modelos de demanda de tráfico* y los *modelos de predicción de tráfico* en tiempo real, son los sensores que mantienen la identidad de un usuario o vehículo durante largos períodos de tiempo y distancia. Estos sensores son, por ejemplo, *datos de red celular*, *sensores Bluetooth/Wi-Fi*, *sistemas de reconocimiento automático de matrículas* y, en cierta medida, *vehículos equipados con GPS*. Todos estos son sensores de Lagrange e, independientemente del tipo de datos de tráfico (por ejemplo, tiempos de viaje o demanda de viajes) que se va a estimar, el rendimiento depende de cuatro propiedades principales del sistema pruebas: *nivel de penetración, estrategia de muestreo, tipo de medición y precisión de la medición* (Vangelis E., et al., 2017).

El *nivel de penetración*, es el número de vehículos equipados en comparación con el número total de vehículos en el área de estudio. La *estrategia de muestreo* se refiere, a la frecuencia con la que se registran las medidas del sensor y se envían al servidor (control central) la información de tráfico. El *tipo de medición* se relaciona principalmente, con el tipo de sensores con los que está equipada la sonda, por ejemplo: GPS o acelerómetro; pero también, qué tipo de datos es compatible con el *protocolo de transmisión*. La *precisión de la medición* se refiere, por ejemplo, a la precisión de posicionamiento del vehículo. La importancia de las diferentes propiedades depende del tipo de datos de tráfico que se estimen, pero también del tipo de aplicación de tráfico que hará uso de los datos.

Un aspecto importante de todos los sistemas de sensores de vehículos, es que normalmente *no podemos controlar* cuándo y dónde tenemos acceso a las mediciones de estado de tráfico. Para aplicaciones de tráfico críticas, esto puede resultar problemático. Los *sensores fijos* se colocan donde los planificadores de tráfico creen que será más importante y, por lo tanto, obtenemos mediciones constantes de alta calidad en estos lugares.

- *Datos de la red celular*

Desde la primera prueba para utilizar datos de la red celular para la estimación del tráfico por carretera, el proyecto CAPITAL (Transportación Studies Center, 1997), se ha avanzado mucho. El proyecto CAPITAL falló debido a la mala precisión de la ubicación celular. Sin embargo, desde entonces, los datos disponibles en la red, así como los métodos para procesar los datos, han cambiado drásticamente. Los datos disponibles en las redes celulares relacionados con la estimación del tráfico por carretera se describen en detalle en Seo T, et al. (2015). En cuanto a la actualidad, numerosos proyectos han mostrado resultados positivos e indican un gran potencial para la fuente de datos (Bar-Gera H., 2007; Valerio D, et al., 2009).

Los primeros proyectos que utilizaban datos de redes celulares tenían como objetivo la estimación del tiempo de viaje, principalmente basados en eventos de traspaso (Bar-Gera H., 2007; Gundlegård D, Karlsson JM, 2009). Últimamente, ha habido un interés creciente en la *estimación de matrices Origen-Destino (OD)* basadas en estos datos (Cáceres N, et al., 2007; Wang P, et al., 2012). Históricamente, un factor limitante de este tipo de datos ha sido *la dificultad para acceder a los datos de los operadores celulares*. En el año 2013, Orange lanzó un conjunto de datos de redes celulares con fines de investigación y el interés fue muy alto por parte de investigadores y profesionales de todo el mundo (Blondel VD, et al., 2013). Esto podría aumentar el conocimiento sobre el potencial de la fuente de datos, pero posiblemente también facilitaría que otros operadores celulares compartan datos.

El nivel de penetración de los datos de la red celular, depende de cómo se recopilen los datos de la red celular. El aspecto principal está relacionado con si los teléfonos

celulares que están (1) haciendo llamadas telefónicas, (2) tienen una conexión de datos o (3) estando inactivos, brindan datos. Para (3), el nivel de penetración es igual a la participación de mercado de los operadores, para (1) es igual a un pequeño porcentaje de los vehículos y para (2) la tasa de penetración está en algún punto intermedio, dependiendo del uso de datos de los usuarios. La estrategia de muestreo depende en gran medida del tipo de red celular y de la interfaz que se monitorea (ver Gundlegárd D, Karlsson JM, 2006 para obtener más detalles).

La mayor parte de la investigación realizada hasta ahora en el área, ha estado utilizando datos de registros de detalles de llamadas, que se utilizan para fines de facturación en la red de los operadores. Sin embargo, estos datos son solo una fracción de los datos disponibles en la red celular. Si el aspecto de la integridad personal del uso de datos de la red celular se puede manejar de manera eficiente, es probable que los datos de la red celular se conviertan en una fuente de datos importante en un futuro cercano, tanto en el tiempo de viaje, flujo de tráfico y estimación de OD.

- *Dispositivos equipados con GPS*

Los datos de tráfico alternativos están disponibles de diferentes tipos de pruebas de usuario, por ejemplo: sistemas de navegación, gestión de flotas de usuarios y sistemas de seguros “black-box”[8]. El tipo de usuario, afectará las características de los datos que se recopilan y podría introducir sesgos en las estimaciones de tráfico. Por ejemplo, los conductores profesionales con un buen conocimiento del sistema de tráfico tienden a evitar las partes congestionadas de la red vial y, por lo tanto, pueden subestimar la congestión del tráfico. Algunos tipos de usuarios, por ejemplo: algunos vehículos municipales, solo están disponibles en un momento determinado; otros tipos como los taxis, pueden utilizar carriles exclusivos para autobuses/taxis y, por tanto, indican tiempos de viaje más bajos que los de los vehículos normales. Otro posible problema es que algunos tipos como los de gestión de flotas de vehículos pesados y los autobuses, están más restringidos en

[8] El seguro de caja negra, también conocido como seguro telemático, es un programa de seguro de automóvil que ofrece primas basadas en el comportamiento de conducción actual en contraposición al desempeño histórico. El seguro de caja negra tiene como objetivo emparejar a los automovilistas con primas personalizadas de acuerdo con su desempeño de conducción.

términos de límites de velocidad. El tipo de usuario debe tenerse en cuenta al estimar el estado del tráfico.

El tipo de dispositivo también puede afectar las características de los datos de tráfico. Por ejemplo, podemos estar relativamente seguros de que un dispositivo de navegación está ubicado en un vehículo, lo que no es necesariamente cierto para un dispositivo de teléfono celular. Algunos dispositivos tienen receptores GPS deficientes y la precisión de la ubicación informada por estos usuarios, puede afectar potencialmente los resultados de las estimaciones del tiempo de viaje; especialmente si éste se calcula en una distancia relativamente corta. El principal tipo de medidas de los vehículos equipados con GPS son: *la velocidad puntual y los tiempos de viaje*. Algunos dispositivos y/o tipos de usuarios, no admiten mediciones de velocidad puntual, lo que reduce significativamente la cantidad de información relacionada con el estado del tráfico que se puede extraer de cada equipo. Si la identificación del equipo se recopila y se mantiene, aún es posible recopilar los tiempos de viaje; de lo contrario, nos queda intentar estimar la densidad en función de las ubicaciones del equipo, lo que, con las tasas de penetración más realistas es un desafío con una precisión razonable. La estrategia de muestreo de ubicación para dispositivos equipados con GPS es típicamente un muestreo basado en el tiempo con un intervalo de informe típico de entre 30 s y 2 min. Este tipo de muestreo junto con una alta precisión de medición, permite un gran número de aplicaciones relacionadas con el tráfico.

- *Identificación automática de vehículos*

La identificación automática de vehículos (AVI en sus siglas en inglés) es un nombre agregado para las técnicas de recopilación de datos, en las que las identidades de los vehículos se capturan en ubicaciones seleccionadas. Los sistemas más comunes se basan en el *reconocimiento de matrículas (LPR)* y *la reidentificación de direcciones físicas Bluetooth o Wi-Fi*. Bluetooth se utiliza, por ejemplo, en dispositivos “manos libres” y para la comunicación entre diferentes dispositivos en vehículos. El tipo de medición para los sistemas AVI es similar al

de los datos de la red celular, es decir, tuplas[9] de espacio-tiempo con un identificador del vehículo o del dispositivo Bluetooth/Wi-Fi. En Europa, las pruebas de campo realizadas, utilizando la técnica Bluetooth, indican una tasa de penetración de alrededor del 30% [Barceló J, et al., 201; Lahrmann H, et al, 2010).

El error de medición se relaciona con el error de ubicación del lugar donde se captura el dispositivo. Para Bluetooth, es posible ajustar la cobertura de los sensores que recopilan datos de Bluetooth y la investigación ha demostrado que una cobertura más baja, lo que también significa un número menor de vehículos capturados, disminuye el error en la estimación del tiempo de viaje (Porter JD, et al., 2011). Además, la identificación de la dirección MAC[10] tarda unos 5 s en promedio, pero puede tardar hasta 10 s en algunos casos extremos (Huang A, Rudolph L., 2007), lo que afectará la estimación del tiempo de viaje. Sin embargo, una serie de ensayos de campo han llegado a la conclusión de que los tiempos de viaje estimados a partir de detectores Bluetooth, desplegados a lo largo de una autopista o arteria, son comparables a los estimados por GPS y lectores de etiquetas de peaje (Haghani A, et al., 2010; Kim K, et al., 2011; Lahrmann H, et al, 2010; Huang A, Rudolph L., 2007).

- **Estimación y predicción del estado del tráfico para ATMS**

La capacidad de predecir la evolución a corto plazo del estado actual del tráfico, es una base importante para futuras aplicaciones de gestión y control del tráfico. Aquí nos centramos en los métodos aplicables a ATMS, en una red de tráfico equipada con sensores que suministran datos de tráfico en tiempo real. Después de una gestión adecuada de los datos (por ejemplo, filtrado de valores atípicos), se aplican *modelos estadísticos y de tráfico* adecuados para generar la información local necesaria para estimar y predecir la evolución a corto plazo del estado actual del tráfico y las variables asociadas, o para generar la entrada de datos para modelos de tráfico más sofisticados para respaldar políticas de control y *gestión de área amplia*. Como consecuencia del advenimiento de la nueva tecnología de sensores,

[9] Una tupla es una secuencia de valores agrupados. Una tupla sirve para agrupar, como si fueran un único valor, varios valores que, por su naturaleza, deben ir juntos. El tipo de datos que representa a las tuplas se llama tuple. El tipo tuple es inmutable: una tupla no puede ser modificada una vez que ha sido creada.

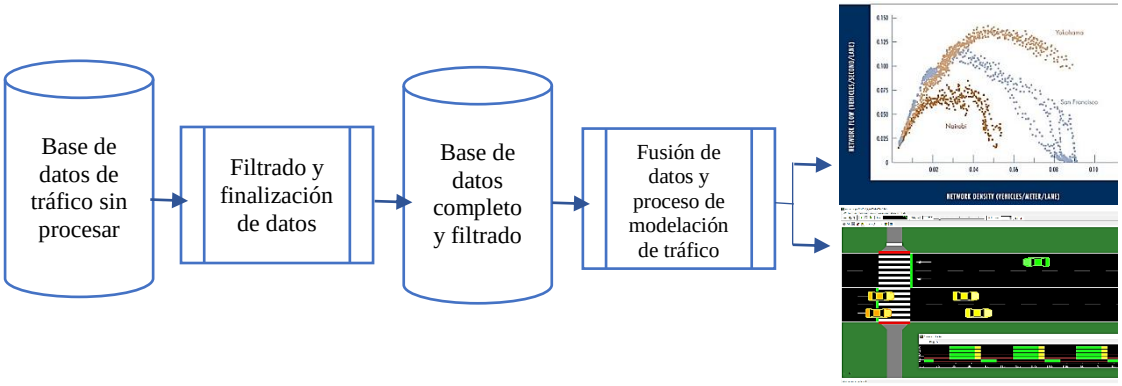
[10] Es el caso del módem WiFi del smartphone, integrado en el SoC o procesador del dispositivo: con la dirección MAC se identifica en el punto de acceso para así acceder a la red de datos. El problema es que este identificador es único, por lo que deja rastro.

que hace disponible una gran cantidad de nuevos datos de tráfico, existe la necesidad de nuevas técnicas y metodologías para combinar la gran cantidad de datos de diferentes fuentes. Un escenario tecnológico plausible combinará:

- Detección de puntos con resolución de tiempo discreto, como por ejemplo detectores de bucle inductivo convencionales y radares, medición de flujos (veh/h), ocupaciones (% de tiempo), velocidades puntuales (km/h), mezcla de tráfico (% vehículos ligeros, pesados).
- Detección de puntos con resolución de tiempo continuo. Por ejemplo, magnetómetros que miden el tiempo de entrada/tiempo de espera en el detector a partir del cual, se pueden estimar los recuentos de flujo, las velocidades puntuales, las ocupaciones o la mezcla de tráfico.
- Detectores AVI avanzados que registran la etiqueta de tiempo, la identificación del vehículo/dispositivo y la re-identificación aguas abajo, proporcionando recuentos de muestras de las mediciones del tiempo de viaje.
- Detección espacio-temporal continua. Por ejemplo, rastreando dispositivos GPS o automóviles conectados, proporcionando etiqueta de tiempo, posición (coordenadas X, Y, Z), velocidad local y dirección del rumbo.
- Además, cada teléfono celular puede, además de compartir los datos de posición de su GPS, proporcionar observaciones espacio-temporales asociadas con la señalización en la red celular.

Desde el punto de vista metodológico, el principal cambio respecto al uso de nuevas tecnologías de sensores, consiste en tener que lidiar con una cantidad masiva de datos heterogéneos. Por lo tanto, para administrar y utilizar de manera eficiente una cantidad tan enorme de datos en un ATMS, se deben combinar técnicas estadísticas complejas (por ejemplo, suavizado de kernel, filtrado de Kalman y redes bayesianas) con modelos matemáticos del sistema de tráfico. Este proceso se sintetiza en el diagrama metodológico de la Figura 01.

Figura 1. Principales componentes metodológicos para la predicción a corto plazo del estado del tráfico



Fuente: Adaptado de Vangelis E., et al., 2017. Fig. 11.1

Los enfoques para la estimación y predicción del estado del tráfico, se pueden dividir en *modelos de predicción paramétricos y no paramétricos*. Los *modelos no paramétricos* requieren que tanto los parámetros como la estructura del modelo se determinen a partir de los datos. Por lo tanto, se basan en una gran cantidad de datos históricos. Se puede capturar la dinámica del tráfico, aunque no se incluye ningún conocimiento de los procesos del tráfico como tal. Los modelos no paramétricos tienen la propiedad de que solo se pueden predecir los estados de tráfico ya ocurridos. Los *modelos paramétricos*, por otro lado, incluyen parámetros con una estructura predeterminada. Aun así, los parámetros deben calibrarse de acuerdo con datos empíricos. Los modelos paramétricos tienen la propiedad de describir únicamente los fenómenos de tráfico que se derivan de la relación predeterminada entre los parámetros del modelo. Además, dependen de las condiciones de contorno; por ejemplo: *demanda de tráfico*, que debe predecirse para todo el horizonte de evaluación. El resto de esta sección ofrece una descripción general de los modelos, el filtrado de datos de tráfico, la asimilación de datos de tráfico con modelos de tráfico y la fusión de tipos heterogéneos de datos.

- *Modelos no paramétricos*

Los modelos no paramétricos se crean a partir de una gran cantidad de datos históricos y utilizan enfoques de análisis de *big data*, como: *series de tiempo lineal, K-vecindad más cercana, regresión ponderada localmente, lógica difusa, redes bayesianas y redes neuronales*. En el trabajo de van Hinsbergen C, van Lint J,

Sanders F (2007), se ofrece una descripción general de los métodos más utilizados. Es importante reconocer que, aunque los modelos no paramétricos pueden capturar la dinámica del tráfico, aunque no se necesita ningún conocimiento de los procesos del tráfico como tal, todos heredan la propiedad de que solo se pueden predecir los estados del tráfico ya ocurridos. Por lo tanto, son apropiados para predecir condiciones de tráfico recurrentes, pero menos apropiados para condiciones de tráfico no recurrentes, como: la congestión debido a obras viales, eventos o incidentes. Además, dado que carecen de conocimiento sobre los procesos de tráfico, son de menor interés cuando se quiere evaluar las estrategias de gestión del tráfico.

- *Modelos paramétricos*

Los modelos paramétricos aplicados a problemas de planificación y estimación del tráfico se denominan comúnmente ***"modelos de tráfico"*** o ***"modelos de transporte"*** en la literatura, y se basan en modelos matemáticos del sistema de transporte. Los diferentes modelos describen el sistema de transporte con diferente nivel de detalle, dependiendo de sus áreas de aplicación. Aquí nos centraremos en los modelos apropiados para su aplicación dentro de un ATMS. Por lo tanto, solo describiremos enfoques de *modelado dinámico*, que pueden describir la evolución espacial y temporal de la congestión. Los enfoques de modelado estático pueden seguir siendo pertinentes para un ATMS, en términos de proporcionar una estimación inicial de la matriz OD. Los enfoques de ***asignación de tráfico dinámico*** descomponen el problema de la elección de la ruta y la carga de la red en dos componentes principales:

1. Un método para determinar las tasas de flujo en las rutas de la red.
2. Un método de carga de red dinámica, que determina cómo estos flujos en ruta, dan lugar a volúmenes de enlace dependientes del tiempo, tiempos de viaje de enlace y tiempos de viaje en ruta.

La diferencia entre la asignación de tráfico dinámico puro (DTA siglas en inglés) y el equilibrio dinámico del usuario (DUE siglas en inglés), depende de cómo se implemente el primer componente, pero ambos se basan en un modelo de elección de ruta. En DTA, las rutas y las proporciones de ruta se seleccionan en cada intervalo de tiempo de acuerdo con un modelo de elección discreta, que no

garantiza el equilibrio; mientras que, DUE utiliza un procedimiento iterativo para resolver la formulación de equilibrio de desigualdad variacional (Chiu YC., et al., 2011).

En la fase de carga de la red, la evolución de la congestión se puede modelar en detalle mediante ***enfoques microscópicos***, en los que cada unidad conductor-vehículo se describe en detalle, con: posición, *velocidad, aceleración y comportamiento del conductor*. Cuando aumenta la densidad de un segmento de la vía, las interacciones entre los vehículos darán como resultado velocidades más bajas y se puede utilizar la densidad o el tiempo medio de viaje como medida del nivel de congestión. También existen ***enfoques macroscópicos***, en los que las condiciones dinámicas del tráfico se describen mediante medidas agregadas (por ejemplo, *flujo, densidad y velocidad*) en función tanto del espacio como del tiempo. Los modelos macroscópicos se basan en relaciones matemáticas entre flujo, densidad y velocidad, y estas relaciones se utilizan para describir cómo evolucionará el estado del tráfico tanto *en el espacio como en el tiempo*. Este grupo de modelos incluye el modelo de Lighthill-Whitham-Richard (LWR) (Lighthill M., Whitham G., 1955), y su versión discretizada, el modelo de transmisión celular (CTM siglas en inglés) (Daganzo CF., 1994). Un tercer grupo de enfoques de modelado dinámico se puede colocar en algún lugar entre los modelos microscópicos y macroscópicos, y se denominan ***modelos mesoscópicos***. Por lo general, modelan vehículos individuales o grupos de vehículos, *pero con una descripción simplificada de las interacciones entre ellos*. Si bien los enfoques de modelado dinámico proporcionan mecanismos para el modelado de alta definición de la distribución espacial y temporal de la congestión, es importante reconocer que dependen en gran medida de la disponibilidad de datos de alta definición, tanto en términos de condiciones de contorno como de calibración. Las condiciones de contorno son comúnmente la matriz de OD, y la calibración de los modelos se puede realizar utilizando mediciones tanto eulerianas como lagrangianas.

- *Filtrado, fusión y asimilación*

El filtrado, la fusión y la asimilación se refieren al proceso de mejorar la precisión de una estimación del estado del tráfico, mediante la interpolación y la eliminación

de ruido y sesgo en las mediciones. La principal diferencia entre los diferentes conceptos, se relaciona con la metodología central para mejorar la estimación. En el *filtrado simple*, normalmente solo se incluye una modalidad de medición. En la *fusión*, el enfoque es combinar mediciones de diferentes modalidades y, en la *asimilación*, el enfoque es combinar las mediciones con la salida de un modelo matemático. Sin embargo, mientras que la asimilación puede incluir múltiples tipos de medición, la fusión generalmente incluye un modelo para la evolución del sistema. En general, para convertir los datos de tráfico sin procesar en una estimación de estado, es necesario realizar una serie de pasos:

- Paso 1. Eliminación de valores atípicos y mediciones erróneas que podrían inducir grandes errores y sesgos en la estimación.
- Paso 2. Rellenar los vacíos en los datos, dado que los sensores que funcionan mal y la eliminación de valores atípicos generarán vacíos, estos vacíos deben llenarse para tener una serie coherente completa de observaciones.
- Paso 3. Fusionar mediciones de diferentes fuentes, para extraer la información más rica y homogénea de los datos heterogéneos disponibles.
- Paso 4. Combinar las medidas con un modelo de sistema o proceso.

En alguna literatura, especialmente en el área de predicciones meteorológicas e hidrología, el Paso 4 se denomina *asimilación* (Evensen G., 2009). Cabe resaltar, que la Teoría del Flujo de Tráfico se basa en la Mecánica de Fluidos. Para la estimación del estado del tráfico, normalmente los Pasos 1 y 2 se implementan conjuntamente como un paso de pre-procesamiento; y los Pasos 3 y 4 se implementan como un paso de fusión y asimilación conjunta. En el primer paso, el conocimiento del proceso físico que se observa y el sensor que produce las mediciones, se puede utilizar para eliminar valores atípicos y mediciones obviamente defectuosas. En el segundo paso, los valores atípicos se reemplazan por valores razonables. Aunque en este paso se pueden utilizar modelos de procesos más complejos y de fusión, a menudo se utilizan modelos de sistema muy básicos por separado para sensores con modalidad diferente. En el Paso 3, los sensores con diferentes modalidades se fusionan para mejorar la estimación. Las diferentes modalidades requieren modelos para la traducción entre ellas, estos a menudo se denominan *modelos de medición*, y un ejemplo puede ser la relación entre flujo y densidad, es decir, *el diagrama fundamental del flujo de tráfico*. Los diferentes

sensores también están separados en el espacio y sus observaciones están separadas en el tiempo, lo que requiere modelos para la evolución del estado, tanto en el dominio espacial como en el temporal. Los *modelos macroscópicos* descritos en el punto anterior, son buenos ejemplos de modelos que describen la evolución del estado del tráfico en el espacio y el tiempo y se pueden utilizar para la asimilación.

El filtro de Kalman se presentó por primera vez en (Kalman R., 1960), Kalman R., Bucy R., 1961) y se ha utilizado con éxito para todos los pasos descritos anteriormente. La parte derecha de la Figura 01 muestra dos ejemplos, la salida de un filtro de Kalman para estimar valores atípicos y reemplazar los datos faltantes para los flujos de tráfico (parte superior derecha de la Figura 01) y una reconstrucción del espacio-tiempo usando una técnica de asimilación (parte inferior derecha parte de la Figura 01). Para una descripción más detallada del filtrado de Kalman, y sus extensiones, en la gestión y el control del tráfico, se remite al lector a (Antoniou C., Ben-Akiva M., Koutsopoulos HN., 2010 y van Lint H, Djukic T., 2012). En (Byon YJ., et al., 2010) se aplica un filtro Kalman de Restricción Simple a la Vez (SCAAT siglas en inglés), que utiliza la medición de velocidad más reciente de cualquier sensor disponible; en este caso, detectores de bucle y datos de dispositivos GPS. El estado se actualiza en función de las características de ese sensor en particular y la estimación de estado acumulada del paso anterior. Los resultados son prometedores, pero la limitación es que solo se pueden utilizar mediciones de velocidad.

- *Estimación de matrices OD dependiente del tiempo*

El uso de modelos de tráfico dentro de un ATMS, plantea un problema adicional con respecto al procesamiento de datos de tráfico: la necesidad de estimar patrones de tráfico dependientes del tiempo formulados en términos de matrices OD, que en los últimos años se ha convertido en un campo de intensa investigación. Teniendo en cuenta la naturaleza dinámica de los fenómenos de tráfico, ha sido bastante natural desarrollar estimadores basados en variantes de enfoques de filtros de Kalman, aprovechando las mediciones de tráfico en tiempo real. Sin embargo, aunque en general todos estos enfoques han demostrado su solidez en términos de

convergencia a soluciones sólidas, la mayoría de ellos tienen requisitos computacionales tan engorrosos que no son aplicables para respaldar decisiones en tiempo real. Entre los diversos factores que determinan el rendimiento computacional, la calidad de la estimación de OD inicial resultó ser crítica. Una solución al problema de inicialización podría ser ajustar las matrices OD aprovechando las mediciones de tráfico disponibles y utilizando un enfoque de línea estática (Vangelis E., et al., 2017).

Entre los procedimientos estáticos fuera de línea para ajustar las matrices de OD a las mediciones de tráfico, los métodos de optimización de dos niveles proporcionan los resultados más consistentes. Estos enfoques formulan y resuelven un problema de optimización de nivel superior. En el nivel superior, la función objetivo suele ser una medida de distancia que incluye ambos recuentos de enlaces, medidos por sensores y estimados a partir de la matriz OD actualizada, y la propia información OD, medida por la diferencia entre la matriz OD actualizada y una matriz objetivo (por ejemplo, de una encuesta de viajes). En el nivel inferior se realiza una asignación de tráfico, que estima los valores de las variables de tráfico en función de la OD ajustada en el nivel superior de la iteración actual. La Figura 02 ilustra la lógica del proceso y el intercambio de información entre ambos niveles. La función objetivo en el nivel inferior depende del tipo de asignación que se lleve a cabo (por ejemplo, dinámica o estática), y es para los casos dinámicos y estáticos una función no diferenciable.

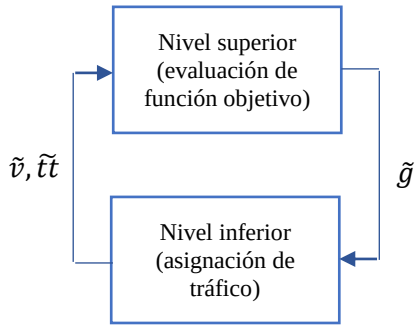
$$F\left(\widetilde{g^k}, \widetilde{v^k}, \widetilde{tt^k}\right) = y_1 F_1\left(\widetilde{g^k}, \widetilde{g^{-k}}\right) + y_2 F_2\left(\widetilde{v^k}, \widetilde{v^{-k}}\right) + y_3 F_3\left(\widetilde{tt^k}, \widetilde{tt^{-k}}\right) \qquad \text{Ec. 01}$$

Sujeto a $(\widetilde{v^k}, \widetilde{tt^k})$ = asignación $(\widetilde{g^k})$; $\widetilde{g^k} \geq 0$

Donde $\widetilde{g^k}, \widetilde{v^k}, \widetilde{tt^k}$ son, respectivamente, las estimaciones de las matriz OD *g*, el volumen de tráfico *v*, y el tiempo de viajes entre pares de detectores Bluetooth *tt*, en la interacción *k*. Las funciones F_1, F_2 y F_3 son funciones de distancia. La salida de este proceso *off-line* genera datos objetivos de la matriz OD *off-line*, que pueden ser utilizados para inicializar un procedimiento *online* para estimar la matriz OD en tiempo real para ser utilizada en el modelo de simulación de tráfico.

En el trabajo de Vangelis E., et al., 2017, se analizan las propuestas de los métodos de aproximación estocástica de perturbación estocástica (SPSA) para resolver el problema de nivel superior con una asignación DUE realizada para dar cuenta de la dinámica de la propagación de la congestión en el nivel inferior. En la formulación propuesta el problema de dos niveles a resolver es:

Figura 2 Esquema computacional del método de estimación de matrices OD de dos niveles



Fuente: Adaptado de Vangelis E., et al., 2017. Fig. 11.2.

- **Estudios de caso de estimación y predicción del estado del tráfico**

Presentaremos dos estudios de caso en los que se utilizan nuevas fuentes de datos para proporcionar información tanto del estado del tráfico actual como del futuro. El primero está relacionado con la estimación de la matriz OD dependiente del tiempo en línea, aquí con un ejemplo de la ciudad de Vitoria en España, que combina los datos del detector de bucle tradicional con los detectores AVI Bluetooth. El segundo está relacionado con la fusión de diferentes fuentes de datos y la asimilación con un modelo de tráfico, para proporcionar estimación y predicción del estado del tráfico en tiempo real para una parte del sistema de autopistas de Estocolmo en Suecia.

- *Estimación de viajes OD online en Vitoria*

La aplicación de modelos de asignación de tráfico dinámico en un ATMS se basa en información conocida de demandas, en términos de matrices OD *off-line*, de acuerdo a la metodología mostrada en *Estimación de matrices OD dependiente del*

tiempo. Aquí proporcionamos un ejemplo de cómo una matriz OD histórica (conocida) se puede utilizar para actualizar una matriz OD actual, utilizando recuentos de tráfico y detectores Bluetooth AVI.

- *Un enfoque de filtrado de Kalman*

Un enfoque de filtro de Kalman, con la formulación de espacio de estado de filtro de Kalman lineal recursivo está adaptado para aprovechar los recuentos de tráfico recopilados por los sensores AVI y las tecnologías de detección convencionales, y los tiempos de viaje observados por los sensores AVI. La formulación utiliza las desviaciones de los flujos de la ruta OD como variables de estado, calculadas con respecto a los flujos históricos de la ruta OD basados en DUE. Se utiliza un subconjunto de los flujos de ruta OD más probables identificados en una asignación DUE. El número de caminos a tener en cuenta es un parámetro de diseño. Se crea automáticamente una lista de rutas que atraviesan cada sensor para cada sensor AVI a partir de la descripción de la ruta OD, la ubicación del sensor AVI y la topología de la red.

El enfoque propuesto inicialmente asume detectores de conteo de flujo y sensores AVI ubicados en un cordón en cada punto posible para la entrada del flujo y sensores AVI ubicados en las intersecciones de las redes urbanas que cubren los enlaces hacia/desde la intersección. Los caudales y tiempos de viaje están disponibles en los sensores AVI para cualquier intervalo de tiempo superior a 1s. Los tiempos de viaje desde los puntos de entrada de origen hasta las ubicaciones de los sensores son medidas proporcionadas por el diseño de detección. Por tanto, ya no son variables de estado sino medidas, que simplifican el modelo y lo hacen más fiable.

Las dependencias variables en el tiempo entre las mediciones (recuentos de sensores de vehículos equipados con Bluetooth) y las variables de estado (desviaciones de los flujos de ruta OD equipados con Bluetooth) se utilizan para estimar aproximaciones discretas de las distribuciones del tiempo de viaje. Dado que el enfoque utiliza las mediciones de tiempo de viaje AVI de vehículos equipados con Bluetooth, las aproximaciones no lineales se pueden reemplazar por

estimaciones de una muestra de vehículos. Entonces, no se necesitan variables de estado adicionales para modelar los tiempos de viaje y la dinámica del tráfico, ya que los tiempos de viaje muestreados se utilizan para estimar distribuciones discretas del tiempo de viaje, ver [11, 12] para más detalles.

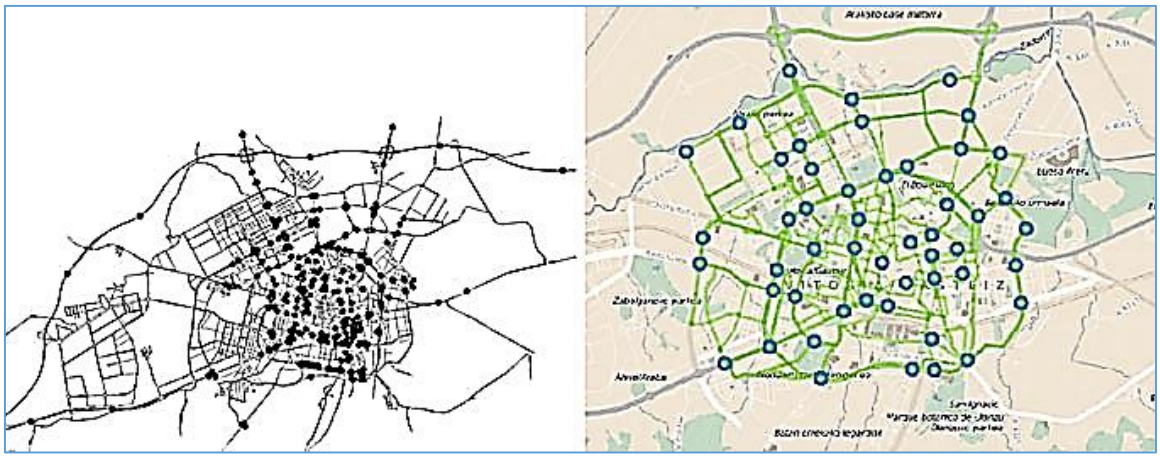
- *Resultados*

Se llevaron a cabo experimentos computacionales con redes urbanas de varios tamaños, ver [4] para más detalles. En aras de la exhaustividad, presentamos aquí los de la red de tamaño mediano de la ciudad de Vitoria (España), que se muestra en la Figura 03, que incluye 57 centroides[11], 3249 pares de OD, 2800 intersecciones y una red modelada de unos 600 km. Esta red se asemeja a una red de tamaño razonable en la vida real, con niveles de congestión representativos y una dimensión de elección de ruta que se encuentra en muchas grandes áreas urbanas. En la red de Vitoria se han identificado dos conjuntos de sensores diferentes:

- 389 detectores de bucles estándar, ubicados como se muestra en el lado izquierdo de la Figura 03, que proporcionan flujos, velocidades y ocupaciones, relacionados con todos los vehículos detectados en el bucle.
- 50 sensores AVI, ubicados como se muestra en el lado derecho de la Figura 03. En particular, los sensores AVI se implementan siguiendo una estrategia de diseño, cuyos detalles se pueden encontrar en [9], para optimizar la captura de vehículos equipados con Bluetooth y proporcionar mediciones efectivas del tiempo de viaje entre los sensores AVI.

[11] Punto de carga de viajes en un área de actividad central para una determinada zona de tráfico. Unidad celular básica para el modelo de asignación, en la planificación de viajes de transporte.

Figura 3. La red de Vitoria, País Vasco, España: disposición de los sensores del detector de bucle (izquierda) y disposición de los detectores AVI Bluetooth (derecha)



Fuente: Vangelis E., et al., 2017. Fig. 11.3.

Tabla 05. Método 5: coeficiente de Theil promedio, valores de RMSE y R para grupos de cuartiles de pares OD según flujos de OD a priori

Matriz inicial	Coeficiente de Theil					NRMSE (%)					R^2 (%)				
	Q1	Q2	Q3	Q4	All	Q1	Q2	Q3	Q4	All	Q1	Q2	Q3	Q4	All
D7	0.16	0.15	0.14	0.16	0.15	45.1	36.6	27.4	28.3	35.1	23.4	15.9	68.1	77.4	88.5
D8	0.15	0.13	0.12	0.15	0.14	40.8	26.3	24.3	26.5	31.9	25.3	17.0	74.5	76.5	88.0
D9	0.15	0.13	0.13	0.15	0.14	39.1	36.0	24.4	26.5	31.5	26.8	18.0	75.6	72.8	86.3

Notas:

- Coeficiente de Theil: es una medida de desigualdad basada en la entropía de Shannon. Sirve para medir y comparar la distribución de un pronóstico. Dicho índice permite ser desagregado en un componente de desigualdad al interior de los grupos de estudio, y otro correspondiente a la desigualdad entre grupos. El valor del índice de Theil es dado por la fórmula: Theil = 1- $\exp^{(-R)}$. El valor resultante está entre 0 y 1, cuanto más cercano sea el valor a 1, peor será la distribución del pronóstico.
- NRMSE: Normalized Root Mean Square Error (Error cuadrático medio normalizado): mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos
- RMSE: Root-Mean-Square Error (Error cuadrático medio); R: Regresión; R^2: Coeficiente de determinación

Fuente: Adaptado de Vangelis E., et al., 2017. Table 11.1.

Se probaron varios métodos dependiendo de diferentes valores para los factores de diseño, tales como estimaciones iniciales a priori de OD y tasas de penetración de vehículos equipados con Bluetooth. Los resultados del enfoque de filtrado de Kalman modificado, asumiendo una tasa de penetración de Bluetooth del 100% y

los escenarios OD previos D7 (demanda baja), D8 (demanda media) y D9 (demanda alta), se presentan en la Tabla 05 para las medidas de bondad de ajuste seleccionadas: error cuadrático medio de la raíz normalizada (NRMSE), Coeficiente U de Theil y R^2. El buen desempeño del enfoque de filtrado de Kalman modificado se refleja en un alto ajuste R^2 (superior al 85%) que se obtiene para los pares de OD generales y los niveles de demanda, pero principalmente para los flujos de OD más importantes (es decir, los de los cuartiles 4 y 3).

El ajuste de los flujos OD verdaderos frente a los estimados para todos los pares OD considerados (para el período agregado de 1 h) y para un escenario inicializado con niveles de demanda anteriores D7, D8 y D9 muestran coeficientes de determinación de la línea de regresión simple de casi el 90%.

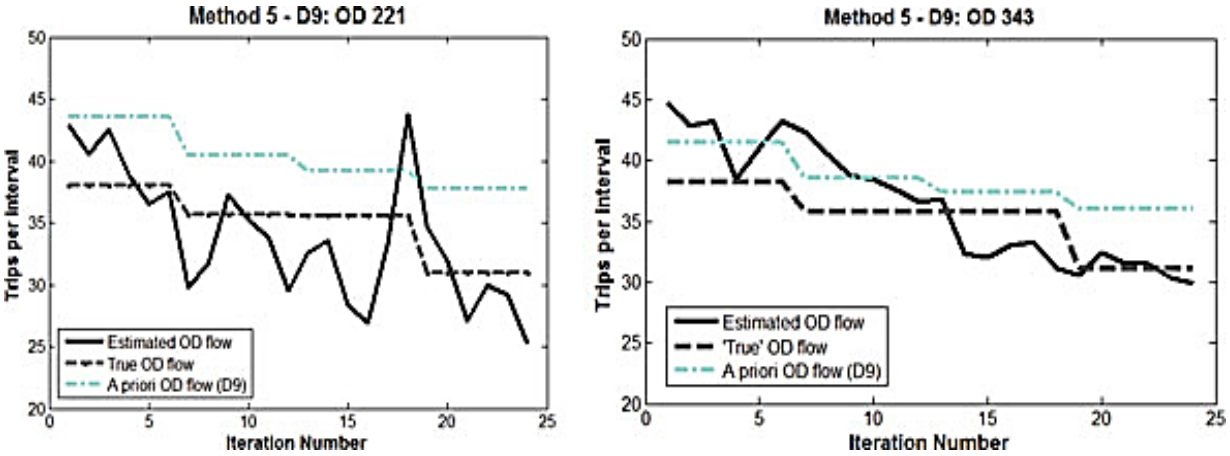
La Figura 04 presenta la evolución de los flujos OD estimados (para los pares OD 221 y 343 en la Figura 04) por intervalo de tiempo de salida para el escenario previo de alta demanda de OD (D9), demostrando también cómo el Método 5 puede recuperarse desde un punto inicial caracterizado sobreestimó el flujo de OD anterior con respecto al flujo de OD real.

En general, los resultados presentados muestran que el potencial de la información de las mediciones de tráfico avanzadas para mejorar la estimación de la demanda de OD se puede explotar por completo solo utilizando métodos de estimación de OD capaces de corregir los sesgos en el patrón de OD espacial y temporal dado por una matriz de OD anterior, especialmente en redes congestionadas. En este sentido, los experimentos computacionales presentados en este trabajo prueban la robustez y calidad de las estimaciones de OD que explotan las mediciones de AVI.

Los tiempos computacionales de menos de 2 minutos en una computadora portátil estándar y los algoritmos implementados por MATLAB[12] los hacen aplicables para operaciones en tiempo real.

[12] MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, laboratorio de matrices) es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, macOS y GNU/Linux.

Figura 4. Valores filtrados a lo largo de 1 h para el escenario anterior D9 para el enfoque de filtrado de Kalman modificado



Fuente: Vangelis E., et al., 2017. Fig. 11.4.

1.8.3 Centro de Control de Tráfico – TMC

Un Centro de Gestión del Tráfico – TMC (siglas en inglés), es un *componente* de un Sistema de Gestión Avanzado de Tráfico – ATMS (ver Tabla 02). Se encarga de recopilar información sobre la red de transporte y la combina con otros datos operativos y de control, para administrar la red y proporcionar información al viajero. El TMC comunica información relacionada con el transporte a los medios y al público usuario automotor.

Es un lugar donde las Agencias pueden coordinar sus respuestas a situaciones y condiciones de transporte. El TMC utiliza equipos de video de circuito cerrado y estaciones de conteo de tráfico en la red vial, para permitir a los tomadores de decisiones identificar y reaccionar ante un incidente de manera oportuna en función de los datos en tiempo real. También se conoce como Centro de Operaciones de Tráfico (TOC).

Tabla 2. Aplicaciones de Sistemas Inteligentes de Transporte – ITS por categorías y específicas al transporte urbano

Categoría de ITS	Aplicación específica
1. Sistema avanzado de información al viajero (ATIS)	▪ Provisión de información de tráfico en tiempo real ▪ Sistema de guía/navegación en ruta ▪ Información de estacionamiento ▪ Sistema de información de clima en la red vial
2. Sistema avanzado de gestión de transporte (ATMS)	▪ Centros de operaciones de tráfico (TOCs) ▪ Control adaptativo de semaforización. ▪ Señales de mensajes dinámicos (o señales de mensajes "variables") ▪ Semáforos en rampas (ramp metering)
3. Sistemas de fijación de precios de transporte habilitados para ITS	▪ Recolección electrónica de peajes (ETC) ▪ Pago por congestión/Pago electrónico vial (ERP) ▪ Carriles de flujo libre (HOT) ▪ Tarifas por kilómetros-vehículo viajado (VMT) ▪ Tarifas de estacionamiento variable
4. Sistema avanzado de gestión del transporte público (APTS)	▪ Información del estado en tiempo real del sistema de transporte público (p.j. Bus, Estaciones de Metro) ▪ Localización automática vehicular (AVL) ▪ Pago electrónico de tarifas (por ejemplo, Tarjetas Inteligentes)
5. Integración vehículo a infraestructura (VII) e Integración vehículo – vehículo (V2V)	▪ Sistema cooperativo de prevención de colisiones en intersecciones (CICAS) ▪ Adaptación inteligente de velocidad (ISA)

Fuente: Adaptado de Ezell S., 2010. Table 1

Las funciones de control y gestión pueden incluir lo siguiente:

- Recolección de datos para el desarrollo de planes de tiempos de semáforos y otras funciones (identificación de límites de sección de control y provisión de parámetros en los sistemas de control de tráfico).
- Desarrollo de planes de tiempos y el resto de la base de datos del sistema de control de tráfico.
- Implementación de planes de sincronización de señales, tales como:

- ✓ Tiempo fijo
- ✓ Tráfico responsivo.
- ✓ Selección de operadores de planes de tiempos basados en datos proporcionados por el sistema de control de tráfico, CCTV y otras fuentes de información.

- Implementación de información de automovilistas por medio de señales de mensajes variables, radio de asesoramiento vial, proveedores de servicios independientes, medios y sitios web.
- Gestión de incidentes en calles de superficie.

La Tabla 03, presenta las funciones típicas de un Sistema de Control de Tráfico.

Tabla 3. Funciones típicas del Sistema de Control de Tráfico

Tipo de sistema	Sistema potencial	Características especiales
Calles urbanas y sub-urbanas	▪ Intersecciones de la red vial poco espaciadas en áreas centrales de la ciudad. ▪ Sistemas arteriales ▪ Intersecciones aisladas	▪ Preferencia a red ferroviaria ▪ Preferencia a los bomberos ▪ Control de carriles ▪ Restricciones de giros en horas punta. ▪ Eventos especiales ▪ Prioridad al transporte público
Integrado	▪ Combinación de sistemas de control de calles urbanas y autopistas	▪ Sistemas de comunicaciones compatibles con el control de calles urbanas, autopistas e información al viajero.

Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Table 2-1.

Los objetivos operacionales de los sistemas de control de tráfico incluyen: hacer el mejor uso de la capacidad existente de la red vial y autopistas; así como, reducir los tiempos de viaje, sin crear impactos ambientales adversos. Controlar el movimiento de vehículos a través de intersecciones semaforizadas, *proporciona el mayor efecto sobre el flujo de tráfico en las áreas urbanas*. Las estrategias de control que se muestran en la Tabla 04, proporcionan un resumen de las características de las diferentes categorías de sistemas de control de tráfico.

La señal del semáforo afecta prácticamente a todos y en todos los días. Incluso en rutas no congestionadas, las paradas en los semáforos condicionan un viaje en una zona urbana o suburbana. Los escolares esperan obedientemente una señal del semáforo, para interrumpir el tráfico y así poder cruzar una vía concurrida. Los conductores confían la seguridad física de sus pasajeros, en la asignación del derecho de paso de una señal. La gente acepta y, en algunos casos, exige semáforos, para garantizar la seguridad y la movilidad. Los conductores generalmente, asumen que la Agencia responsable puede operar semáforos de manera eficiente; por lo que, los automovilistas generalmente reportan solo las fallas más obvias. La operación ineficiente molesta a algunos conductores, pero no produce una reacción pública fuerte. Sin embargo, las inefectividades roban silenciosamente, dinero al público usuario, en un mayor costo de combustible y tiempos de viaje más largos. Los usuarios normalmente perciben que los semáforos funcionan si se vuelven rojas y verdes; si operan de manera sub-óptima, esto se convierte en una preocupación, no en una crisis. La investigación y la aplicación demuestran, que la efectividad de las mejoras del Sistema de semáforos puede reducir:

- Demoras;
- Detenciones;
- Consumo de combustibles;
- Emisiones de contaminantes; y
- Accidentes.

La optimización sistemática de los planes de tiempos del semáforo, representa un elemento esencial y continuo de la gestión del Sistema de control de tráfico. Esta optimización es laboriosa y costosa para muchos Sistemas de control de tráfico existentes. Como resultado, la cantidad de planes de tiempo y la frecuencia de actualización de los mismos; a menudo, están limitados por los recursos disponibles para realizar estas funciones. Ciertos Sistemas de tráfico se han denominado adaptativos; es decir, tienen la capacidad de cambiar automáticamente los tiempos del semáforo, en respuesta a las variaciones en el tráfico; tanto al corto como a más largo plazo. Estos Sistemas no solo proporcionan un control más efectivo del tráfico, sino que también, requieren menos recursos humanos y financieros para actualizar la base de datos del Sistema. Sin embargo, a menudo requieren un despliegue más intenso de detectores de tráfico.

Tabla 4. Opciones de Sistemas de Control Semafórico

Categorías	Características principales	Técnica de control	Método	Aplicación
Control de intersección aislada	No considera el ajuste de tiempos de intersecciones adyacentes	Tiempo fijo (Pre-timed)	▪ Asigna derecho de paso de acuerdo con un programa prestablecido. ▪ Uso de programas computacionales para calcular los tiempos de semáforo sobre la base del promedio de la demanda de tráfico.	Intersección suficientemente aislada para no recibir influencia de pelotones de tráfico adyacentes.
		Accionado por el tráfico	▪ Ajustes del tiempo de verde de acuerdo con la demanda de tráfico medida en tiempo real por detectores en uno o más accesos de la intersección	
Coordinación con tiempo base	Coordinación basada en un tiempo común de sincronización	Coordinación de tiempo fijo	▪ Uso de programas computacionales para calcular los tiempos de semáforo sobre la base del promedio de la demanda de tráfico.	Intersecciones suficientemente cercanas para requerir coordinación
Control interconectado	Red semafórica interconectada con cables o inalámbrica Necesita equipamiento adicional en campo Descargas de planes de tráfico de un centro de gestión	Coordinación de tiempo fijo. Selección de los planes de tiempo por el operador	▪ Uso de programas computacionales para calcular los tiempos de semáforo sobre la base del promedio de la demanda de tráfico. ▪ Selección de planes de operación basados en eventos especiales o información externa de incidentes de tráfico.	▪ Coordinación de tiempo fijo usada comúnmente, donde la variación diaria no es significativa. ▪ Selección de planes de operación usada para eventos especiales.
Control de tráfico ajustado	Operación ajustada del tráfico convencional	Utiliza sensores de tráfico para proveer capacidades de ajustes	▪ Selección de planes de tiempo ajustados. ▪ Ofrece mayores planes de tiempos que un control no interconectado.	▪ Empleado para ajustar la capacidad del tráfico donde las variaciones diarias en ciertas horas resultan significativas.
Control responsivo al tráfico	Planes de tiempos generados rápida y automáticamente utilizando un sistema de sensores	Cambios del reparto dentro del ciclo. Cambios en los desfases dentro de pocos minutos.	▪ Utiliza datos de sensores de intersecciones aguas arriba para minimizar las demoras por control o el nivel de congestión.	▪ Dónde las variaciones en la demanda diaria pueden ser significativas como resultado de patrones de tráfico o eventos.
Control adaptativo al tráfico	La fase cambia basado en la predicción de mediciones de tráfico en cada acceso de la intersección	Usa cambios de fase predictivos. No usa ciclos semafóricos explícitamente definidos, repartos o desfases.	▪ Se predice el flujo en la intersección de los datos de los sensores	▪ Similar al control responsivo. También responde a la variación aleatoria de los flujos de tráfico.

Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Table 2-2.

- **Evolución del TMC**

El desarrollo de Sistemas de control de tráfico para calles urbanas, ha sido paralelo al desarrollo y uso del automóvil en los Estados Unidos. Después de la Primera Guerra Mundial, el rápido crecimiento del tráfico de automóviles, llevó a requisitos para personal especial, semáforos y Sistemas para abordar el problema. En áreas urbanas típicas, aproximadamente dos tercios de todas las millas (kilómetros) de viaje de vehículos, e incluso un mayor porcentaje de horas de viaje de vehículos, tienen lugar en instalaciones controladas por semáforos. Por lo tanto, en gran medida, la calidad de la operación de los semáforos, determina la calidad del flujo del tráfico de vehículos urbanos. Las señales de tráfico, se originaron con la tecnología del Sistema de semaforización desarrollada para ferrocarriles. En 1914, Cleveland, Ohio instaló la primera señal de tráfico eléctrica en los Estados Unidos. En 1917, Salt Lake City introdujo un Sistema de señal interconectado que involucraba el control manual de seis intersecciones como un solo Sistema. En 1922, en Houston, Texas, se controlaron 12 intersecciones como un Sistema simultáneo desde una torre de tráfico central. Este Sistema, demostró ser único en el uso de un temporizador eléctrico automático. El año 1928, vio la introducción de un Sistema de tiempo fijo flexible-progresivo. Los municipios aceptaron rápidamente estos Sistemas de Tiempo Fijo (Pretimed); y su instalación generalizada, siguió prácticamente en todas las ciudades de los EE. UU. Su éxito resultó de:

- Simplicidad (casi cualquier electricista podría entenderlos);
- Confiabilidad (los componentes resistentes resultaron en un mantenimiento mínimo); y
- Costo relativamente bajo.

Sin embargo, los primeros Sistemas de tiempo fijo, tenían flexibilidad limitada. Solo podían responder a los cambios de tráfico previstos; a través, de cambios preestablecidos en un reloj de tiempo. Pero predecir las condiciones del tráfico, resultó difícil debido a los esfuerzos de recopilación de los datos necesarios. Las Agencias, generalmente, evitaron los cambios de tiempo; debido a la dotación de personal y los recursos necesarios, para realizar los cambios en cada controlador de intersección local. Los controladores locales activados por el tráfico que utilizan

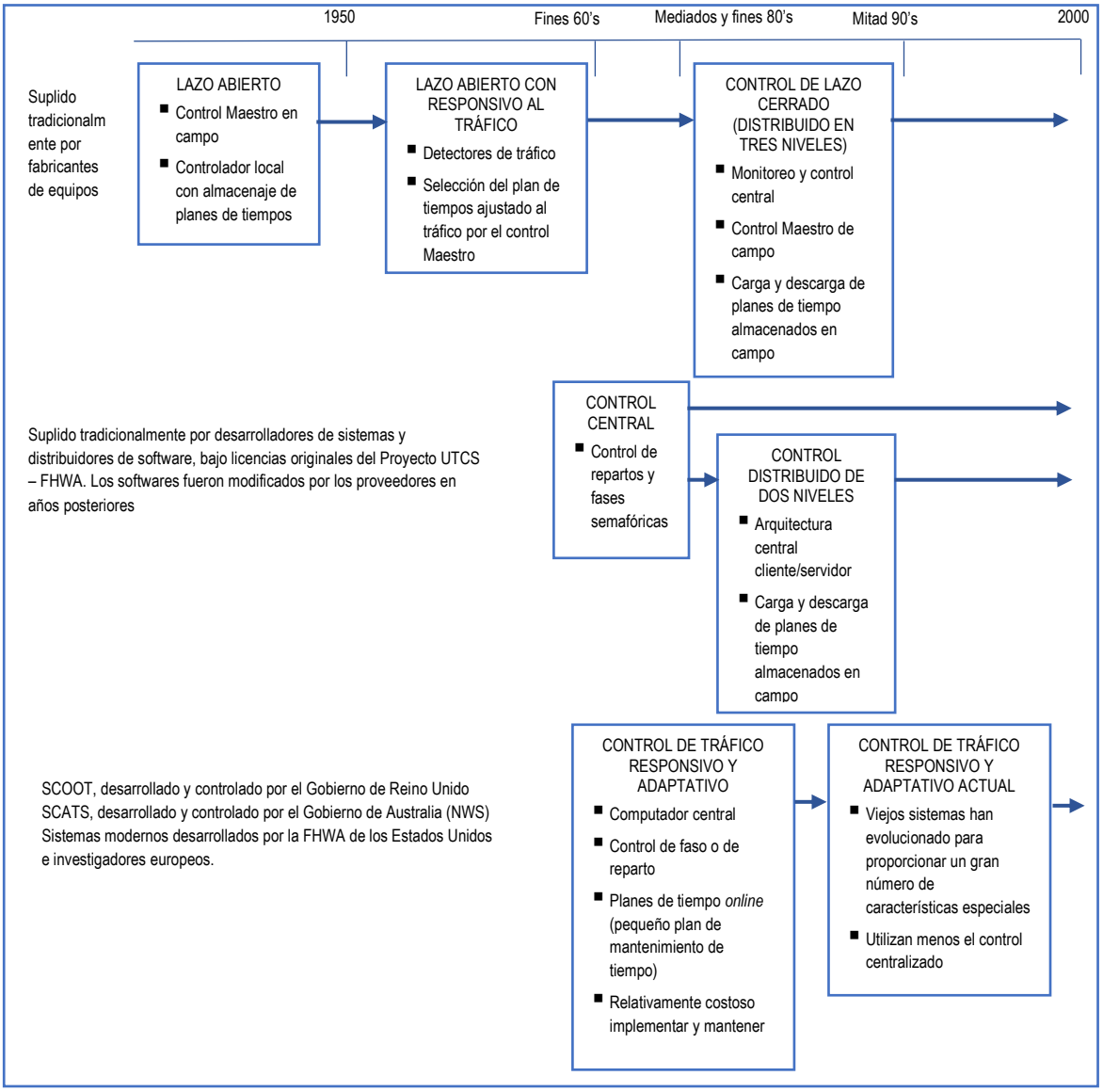
detectores de presión, estuvieron disponibles durante el período 1928-1930. Estos controladores demostraron ser un primer paso hacia el control accionado por tráfico, pero se aplicaron solo a intersecciones aisladas. En 1952, Denver, Colorado avanzó el estado de la técnica de los Sistemas de control de tráfico, mediante el desarrollo e instalación de un Sistema de control de computadora analógico. Este Sistema, aplicó algunos conceptos de control de intersección aislada accionada a redes semaforizadas. Los detectores de muestreo ingresan los datos del flujo de tráfico, y el Sistema ajustó su tiempo según la demanda en lugar de la hora del día (TOD). Más de cien Sistemas de este tipo se instalaron en los Estados Unidos en el período 1952-1962. En 1960, Toronto realizó un estudio piloto con una computadora digital, para realizar funciones de control centralizado. La cantidad de datos de tráfico disponibles de esta forma de control, resultó ser un subproducto afortunado. Si bien, la computadora utilizada para la prueba era arcaica según los estándares actuales, un IBM 650 con aproximadamente 2,000 palabras de memoria de batería, el éxito de este enfoque de Sistema de control, animó a Toronto a continuar con la implementación a gran escala. La ciudad colocó 20 intersecciones bajo control informático en 1963, y luego amplió el Sistema a 885 intersecciones en 1973. International Business Machines (IBM), comenzó un desarrollo cooperativo en 1964 con la Ciudad de San José, California, para desarrollar aún más el Sistema de control del tráfico por computadoras.

El Proyecto utilizó una computadora IBM 1710. Los conceptos de control desarrollados e implementados, demostraron ser exitosos en la reducción significativa de detenciones, demoras y accidentes. A partir de 1965, la ciudad de Wichita Falls, Texas, contrató la entrega de una computadora de control de procesos IBM 1800 para el control del tráfico. Este Sistema se puso en funcionamiento diariamente en 1966, controlando 56 intersecciones en el distrito central de negocios (CBD). Más tarde, se amplió para incluir 78 intersecciones. San José, California, poco después, hizo una transición a una computadora IBM 1800, y se instalaron Sistemas similares en Austin y Garland, Texas; Portland, Oregón; Fort Wayne, Indiana y Nueva York. En estos Sistemas, las señales del semáforo, se controlaron utilizando planes de tiempo almacenados y desarrollados apagados. En 1967, la Oficina de Carreteras Públicas, actualmente la Administración Federal de Carreteras (FHWA), comenzó a desarrollar el Proyecto de Sistema de Control de

Tráfico Urbano (UTCS). El Sistema se instaló en Washington, DC, para desarrollar, probar y evaluar estrategias avanzadas de control de tráfico. Terminado en 1972, contenía 512 detectores de vehículos cuyas salidas determinaban el tiempo del semáforo en 113 intersecciones. Se pusieron a disposición amplias capacidades de procesamiento de datos, comunicaciones y visualización para respaldar la investigación de estrategias de control de tráfico. Los esfuerzos posteriores, produjeron las versiones ampliadas y mejoradas del paquete de software que implementó estos conceptos.

La década de 1970, también fue testigo de la continua investigación y desarrollo de paquetes de software y modelos para Sistemas de control de tráfico basados en microprocesadores y computadoras digitales. El Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL) en Gran Bretaña, desarrolló el avanzado Sistema de tráfico de control centralizado, Técnica de Optimización de Split, Ciclo y Offset (SCOOT), en la década de 1970; y su implementación tuvo lugar en Glasgow y otras ciudades en la década de 1980. SCOOT, se ha instalado en varias ciudades de América del Norte, incluida Toronto, ON. Otro Sistema avanzado, el Sistema de Tráfico Adaptativo Coordinado de Sídney (SCATS), desarrollado en Australia, se ha implementado en muchas ciudades de todo el mundo. SCOOT y SCATS, iniciaron el despliegue de Sistemas de control responsivo y/o adaptativo. Las técnicas de control adaptativo, representadas por Políticas Optimizadas para el Control Adaptativo (OPAC) y RHODES, también han comenzado a implementarse. La Figura 05 resume el desarrollo histórico de los Sistemas de control de tráfico coordinados.

Figura 5. Cronología de los Sistemas de control del tráfico interconectados



Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Figure 1-2.

Los años 80 y principios de los 90, han sido testigos de una amplia aceptación e implementación de Sistemas avanzados de control y gestión de tráfico; tanto en autopistas como en calles urbanas. El uso de la computadora se ha convertido en la forma aceptada de controlar calles y autopistas, y se ha acelerado gracias a los avances revolucionarios y las reducciones de costos asociadas en informática, comunicaciones y tecnología electrónica. Los controladores de microprocesadores locales, prácticamente han eliminado las restricciones operativas impuestas previamente por la capacidad del hardware. Hoy en día, las restricciones para la

operación efectiva del Sistema, generalmente no son técnicas sino institucionales, jurisdiccionales o financieras.

La actividad actual en los Sistemas de Control y Monitoreo de Tráfico, ha avanzado más allá de la experimentación, para el despliegue de herramientas operativas efectivas. Los conceptos básicos de control, se han refinado a través de la experiencia de múltiples usuarios. Existe una red efectiva de diseñadores, fabricantes y proveedores de Sistemas, para ofrecer opciones en la selección de los mismos. La participación cooperativa de Agencias gubernamentales (federales, estatales, locales) y organizaciones comerciales y profesionales (fabricantes, Consultores), continúa en los esfuerzos de desarrollo de hardware y software. Los ejemplos principales incluyen, el desarrollo de una arquitectura abierta para el hardware y el software del controlador y el Protocolo de Comunicaciones para ITS (NTCIP), que facilita la interoperabilidad de los equipos.

La experiencia adquirida durante esta evolución, muestra que las reducciones sustanciales en los retrasos de viaje, las paradas, el consumo de combustible y las emisiones de los vehículos, pueden acumularse a partir de la efectividad del Sistema de control y la gestión agresiva de los tiempos de los semáforos. Sin embargo, en los Sistemas convencionales (no adaptativos), la realización completa de los beneficios depende de la actualización frecuente de los planes de tiempo para optimizar el flujo de tráfico. Los Sistemas de información de los conductores también se han expandido, utilizando un amplio espectro de medios que incluyen:

- Radio de avisos y señales dinámicas en autopistas y carreteras;
- Medios comerciales;
- Internet;
- Información en vehículos y pantallas; y
- Big data

- **Opciones de Sistemas de Control de Tráfico**

Los objetivos operacionales de los Sistemas de Control de Tráfico incluyen: “hacer el mejor uso de la capacidad existente de la red vial y de autopistas, y reducir los tiempos de viaje, sin crear impactos ambientales adversos”. El control del

movimiento de los vehículos, a través de intersecciones semaforizadas, proporciona el mayor efecto en el flujo de tráfico en las áreas urbanas. La Tabla 05 proporciona un resumen de las características de las diferentes categorías de Sistemas de control de tráfico.

Tabla 5. Opciones de Sistemas de Semáforos

Categorías	Características principales	Técnicas de control	Método	Aplicación
Control de intersección aislada	No considera el tiempo de intersecciones adyacentes	Tiempo fijo (Pre-timed)	▪ Asigna derecho de paso de acuerdo a una programación predeterminada ▪ Uso de modelos computacionales para calcular la demanda en períodos fuera de línea.	▪ Intersección suficientemente aislada de intersecciones adyacentes, de tal manera que los vehículos que llegan no lo hacen en pelotón. ▪ Requerimiento de tiempo inconsistentes con la necesidad de recalcularlos constantemente
		Actuado por el tráfico	Ajustes de tiempo de verde de acuerdo con la demanda real medida por detectores en uno o más accesos	
Coordinación de tiempo base	Coordinación basada en un tiempo de sincronización común.	Coordinación de tiempo fijo	Uso de modelos computacionales para calcular la demanda en períodos fuera de línea.	Intersecciones lo suficientemente cercadas para requerir coordinación
Control interconectado	▪ Intersecciones interconectadas en red usando cables o tecnología inalámbrica.	▪ Coordinación de tiempo fijo. ▪ Selección de operadores de planes de tiempos	▪ Uso de modelos computacionales para calcular la demanda en períodos fuera de línea.	▪ Coordinación de tiempo usada comúnmente, día a día durante la semana, ante

	▪ Equipamiento provisto en campo. ▪ Descarga de planes de tiempo de un centro de gestión de tráfico.		▪ Selección de operación basada en eventos especiales o información externa de incidentes en el tráfico.	variaciones no excesivas de la demanda. ▪ Selección de operación basada en eventos especiales.
Control ajustado al tráfico	Operación ajustada al tráfico convencional	Uso de sensores para proveer capacidad de ajuste por el tráfico	▪ Selección de planes de tiempo ajustados al tráfico. ▪ Planes de tiempo provistos a menudo por control interconectado	Capacidad de ajuste del tráfico donde las variaciones de la demanda son diarias y significativas en un lapso de tiempo en particular.
Control de tráfico responsivo	Planes de tiempos generados rápida y automáticamente usando sistemas de sensores	▪ Cambio en los repartos durante el ciclo. ▪ Cambio en los desfases del ciclo en pocos minutos	Uso de datos de sensores aguas arriba para optimizar la función objetivo como las demoras o el nivel de control de la congestión	Dónde las variaciones en la demanda diaria sea significativa o cuando resulte de eventos inusuales en el comportamiento del tráfico.
Control de tráfico adaptativo	Cambio de fase basado en la predicción del tráfico medido en cada aproximación semaforizada.	▪ Uso de datos predictivos de cambio de fase. ▪ No utiliza explícitamente el ciclo definido, repartos de tiempos y fases	Predice el flujo vehicular en la intersección de los datos del sensor.	Similar al control de tráfico responsivo. También responde a las variaciones aleatorias del flujo de tráfico.

Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Table 2-2.

- **Arquitecturas e Implementación Física del Sistema de Control de Tráfico**

Este punto se concentra en las arquitecturas y la implementación física de las categorías mostradas en la Tabla 05 anterior. La Tabla 06, identifica brevemente estas categorías y sus principales características de arquitectura.

Tabla 6. Niveles de rendimiento de los Sistemas de Control Semafórico del Tráfico

Categoría del sistema de operación	Características de la arquitectura
Control adaptativo al tráfico *Ciclo libre, reacción rápida a las condiciones de tráfico sensadas*	▪ Control distribuido ▪ Uno o más detectores por acceso semaforizado
Control responsivo al tráfico *Rápida reacción a las condiciones de tráfico sensadas*	▪ Control central (SCOOT) o control distribuido (SCATS) ▪ Uno o más detectores por acceso semaforizado
Control ajustado al tráfico ▪ *Control ajustado al tráfico de área* ▪ *Control de intersección crítica (solo arquitectura centralizada)* ▪ *Estrategias de intersecciones locales*	▪ Interconexión requerida ▪ Numero moderado de sistemas de detectores requeridos para la selección del plan de tiempo del tráfico responsivo ▪ Tres niveles de cálculo distribuidos (lazo cerrado) o ▪ Dos niveles de cálculo distribuidos o ▪ Control central
Control interconectado ▪ *hora del día o planes de tiempo seleccionados por el operador* ▪ *Estrategias de intersecciones locales*	▪ Interconexión requerida ▪ No requiere sistema de detectores para la selección del plan de tiempos (hora del día o sólo seleccionados por el operador) ▪ Tres niveles de cálculo distribuidos (lazo cerrado) o ▪ Dos niveles de cálculo distribuidos o ▪ Control central
Coordinación de tiempo base ▪ *Planes de tiempo diarios* ▪ *Estrategias de intersecciones locales*	Provee coordinación básica ▪ No requiere interconexión
Semáforos no coordinados	▪ No existe coordinación entre semáforos

Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Table 8-1.

- *Arquitectura para un Sistema de control de tráfico coordinado convencional*

Los planes de tiempos, para los cuatro niveles inferiores de la Tabla 06, se almacenan en la base de datos del controlador. El control interconectado y el control de tráfico ajustado, requieren interconexión por medio de técnicas alámbricas o inalámbricas; y proporcionan, la capacidad de operación a la hora del día y la selección del operador de los planes de tiempos del semáforo. Las siguientes variaciones de arquitectura, se pueden usar para implementar estos dos niveles:

- Arquitecturas de nivel de computación distribuida en tres (también conocidos como Sistemas de "circuito cerrado";
- Arquitectura de nivel de computación distribuida en dos; y
- Arquitectura de control central.

- *Arquitectura de nivel de computación distribuida en tres*

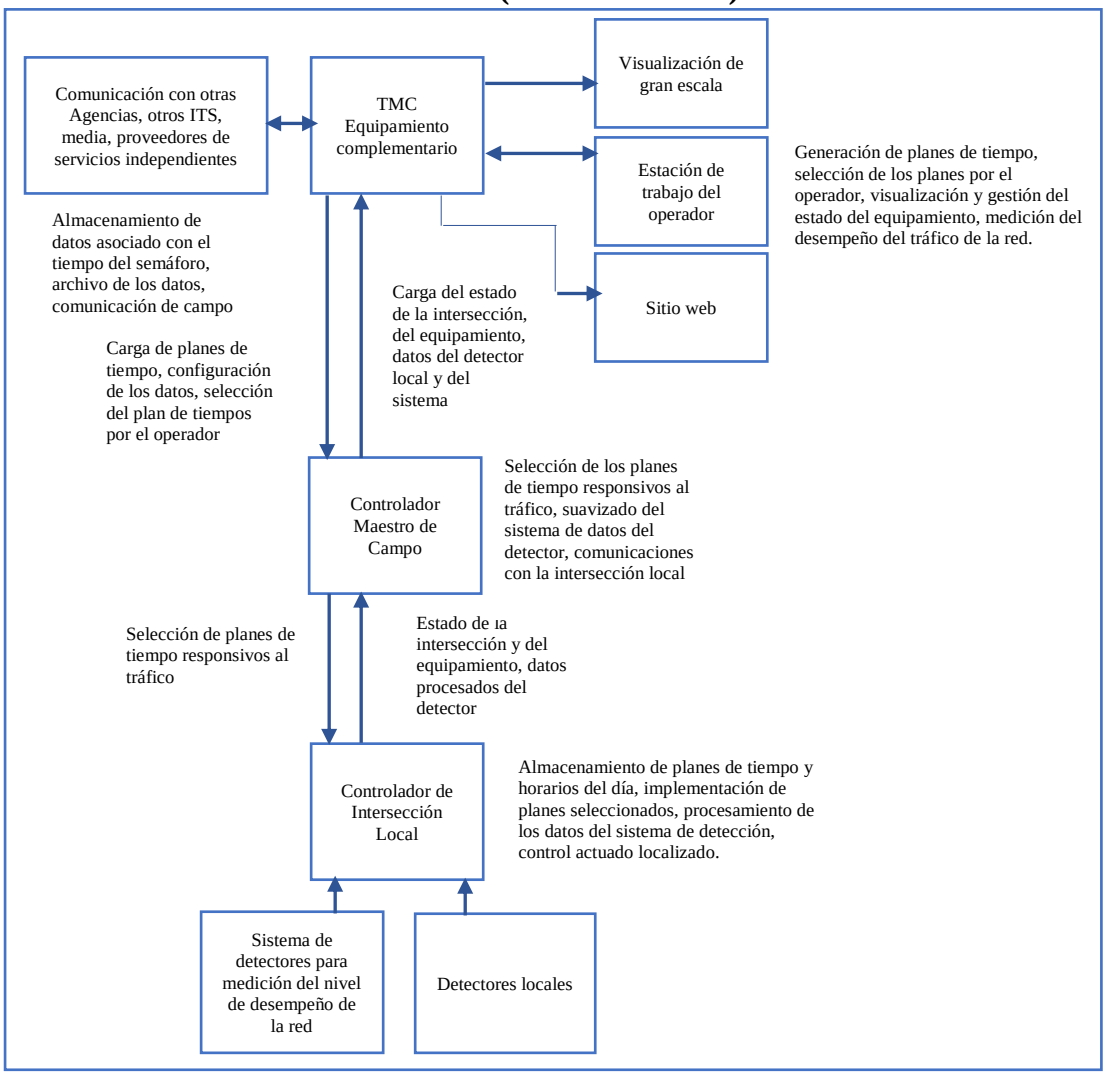
La Figura 06, muestra cómo las funciones de computación, control y equipamiento, se distribuyen entre los tres niveles. El complemento de equipos del TMC, consta de: servidores, equipos de comunicaciones, redes de área local y equipos periféricos, como impresoras. La base de datos del Sistema, se almacena en los servidores y se descarga en el controlador maestro de campo; y luego en los controladores de intersecciones locales. La arquitectura, contiene uno o más controladores maestros de campo. Estas unidades pueden estar ubicadas en gabinetes de control en el campo o pueden estar ubicadas en el TMC. Su función es desglosar la información del TMC, en los canales de comunicación apropiados para cada controlador de intersección local; y reunir los datos de estos controladores, en un flujo de información para transmitirlos al TMC. En el caso de que el Sistema se ajuste al tráfico (adaptativo o responsivo), los datos de los detectores del Sistema de los controladores de campo locales, se procesan en el controlador maestro de campo y se usan para seleccionar el plan de tiempo apropiado.

El controlador de intersección local, controla los semáforos. Almacena la biblioteca de planes de tiempo disponibles para el control e implementa el plan de tiempo seleccionado (la información para la selección de planes de tiempo de control

sensibles al tráfico, se origina en el controlador maestro de campo y la información para la selección del operador se origina en el TMC). El control de la hora del día, utiliza programas descargados desde el TMC y almacenados en el controlador de intersección local.

El controlador de intersección local, procesa previamente los datos del detector del Sistema en parámetros de: volumen y ocupación, que se cargan en los niveles más altos en intervalos que pueden variar desde varios segundos hasta un minuto. Sobre la base de los datos recibidos de los detectores locales, el controlador local termina las fases activadas en el momento adecuado. Los Sistemas de tres niveles, son a menudo proporcionados por proveedores de equipos de semáforos.

Figura 6. Arquitectura típica para un Sistema de cómputo distribuido de tres niveles (circuito cerrado)



Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Figure 2-2.

- *Arquitectura de nivel de computación distribuida en dos*

Las funciones para esta arquitectura, son idénticas a las identificadas para arquitectura de nivel de cómputo distribuido en tres, discutidas anteriormente; sin embargo, todas las funciones realizadas por el controlador maestro de campo son realizadas por el equipo complementario del TMC. Las funciones del controlador de campo local permanecen sin cambios. Los proveedores de software de Sistemas de tráfico a menudo proporcionan Sistemas de dos niveles.

- *Arquitectura de control central*

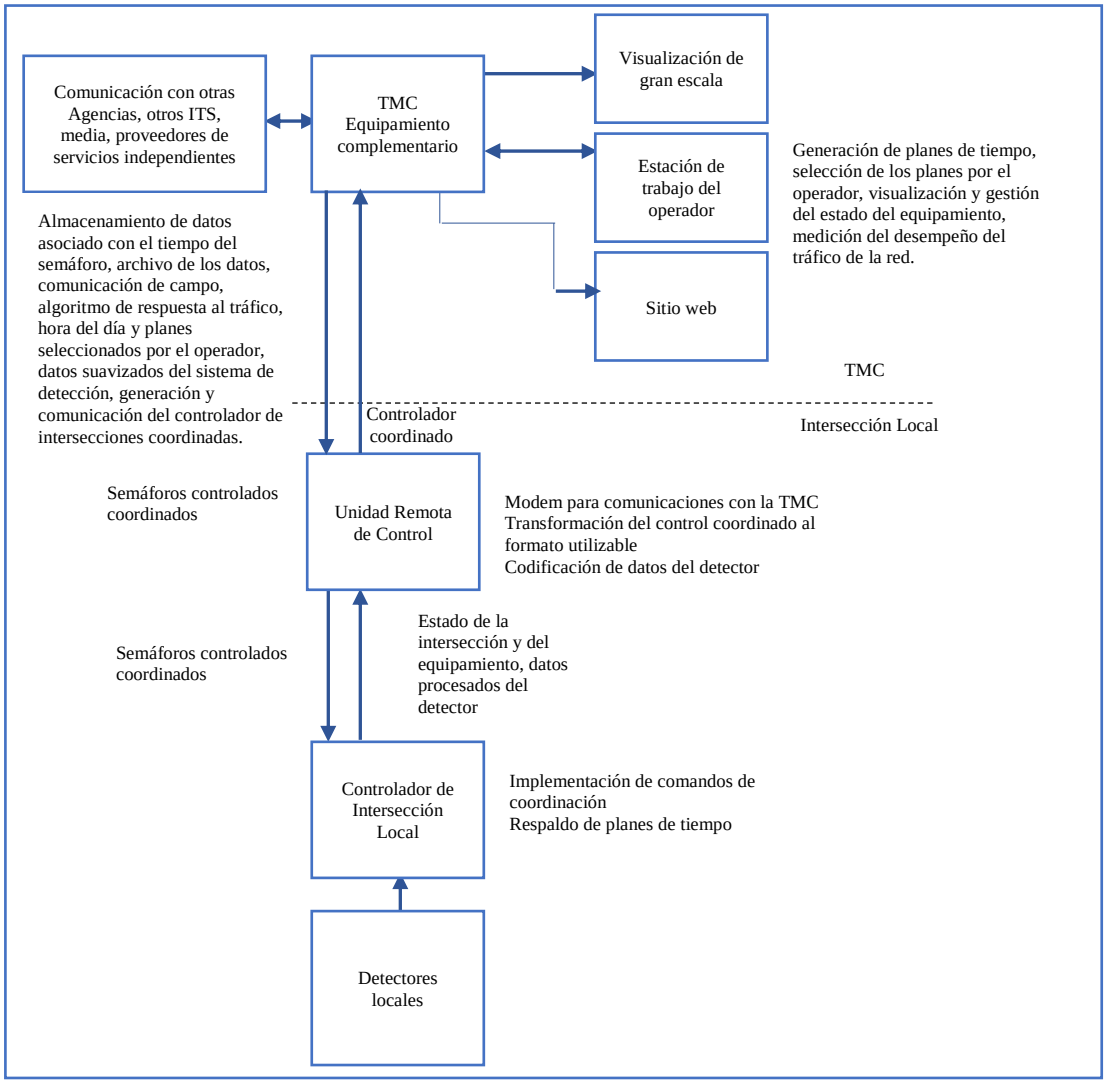
La Figura 07, muestra el flujo de la señal para esta arquitectura; que, actualmente, se usa con menos frecuencia que en el pasado. Mientras que el TMC realiza todas las funciones de cálculo como para las arquitecturas descritas anteriormente, también realiza las siguientes funciones principales:

- Procesa y suaviza los datos del detector del Sistema;
- Utiliza los datos del detector del Sistema para seleccionar planes de tiempo, basados en un algoritmo de control sensible al tráfico; y
- Convierte el plan de tiempo, en comandos de coordinación del controlador y proporciona estos comandos al controlador de campo en el momento preciso en el ciclo de control del semáforo.

Se puede utilizar una Unidad de Comunicación Remota (RCU) o, en algunos casos, una Unidad de Comunicación Remota Inteligente (IRCU); para establecer la comunicación entre el TMC y el controlador de intersección local. Sus funciones de procesamiento de información son generalmente mínimas, y sirven principalmente para hacer coincidir las interfaces y protocolos requeridos por el controlador de campo, con los utilizados para la comunicación con el TMC. En condiciones normales, las funciones de cálculo en el controlador de intersección local, son mínimas. Los comandos del TMC, en el momento preciso en el ciclo del semáforo, terminan el intervalo verde para cada fase. La indicación del estado del intervalo verde, se transmite al TMC para fines de monitoreo.

Los planes de tiempo de respaldo, también se almacenan en el controlador de intersección local, que se utilizará en caso de que el TMC falle o se pierda la comunicación. Como esta arquitectura controla directamente las fases (o, en algunos casos, los intervalos) del ciclo del semáforo desde el TMC; puede, en principio, facilitar el uso de estrategias de control, que pueden no estar basadas en el uso de planes de tiempo almacenados, como ciertos tipos de estrategias de prioridad del transporte público.

Figura 7. Disposición típica para la arquitectura de control central



Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Figure 2-3.

- **Sistemas de tráfico adaptativo y responsivo**

Esta sección analiza los aspectos físicos de los Sistemas representativos de control adaptativo; así como, algunas de las pruebas de rendimiento. Estos Sistemas representan el mayor número de Sistemas actualmente en uso en los Estados Unidos. Los planes de tiempo para estos Sistemas, se almacenan en el controlador local, y pueden seleccionarse desde el TMC o por un controlador maestro de campo de las siguientes maneras:

- Programa del horario del día;
- El operador; o
- Un algoritmo sensible al tráfico. Los algoritmos que responden al tráfico, seleccionan planes de tiempo basados en datos de tráfico recibidos en tiempo real. Los tiempos de respuesta, son generalmente del orden de unos pocos minutos, y estos planes de tiempo generalmente, se emplean durante un período de tiempo significativo (que suele exceder de media hora); hasta que sucede una “llamada” o petición de derecho de paso de tráfico.

Dado que, la intención de los Sistemas sensibles y adaptables al tráfico, es responder rápidamente a los cambios en el flujo, mediante el análisis medido de los vehículos en sentido aguas arriba; la información requerida del ciclo (desde el TMC o en algunos casos desde las intersecciones adyacentes), debe procesarse adecuadamente por el software del controlador.

La implementación más intensiva de detectores de tráfico, generalmente se requiere para Sistemas adaptativos en comparación con los Sistemas convencionales que responden al tráfico. Se ha informado de una amplia gama de mejoras de rendimiento en la literatura de estos Sistemas. Si bien, las técnicas de prueba varían, la línea de base para estas pruebas, generalmente ha sido de Sistemas de tiempo fijo; con una variación considerable en la calidad de los planes a la hora del día. La Tabla 07, proporciona una muestra representativa de los resultados obtenidos de esta manera. Los mayores beneficios se producen para aquellas situaciones, donde el tráfico experimenta una variación significativa con respecto a un plan de tiempo fijo. Los ejemplos incluyen eventos especiales y arteriales que

apoyan el desvío de autopistas durante incidentes. La Tabla 08, identifica algunas ventajas y desventajas de los Sistemas adaptables y sensibles al tráfico.

Tabla 7. Resultados representativos de las pruebas de desempeño

Algoritmo de control adaptativo	Test de localización	Resultados
OPAC	Virginia del Norte	5 – 6% mejoras en paradas y demoras
SCATS	Condado de Oakland, Michigan	Reducción de la demora en un promedio de 7.8%
	Newark, Delaware	Reducción del tiempo de viaje en más del 25%
SCOOT	Minneapolis, Minnesota	Reducción de la demora en más del 19% durante eventos especiales
	Toronto, Ontario	Disminución del tiempo de viaje en 8%, y de la demora en 17%
	Durban, África del Sur	7% de reducción del tiempo de viaje

Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Table 8-3.

Tabla 8. Ventajas y desventajas de los Sistemas de control sensible al tráfico y adaptable al tráfico

Ventajas
▪ Reducción significativa de las paradas, demoras y emisiones comparadas con los sistemas de tiempo fijo. ▪ No necesita actualización periódica de los planes de tiempos semafóricos.
Desventajas
▪ Elevados costos iniciales tanto para el equipamiento de campo como para el centro de gestión del tráfico. Altos costos de mantenimiento de los componentes de campo. ▪ Mayor dificultad de implementación inicial y el proceso de calibración del sistema. Es muy especializado.

Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Table 8-4.

- **Selección de un Sistema**

En los últimos años, ha aumentado dramáticamente, el interés en aplicar técnicas de Ingeniería de Sistemas a ITS. Gordon proporciona una visión general de cómo los procesos de ingeniería de Sistemas se han aplicado a los Sistemas de semáforos; y propone una serie de referencias para estos procesos. Un proceso de selección de

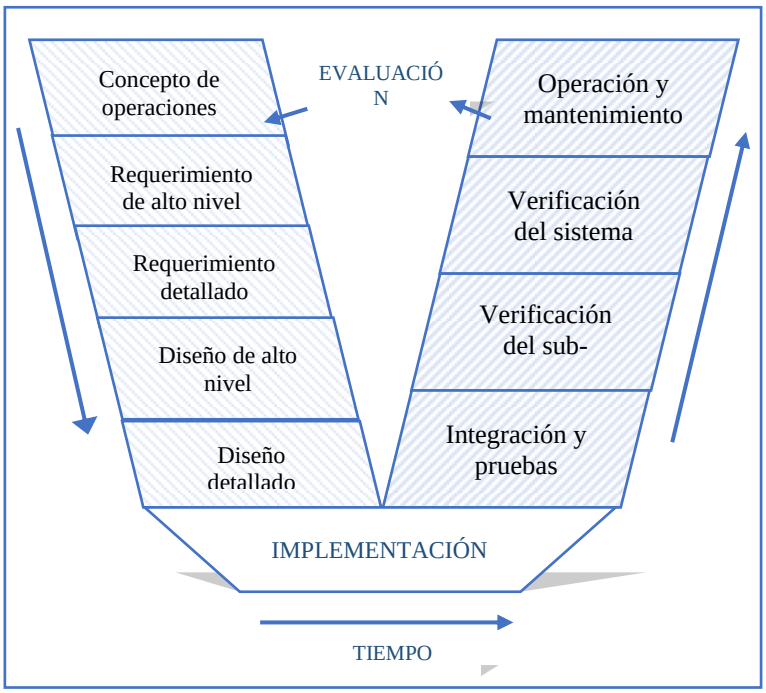
un Sistema, fomenta la consideración objetiva de alternativas de una manera estructurada, en lugar de subjetiva. Además, el enfoque de decisión estructurada, puede generar un sentido de compromiso con la elección entre las partes interesadas del Sistema, incluyendo:

- Agencias participantes;
- Ingenieros de Sistemas de tráfico; y
- El público que conduce.

- *Ingeniería y proceso de selección del Sistema*

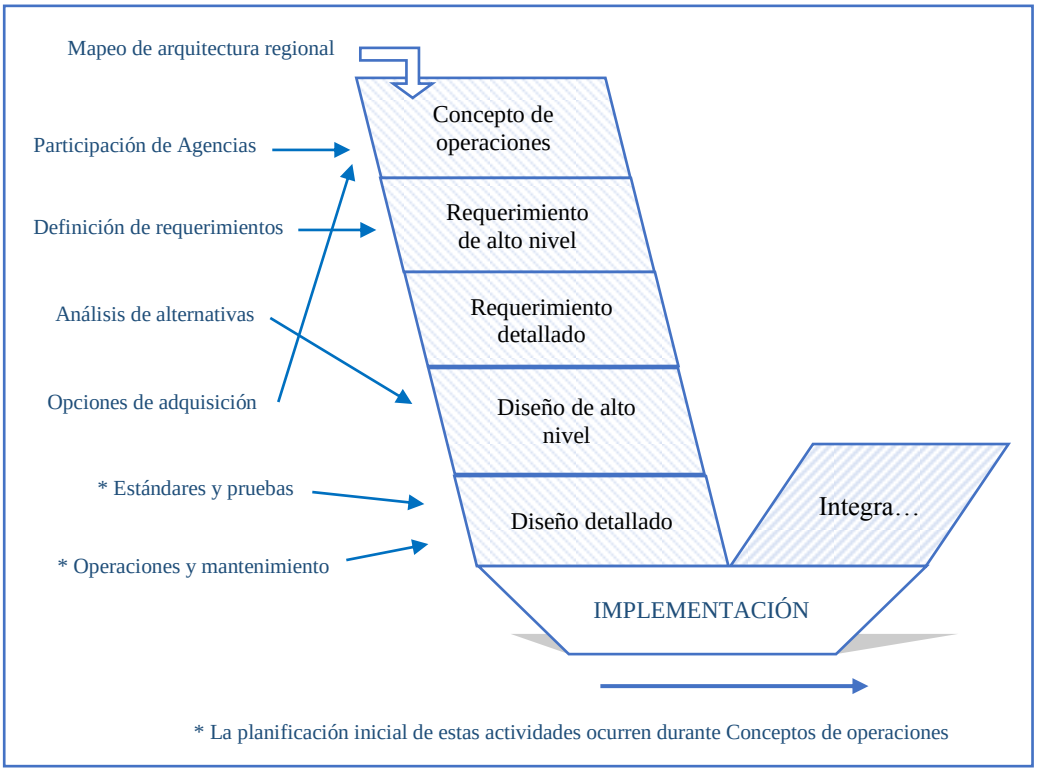
La selección del Sistema, comprende los tres primeros pasos en la representación en "V" del *Ciclo de Vida de la Ingeniería de Sistemas* que se muestra en la Figura 08. La mayoría de los Sistemas de semáforos instalados, se basan en gran medida, en el software existente de los proveedores. Los controladores de tráfico se basan, de manera similar, en equipos y software existentes. Se pueden hacer modificaciones para incorporar funciones especiales, las interfaces y las transferencias de datos, que pueden ser revisadas por el Proyecto; según el diagrama que se muestra en la Figura 09.

Figura 8. Representación del ciclo de vida de la Ingeniería de Sistemas



Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Figure 11-2.

Figura 9. Relación de las prácticas de Ingeniería de Sistemas identificadas en la parte de evaluación del ciclo de vida



Fuente: Adaptado de FHWA 2005. Figure 11-3.

- **Comunicaciones Físicas para el TMC**

De acuerdo a lo señalado en el punto anterior, para administrar mejor y aumentar la efectividad del flujo de tráfico en calles y autopistas, las Agencias de Transporte dependen cada vez más de los sistemas computarizados de control de tráfico. Estos sistemas avanzados de gestión de tráfico también forman la infraestructura para los futuros *sistemas de autopistas para vehículos inteligentes (IVHS)*, que prometen aumentar en gran medida la capacidad de las vías y mejorar la seguridad. El sistema de comunicaciones funciona como la columna vertebral del sistema de control de tráfico, para transferir información entre los componentes del sistema en forma de:

- Comandos a los distintos componentes instalados en campo.
- Datos de sensores del sistema, y
- Verificaciones de estado del equipo de campo, para detectar fallas de funcionamiento y efectuar reparaciones más rápidas.

El sistema de comunicaciones, generalmente, es el elemento más crítico y costoso de un sistema de control de tráfico/ IVHS. Por lo tanto, el diseño, la implementación y el funcionamiento exitosos del sistema de comunicaciones, se vuelven clave para la efectividad del sistema de control de tráfico en general. Los Ingenieros de Transporte deben poder planificar, seleccionar, diseñar, implementar, operar y mantener el sistema de comunicaciones. El profesional del transporte en ejercicio, debe estar familiarizado con las tecnologías de comunicación y las arquitecturas de sistemas existentes; así como, con los avances tecnológicos y la tecnología emergente. Este punto ayudará al usuario y al lector a comprender los principios de comunicación y servirá como guía para los procesos de toma de decisiones para seleccionar el sistema de comunicación. Se presentan tres grupos principales de materias:

- *Fundamentos de la comunicación.*
- *Requerimientos de comunicaciones de control de tráfico.*
- *Tecnología de comunicaciones de sistemas de control de tráfico.*

- ***Fundamentos de la comunicación***

El control de tráfico efectivo, requiere la coordinación de elementos del sistema que se encuentran ampliamente dispersos. Para proporcionar una coordinación efectiva, un sistema de comunicaciones debe:

- Transferir información de los componentes del campo al centro de operaciones de tráfico, y
- Transmitir respuestas y comandos a varios componentes de campo.

Para los no especialistas, los sistemas de comunicación pueden parecer sofisticados y complejos. Sin embargo, la comprensión de los fundamentos básicos permitirá al Profesional del Transporte, utilizar procesos técnicos para la toma de decisiones. A su vez, esto conducirá al diseño y adquisición de sistemas de comunicaciones de datos fiables y rentables para el control del tráfico. Las comunicaciones, como otras disciplinas, tienen su propio lenguaje, terminología y jerga. El Profesional del Transporte debe recibir asesoramiento permanente del Ingeniero de Telecomunicaciones, para adquirir cierta fluidez en este idioma antes de realizar el análisis para la toma de decisiones. Él o ella deben entender, al menos, los siguientes conceptos:

- Sistema de comunicaciones.
- Información
- Modulación
- Enlace o canal de transmisión.
- Detección y control de errores.
- Transmisión de datos y control de enlace.

La comunicación se refiere a la transferencia de información entre ubicaciones. Para comunicarse en un sistema de control de tráfico, se requieren estos elementos:

- Una fuente de información o transmisor.
- Un destino o receptor.
- Una ruta llamada enlace de transmisión o canal.
- Un medio de comunicación para proporcionar la ruta.

La Figura 10 ilustra los elementos básicos de un sistema de comunicación para el control del tráfico. Para simplificar, la figura muestra solo un flujo de información unidireccional desde el origen hasta el destino. En los sistemas de control de tráfico, la computadora del centro de operaciones, representa una fuente que transmite información a un dispositivo de campo, como un controlador maestro, un detector, un controlador de intersección o una señal de mensaje variable. La información viaja desde una fuente a un destino, a través de un enlace o canal y por un medio como:

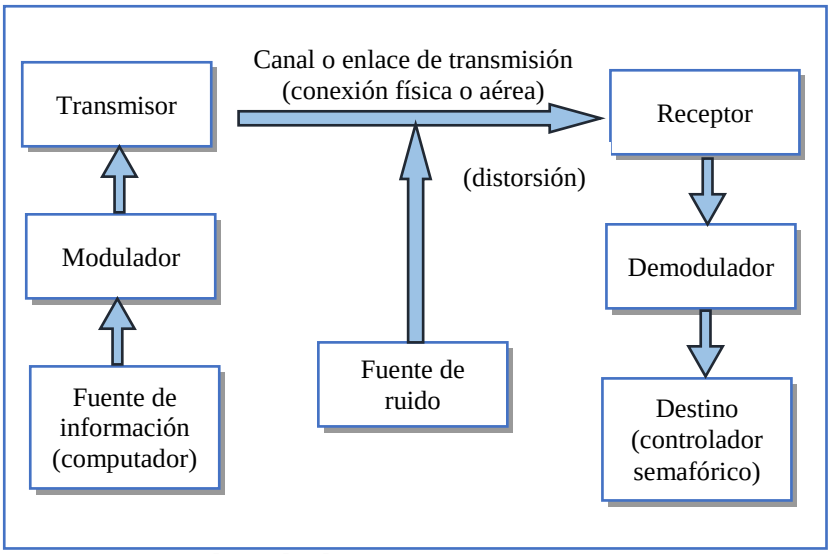
- Cable de línea fija o
- Una vía aérea inalámbrica.

Para transmitir información de manera eficiente a través de un canal, la mayoría de los sistemas de comunicación usan algún tipo de modulación. Un modulador convierte la información en una señal, mientras que un demodulador convierte la señal recibida, de nuevo en una forma adecuada para su uso en el destino. Las señales se deterioran durante la transmisión. Esto resulta de:

- Atenuación de la señal (debilitamiento) sobre la ruta de transmisión,
- Distorsión en el sistema de comunicación, y/o,

- Ingreso de señales no deseadas (ruido) desde una fuente externa. El ruido y la distorsión pueden introducir errores en la información transmitida o incluso destruirla.

Figura 10. Sistemas básicos de comunicaciones



Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Figure 2-1.

A través del medio de comunicación, el centro de control de tráfico transmite y recibe información de:

- Controladores de tráfico locales en campo
- Controladores maestros en campo; que, a su vez, se comunican con los controladores del tráfico local

El sistema de comunicaciones debe interactuar con todos los tipos de controladores locales presentes en el sistema, incluyendo:

- Electromecánica
- Electrónica de tiempo fijo (*pre-timed*) y accionada (*actuated*).
- Controladores de tráfico avanzados

Para establecer un sistema de comunicaciones compatible, el Ingeniero de Telecomunicaciones debe comprender los siguientes elementos principales del sistema y su capacidad para funcionar juntos:

- Centro de operaciones de tráfico y controlador maestro de campo
- Medio de comunicación

- Controladores locales
- Señales de mensajes variables (VMS)
- Dispositivos de detección

El Profesional también debe comprender, el funcionamiento de todos los tipos de controladores locales y su interacción con los medios de comunicación disponibles para su selección. En ese sentido, se describe las interfaces de control físico proporcionadas por los controladores de tráfico y otros equipos de campo; y explica las formas en que los equipos de comunicación interactúan electrónicamente con estos dispositivos. Asimismo, también se explora, la relación del medio de transmisión y el ancho de la banda del canal con:

- Protocolos de comunicación e interfaces
- El tipo de controlador local.
- El tipo de campo maestro, y
- Otros equipos de campo.

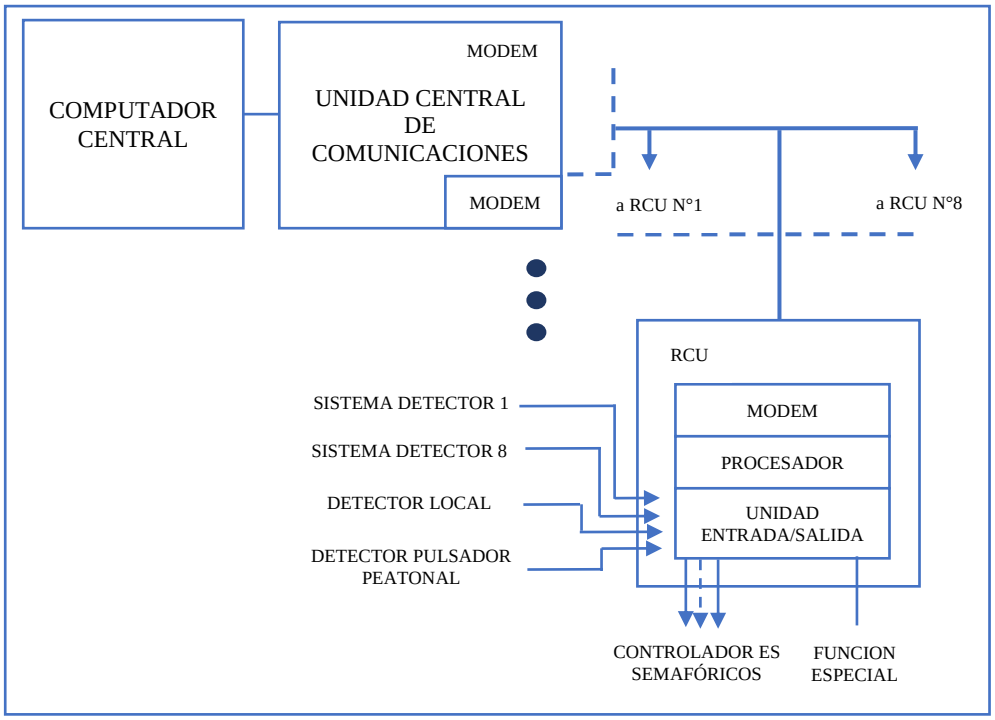
- ***Requerimientos de comunicación para TMCs***

Un Sistema de Control de Tráfico, debe comunicar todos los comandos en tiempo real necesarios para ejecutar funciones y transmitir información entre el controlador de campo y el maestro de campo o centro de operaciones de tráfico. Esta información incluye: estados de señal, modos de controlador, estado del equipo y datos del detector. Además, el sistema puede comunicar ciertos parámetros de la base de datos al campo (descarga) o desde el campo al centro de control (carga). Dependiendo del diseño del sistema, puede ordenar directamente el tiempo de la señal del semáforo o seleccionar; mediante un comando en tiempo real, un plan de tiempos almacenado en la base de datos del controlador de campo. Los requisitos para la comunicación de señales de TV difieren significativamente de los requisitos de comunicación de datos. Los sistemas con TV requieren mayores anchos de banda y, si se transmiten digitalmente, mayores tasas de señal o de bits.

- *Requerimientos para comunicación de data*

- Ciclos de sondeo cortos y capacidad de almacenamiento de campo limitada
  Muchos sistemas operativos actuales usan ciclos de sondeo (*polling cycles*) en el rango de 0.5 a 2 segundos. En estos sistemas, la unidad de comunicación de campo o el controlador, requieren un nivel modesto de capacidad de procesamiento de datos. El sistema de comunicación y la codificación de datos para el *Sistema de Control de Tráfico de Boston, MA (BTCS),* ejemplifican la efectividad de este enfoque. Como un sistema UTCS típico, BTCS maneja los controladores de tiempos fijos y actuados. La Figura 11, muestra un diagrama de bloques general de las partes del sistema relacionadas con las comunicaciones. Las características principales incluyen:
- Cada flujo de datos y canal de módem en la Unidad Central de Comunicaciones (CCU), puede atender hasta ocho (8) intersecciones semaforizadas.
- Cada Unidad de Comunicación de Campo Remota (RCU), contiene una dirección separada y responde sólo al mensaje asociado con esa dirección y destinado a ese sitio.
- Después de recibir un mensaje, la RCU proporciona señales a los dispositivos de campo, como el controlador, y transmite datos sobre el estado de sus dispositivos conectados a la CCU.
- Uno o más bits en una posición fija, en el formato de mensaje en serie, representa cada entrada y salida de un dispositivo de campo.
- En el instante apropiado, una señal cambia el estado del controlador a la siguiente fase o intervalo de tiempo.

Figura 11. Plan de comunicación para el Sistema de Control de Tráfico de Boston



Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Figure 4-2.

Como se muestra en la Figura 11, una parte de la RCU convierte estos bits de mensaje en señales de salida discretas o lee señales de entrada discretas de dispositivos de campo. El formato de datos, acomoda el número máximo de entradas posiblemente presentes en cada ubicación de campo. Todas las ubicaciones de campo utilizan esta estructura fija, independientemente de la cantidad de dispositivos de campo realmente presentes; por lo tanto, parte de la capacidad de comunicación permanece sin usar. Los sistemas de semaforización y vigilancia de autopistas en los Estados Unidos, han utilizado este formato ampliamente.

Las Tablas 09 y 10, muestran la estructura del formato de datos para las señales de comando de la CCU en el centro de operaciones de tráfico BTCS, a la RCU de intersección y las señales de respuesta de la RCU a la CCU. Las Tablas 11 y 12, definen los símbolos utilizados. En este sistema, la RCU puede:

- Acomodar controladores de tiempo fijo.
- Informar sobre muchos estados del controlador y actuaciones del detector local; así como, funciones especiales de control.

Cada byte contiene ocho (8) bits de información, así como un bit de inicio y dos bits de parada (no mostrados). El sistema utiliza el último byte de los mensajes salientes y entrantes para fines de control de errores.

Tabla 9. Estructuras de Formato de Datos, Reloj de Comentarios CCU a RCU, del Sistema de Control de Tráfico de Boston

Byte 1	FO1	HOLD	DIAL REAL	HOL	0	ADDR3	ADDR2	ADDR1
Byte 2	SP1	SF3	SF2	SF1	CALL ALL	PED CALL	FLASH	O2
Byte 3	SP7	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	CALL FREE	PHASE OMIT
Byte 4	CK8	CK7	CK6	CK5	CK4	CK3	CK2	CK1

Fuente: FHWA-SA-93-052. Figure 4-3.

Tabla 10. Estructura del Formato de Datos, Bloque de Respuesta de RDU a CCU, del Sistema de Control de Tráfico de Boston

	7	**6**	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**	**0**
Byte 1	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
Byte 2	SP2	SP1	CONT REP	PE	SYS FSH	FSH	CONF MON	DOOR
Byte 3	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Byte 4	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Byte 5	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Byte 6	O1	V1	O2	V2	O3	V3	O4	V4
Byte 7	O5	V5	O6	V6	O7	V7	O8	V8
Byte 8	CK8	CK7	CK6	CK5	CK4	CK3	CK2	CK1

Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Figure 4-4.

Tabla 11. Comandos del Centro de Operaciones de Tráfico para la intersección

FO	Apagado forzoso del semáforo para el anillo en curso
HOLD	Mantener en fase coordinada
DIAL REL	Liberación del dial
HOLD	Mantener el controlador en línea (bajo control computacional)
ADDR	Dirección de 3 bits para identificar el controlador en línea
SP	Economizar
SF	Función especial
CALL ALL	Llamar a todas las fases
PED CALL	Función de llamado a fase peatonal en las fases activas
FLASH	Controlador local en "flash"
CALL FREE	Desactivar la coordinación semafórica (devolver el control local)
PHASE OMIT	Omitir fases activas
CK	Bit de comprobación para revisión y control de errores

Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Table 4-2.

Tabla 12. Transferencia de Datos de Campo al Centro de Operaciones de Tráfico

G	Fase del semáforo en verde
SP	Economizar
CON REP	Reparar el controlador (poner el controlador local en línea)
PE	Preferencia
SYS FSH	Transferir a "flash" en el momento apropiado del ciclo
FSH	Transferir a "flash"
CONF MON	Activar el monitor de conflictos
DOOR	Abrir la puerta del gabinete de controlador
C	Bit de chequeo – llamar en la fase
DOOR	Detector vehicular actuado local
P	Detector peatonal actuado local
O	Bit del detector vehicular que indica sobre saturación
V	Cambio de estado del detector local
CK	Bit de comprobación para revisión y control de errores

Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Table 4-3.

La transmisión de datos de ocupación de detectores y detectores dobles (trampa de velocidad) para sistemas de autopistas, demuestra la carga de comunicación individual más alta para sistemas de este tipo. Por ejemplo, si el procesador local interroga a un detector cada 1/60 de segundo, y si la computadora central sondea al

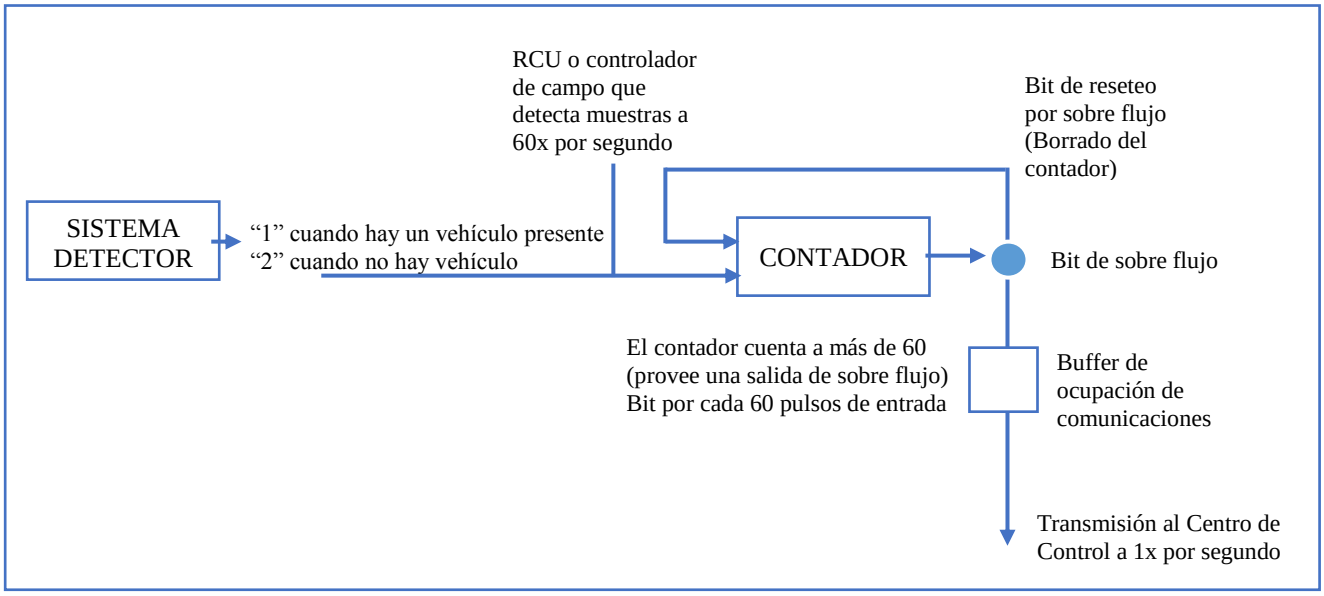
procesador local una vez por segundo, el sistema debe transmitir seis (6) bits cada segundo al Centro de Control; ya que, 6 bits pueden representar a 64 muestras de información de presencia o ausencia del vehículo. Si cada controlador da servicio a varios detectores y/o trampas de velocidad, la carga de comunicaciones se vuelve considerable.

- *Tiempos de sondeo largos y gran capacidad de almacenamiento de campo*

Los sistemas de comunicaciones con largos tiempos de sondeo y una sólida capacidad de almacenamiento en el campo; utilizan técnicas de sondeo y contención, para reducir los requisitos y las cargas en el medio de comunicación.

La transmisión de datos de presencia de un detector simple y del detector doble (control de velocidad – "trampas") para los sistemas de autopistas, provee la única carga de comunicación más alta para los sistemas de este tipo. Por ejemplo, si el procesador local interroga a un detector cada 1/60 de segundo, y si la computadora central interroga al procesador local una vez por segundo, el sistema debe transmitir seis (6) bits por segundo al centro de control ya que 6 bits pueden representar hasta 64 *muestras de información de presencia o ausencia de vehículos*. Si cada controlador da servicio a varios detectores y/o trampas de velocidad, la carga de comunicaciones se vuelve considerable. La Figura 12 muestra una técnica comúnmente utilizada para reducir esta carga. Como se muestra, los datos de ocupación de tráfico se acumulan en un contador y se transmiten al Centro de Control, indicando cuantos datos más grandes son, representados por el bit de desbordamiento. La transmisión de datos por radares a veces utiliza una técnica similar. Los datos transmitidos al Centro de Control, en última instancia, promedian el mismo valor que la entrada al contador. Sin embargo, en un intervalo de tiempo particular, los errores pueden acumularse y afectar negativamente las funciones de procesamiento de datos del Centro de Control.

Figura 12. Uso de bit de desbordamiento para reducir los requisitos de comunicación



Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Figure 4-5.

- *Técnicas de sondeo*

Con el advenimiento de una mayor capacidad para procesar y almacenar información en el campo; los diseños actuales, a menudo, presentan períodos de sondeo más largos. Los períodos de diez segundos a un minuto, o un ciclo de semáforo, parecen comunes. La Tabla 13, indica las ventajas y desventajas de los períodos de sondeo más largos. Dado que estos sistemas presentan un procesamiento de datos más extenso en el campo, su base de datos se hace más grande. Para facilitar la instalación física y el mantenimiento de esta base de datos, la práctica del diseño moderno, generalmente proporciona la capacidad de cambiar la base de datos a través del sistema de comunicación. Este proceso de descarga y el proceso de carga correspondiente (inspección y verificación de la base de datos en el Centro de Control), se convierten en un requisito de comunicación adicional para sistemas de este tipo.

Tabla 13. Ventajas y desventajas de períodos de sondeo más largos

Ventajas
▪ Por lo general, resulta en un requerimiento de datos más bajo para que cada unidad realice las mismas funciones. ▪ Proporcionar una señal para seleccionar el plan de tiempo apropiado de la memoria del controlador de campo, en lugar de proporcionar señales de control de intervalo o de fase. ▪ Permitir la comunicación de datos de vigilancia de mayor resolución. ▪ Evite el uso de programas de desbordamiento de datos del tipo que se muestra en la Figura 12.
Desventajas
▪ Requiere el procesamiento de mayor cantidad de datos de dispositivos en campo. ▪ Requiere una mayor base de datos de campo. ▪ Requiere la capacidad de almacenar un gran número de planes de tiempos de semáforos.

Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Table 4-5.

- *Requerimientos de comunicación para CCTV*

Antecedentes

El Circuito Cerrado de Televisión (CCTV), ya forma parte integral de muchas aplicaciones de control de tráfico, con monitoreo de carreteras, verificación de incidentes y seguridad como funciones comunes. Los componentes principales de un sistema de CCTV incluyen:

- Cámaras montadas en postes o estructuras existentes (edificios, pasos elevados, etc.) en lugares de campo.
- Accesorios de la cámara, incluido un conjunto de movimiento horizontal e inclinación (movimiento vertical).
- Monitores en el centro de operaciones de tráfico.
- Dispositivos periféricos (grabadoras de video).
- Comunicaciones (cable coaxial, cable de fibra óptica o transmisión de microondas), para vincular los sitios de campo con el centro de operaciones de tráfico.

Dado que el video requiere mucho más ancho de banda que las otras funciones de voz y datos, que suelen proporcionar los sistemas de control de tráfico, el CCTV con frecuencia se convierte en el factor dominante en el diseño de la red de

comunicaciones. En los sistemas de gestión del tráfico de autopistas, los operadores verifican cada vez más los incidentes a través de CCTV. Otras tendencias vigentes, usan técnicas de video comprimido (CODEC) para reducir los requisitos de ancho de banda.

- ***Comunicación inalámbrica para TMCs***

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC en sus siglas en inglés), es la Agencia asignada en los Estados Unidos para autorizar y otorgar permiso para operar transceptores de radio en las bandas de frecuencia con licencia y sin licencia. Encontramos el uso de tecnología con licencia y sin licencia para *sistemas SCADA*[13] que utilizan comunicaciones por radio en los EE. UU. En algunos casos, hay sistemas que integran radios con licencia y sin licencia para proporcionar una solución inalámbrica completa (Mercier, P., 1998).

El Código Federal de Regulación (CFR) de la FCC Parte 15, es un estándar de prueba común para la mayoría de los equipos electrónicos. La Parte 15 de la FCC, cubre las regulaciones bajo las cuales se puede operar un radiador intencional, no intencional o accidental sin una licencia individual. La FCC ha reconocido las amplias aplicaciones que se están desarrollando para los dispositivos de la Parte 15. Estos dispositivos de la Parte 15 se utilizan para una variedad de aplicaciones orientadas al consumidor y al negocio, que incluyen redes de área local – LAN inalámbricas, sistemas de lectura automática de medidores, sistemas SCADA, teléfonos, acceso de banda ancha a servicios de Internet, videoconferencias, monitoreo de atención médica y varias aplicaciones de control industrial La Parte 15 autoriza el funcionamiento sin licencia de transmisores de espectro electromagnético ampliado[14] dentro de las bandas de frecuencia[15] de 915 MHz,

---

[13] SCADA, acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) es un concepto que se emplea para realizar un software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.

[14] Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir ver el espectro, permiten

2450 MHz y 5800 MHz a niveles de potencia superiores a los que normalmente se permitirían para otros dispositivos sin licencia. Las regulaciones actuales limitan los sistemas de amplio espectro (*Spread Spectrum – SS*) a una potencia máxima de salida del transmisor de un vatio. Cuando se opera a ese nivel de potencia, la ganancia direccional máxima de la antena asociada no puede exceder los 6 dBi[16], lo que resulta en una Potencia Máxima Radiada Isotrópicamente Equivalente[17] (EIRP siglas en inglés) de cuatro vatios. Los sistemas de secuencia directa deben emplear un ancho de banda mínimo de 500 kHz con una ganancia de procesamiento de al menos 10 dB[18]. Los sistemas de salto de frecuencia en la banda de 915 MHz deben utilizar al menos 50 canales. Las reglas a 2450 MHz y 5800 MHz son algo diferentes (Mercier, P., 1998).

- *Sistemas de amplio espectro (Spread Spectrum – SS)*

El término "amplio espectro" (SS) describe una técnica de comunicaciones mediante la cual, una señal de radiofrecuencia se modula (ensancha) una segunda vez para generar una señal de banda ancha de ancho de banda expandido. Spread Spectrum se usa generalmente para la transmisión de datos. Los dos tipos más populares de modos de amplio espectro son el salto de frecuencia (Frequency Hopping) y la secuencia directa (Direct Sequence).

---

realizar medidas sobre el mismo, como son la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación.

[15] Las bandas de frecuencia son intervalos de frecuencias del espectro electromagnético asignados a diferentes usos dentro de las radiocomunicaciones. Su uso está regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones y puede variar según el lugar. El espacio asignado a las diferentes bandas abarca el espectro de radiofrecuencia y está dividido en sectores.

[16] Son los decibelios de ganancia sobre un radiador isotrópico o una relación logarítmica entre la potencia de emisión de una antena en relación a un radiador isotrópico.

[17] Un radiador isotrópico es una fuente puntual teórica de ondas electromagnéticas o sonoras que irradia la misma intensidad de radiación en todas las direcciones. No tiene una dirección de radiación preferida. Irradia uniformemente en todas direcciones sobre una esfera centrada en la fuente. Los radiadores isotrópicos se utilizan como radiadores de referencia con los que se comparan otras fuentes, por ejemplo, para determinar la ganancia de antenas.

[18] La ganancia de una antena es una medida de su tendencia a concentrar la señal en una dirección específica. Una antena con alta ganancia es altamente direccional; mientras que, una antena con baja ganancia es omnidireccional. La unidad para medir la ganancia es el decibel (dB). El decibel, en antenas, es una relación logarítmica entre voltajes, que se utiliza principalmente para permitir ganancia. Relaciones de decibeles en antenas: *dBm* (decibel relativo a 1 miliwatt): una medida absoluta de potencia, donde 0 dBm = 1 miliwatt, 10 dBm = 10 mW, 20 dBm = 100 mW, 30 dBm = 1 W, etc. *dBi* (decibel isotrópico): Ganancia de una antena en referencia a una antena isotrópica teórica.

Definición de salto de frecuencia (Frequency Hopping)

El salto de frecuencia en SS implica la aplicación de un código pseudoaleatorio que hace que el transmisor "salte" periódicamente o salte a una nueva frecuencia, transmita información sobre la frecuencia durante un período de tiempo definido, luego salte a la siguiente frecuencia y repita el proceso. Para que el receptor recupere la información transmitida, debe saltar a las mismas frecuencias que el transmisor. Por lo tanto, el código pseudoaleatorio y cierta información de sincronización deben conocerse en el extremo de recepción del enlace. El SS por salto de frecuencia, generalmente utiliza técnicas de transmisión y recepción de banda estrecha, lo que proporciona comunicaciones de larga distancia con excelente inmunidad al ruido y capacidades de rechazo de interferencias.

Definición de secuencia directa (Direct Sequence)

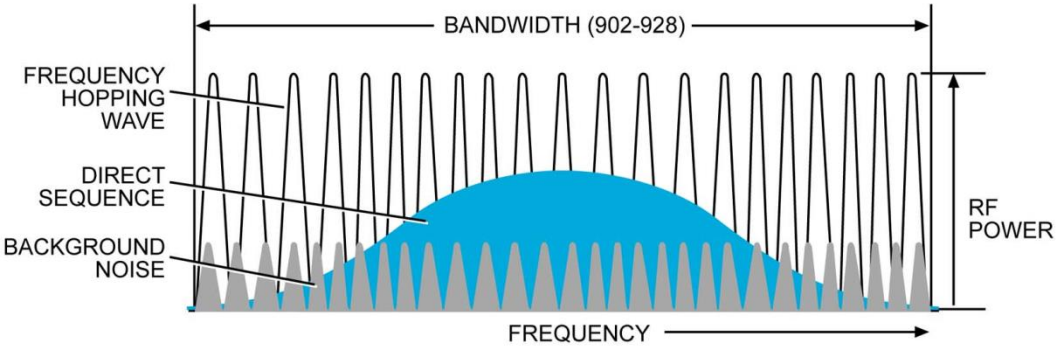
La secuencia directa en SS, también implica la aplicación de códigos pseudoaleatorios conocidos en ambos extremos del enlace, pero el código se usa para hacer que un transmisor de frecuencia fija distribuya su potencia de manera más o menos uniforme a través de una amplia banda de espectro de RF, generalmente muchos Megahertz. Los códigos pseudoaleatorios se seleccionan para dar a la señal de propagación un carácter "similar al ruido", que cuando es detectado por un dispositivo receptor convencional, se parece mucho al ruido aleatorio. El receptor debe ser lo suficientemente ancho para recuperar todo este ancho de banda, con el fin de recuperar la señal transmitida; y luego, usando el mismo código pseudoaleatorio que el transmisor, "distribuir" la señal a su componente de datos original. Los sistemas de secuencia directa también tienen buena inmunidad al ruido y la interferencia cuando se utilizan con antenas parabólicas altamente direccionales en aplicaciones de rango relativamente corto.

- *¿Secuencia directa o salto de frecuencia?*

Las diferentes técnicas de modulación de banda ancha (secuencia directa) y banda estrecha (salto de frecuencia) tienen ventajas específicas para fines específicos. El salto de frecuencia tiene la ventaja de difundir su señal en un amplio ancho de banda, utilizando la máxima potencia de transmisión permitida y una alta

sensibilidad del receptor (ganancia del sistema); pero al mismo tiempo utilizando técnicas tradicionales de filtrado de banda estrecha para rechazar el ruido y la interferencia con filtrado forzoso. Es, con mucho, *la técnica óptima para un sistema de control de tráfico que requiere comunicaciones de largo alcance en un espectro de radio compartido*. (Ver Figura 13).

Figura 13. Secuencia directa versus Salto de frecuencia



Fuente: Mercier, P., 1998. Figure 1.

- *Beneficios de Sistemas SS combinado con DSP*

El efecto beneficioso del Procesamiento de Señales Digitales (DSP siglas en inglés) en la radio de amplio espectro, permite mejoras en la recuperación de datos mediante la corrección de errores de reenvío y distancias de trayectoria de señal mejoradas, como resultado de la sensibilidad mejorada del receptor. Los tiempos de respuesta de los datos (*latencia del sistema*) también se han reducido, lo que ha dado como resultado un mayor rendimiento del sistema. Las radios de alto rendimiento pueden ofrecer tiempos de respuesta de datos de menos de 10 milisegundos. El DSP permite que las funciones de hardware de radio, que históricamente se han implementado en hardware analógico, ahora se implementen en hardware digital con precisión matemática y repetitividad. Los beneficios del DSP incluyen:

- Operación de larga distancia
- Comunicaciones fiables en un entorno "rico" de RF
- Operación en tiempo real: respuesta determinista en milisegundos

- Funcionamiento sin mantenimiento: alta fiabilidad > MTBF[19] de 250.000 horas
- Diagnóstico remoto: no intrusivo para los datos
- Conectividad de red: acceso a datos en toda la empresa
- Bajo consumo de energía <500 mA en transmisión
- Modo de suspensión para aplicación solar <50 mA de consumo de corriente
- Corrección de errores hacia adelante
- Sensibilidad del receptor> -110dBm
- Sin ajustes de afinación internos

Cuando se necesita tecnología para aplicar en el *control del tráfico u otros sistemas de tráfico inteligentes*, es fundamental considerar la *flexibilidad* que ofrece el sistema. Desarrolle las siguientes preguntas: ¿Le permite "enmascarar" ciertas partes de la banda 902-928MHz para evitar posibles interferencias celulares o de buscapersonas? ¿Hay cientos de canales para elegir y miles de direcciones de red disponibles? ¿Le permite la posibilidad de utilizarlo como una extensión de un sistema MAS[20] existente? ¿Tiene que modificar su sistema de alguna manera para adaptarse al tipo de radio que está considerando? (es decir, ¿es transparente?) ¿La empresa que está considerando tiene su acceso principal en las comunicaciones por radio y tiene un departamento de Ingeniería y servicio de campo con experiencia en radio y datos para ayudarlo a través de la instalación y puesta en marcha del sistema? Por encima de todo, considere la intención del diseño de producto que está utilizando. *¿Está diseñado desde el tablero para las comunicaciones de control de tráfico?* (Mercier, P., 1998).

- *Planificación de la instalación*

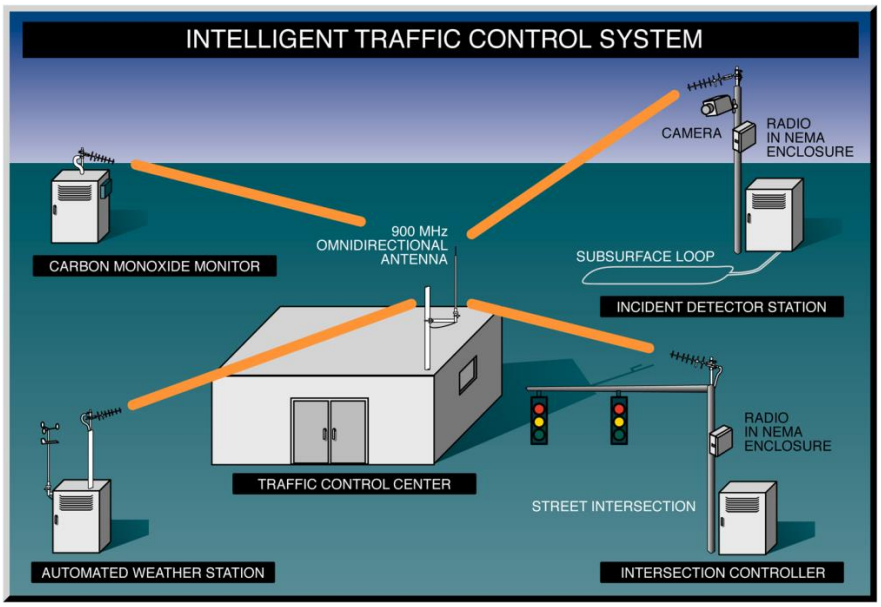
Al igual que con un sistema con licencia, la instalación del transceptor SS no es difícil, pero requiere cierta planificación para garantizar la confiabilidad de la comunicación. El trabajo de Mercier proporciona consejos para seleccionar una arquitectura de sistema adecuada (Ver Figuras 14 y 15), ubicación del sitio, elegir un sistema de antena y minimizar la posibilidad de interferencia dañina.

---

[19] MTBF es el acrónimo de las palabras inglesas Mean Time Between Failures, o tiempo medio entre fallos.

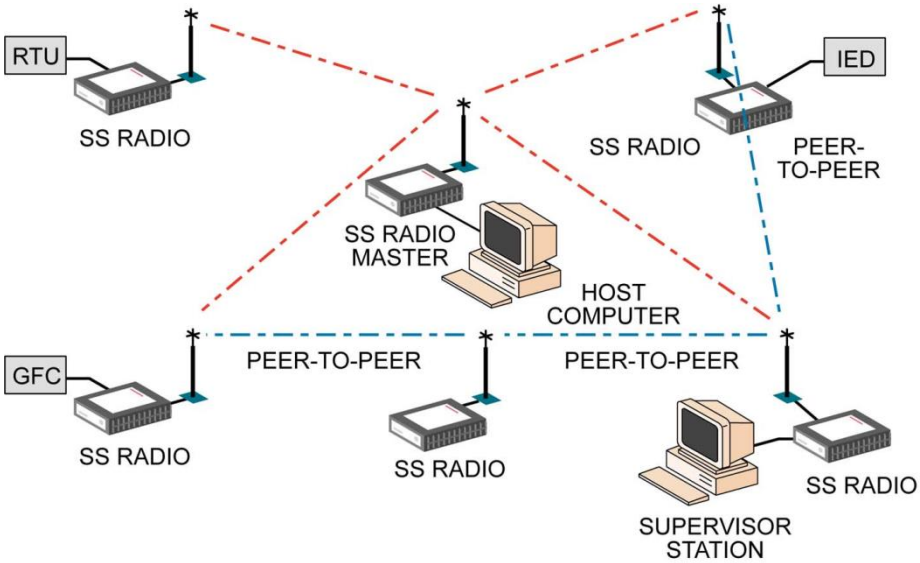
[20] Un Sistema multi-agente o “auto-organizado”, es un sistema computarizado compuesto por múltiples agentes inteligentes que interactúan.

Figura 14. Sistema de Radio MAS de Amplio Espectro SS



Fuente: Mercier, P., 1998. Figure 4.

Figura 15. Sistema de redes peer-to-peer (P2P) de Amplio Espectro SS



Fuente: Mercier, P., 1998. Figure 5.

Los radios de amplio espectro por salto de frecuencia brindan una excelente alternativa económica a las soluciones tradicionales de radio con licencia y cableadas. Están diseñados para operar en condiciones difíciles y se pueden escalar para un crecimiento progresivo y una cobertura ilimitada utilizando enlaces repetidores. El salto de frecuencia también es una solución ideal para evitar interferencias. Con una recuperación típica del sistema de dos años (según las

comparaciones de tarifas de líneas arrendadas y el control total de la instalación y el mantenimiento), ***un sistema de control de tráfico de amplio espectro inalámbrico*** puede proporcionarle años de comunicaciones de datos confiables (Mercier, P., 1998).

- **Arquitectura de comunicación de TMCs**

El sistema de comunicaciones generalmente demuestra ser el componente más crítico y costoso de un sistema de control de tráfico. Para implementar un sistema de comunicaciones exitoso, el diseñador debe seleccionar una arquitectura de comunicaciones eficiente y rentable. El Profesional del Telecomunicaciones debe comprender las diversas alternativas de arquitectura de comunicaciones y cómo cumplen los objetivos funcionales de control de tráfico y los requisitos del sistema.

- *Clasificación de arquitecturas de comunicación*

Las arquitecturas de comunicación para los sistemas de control de tráfico se dividen en tres clasificaciones principales:

- Central
- Distribuido
- Híbrido

- *Arquitectura Central*

Un sistema posee una arquitectura de comunicación central si:

- Solo se produce un nivel de cálculo, antes de que las señales lleguen al controlador de campo.
- Existe un protocolo de comunicación entre el centro de control y el controlador de campo.
- Existe una velocidad de datos entre el centro de control y el controlador de campo. La Figura 16 ilustra una arquitectura central.

- *Arquitectura Distribuida*

Un sistema presenta una arquitectura de comunicación distribuida si:

- Existen múltiples niveles de cómputo en el campo (ver Figura 16B), o

- La velocidad de datos cambia entre el centro de control y el controlador de campo.

Un sistema de comunicaciones está troncalizado, una forma de Arquitectura Distribuida, (ver Figura 16C) si:

- El sistema de comunicaciones recopila información y la distribuye a varios controladores de campo.
- En alguna ubicación de campo, la velocidad de datos o el ancho de banda del canal de comunicación aumenta, para requerir menos canales para la comunicación con el centro de control.

- *Arquitectura Híbrida*

Si partes del sistema presentan las dos características anteriores, entonces tiene una arquitectura híbrida.

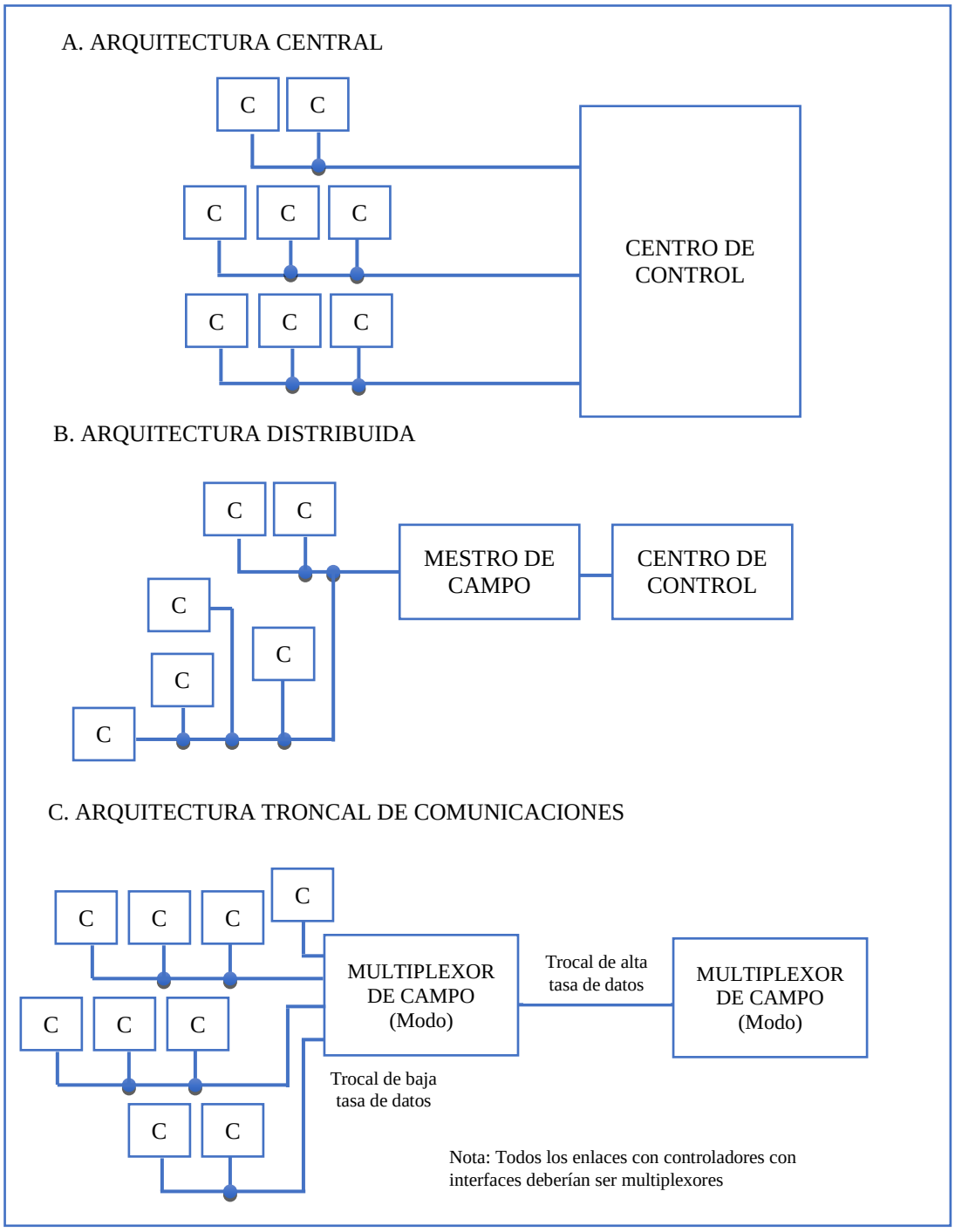
Columna vertebral

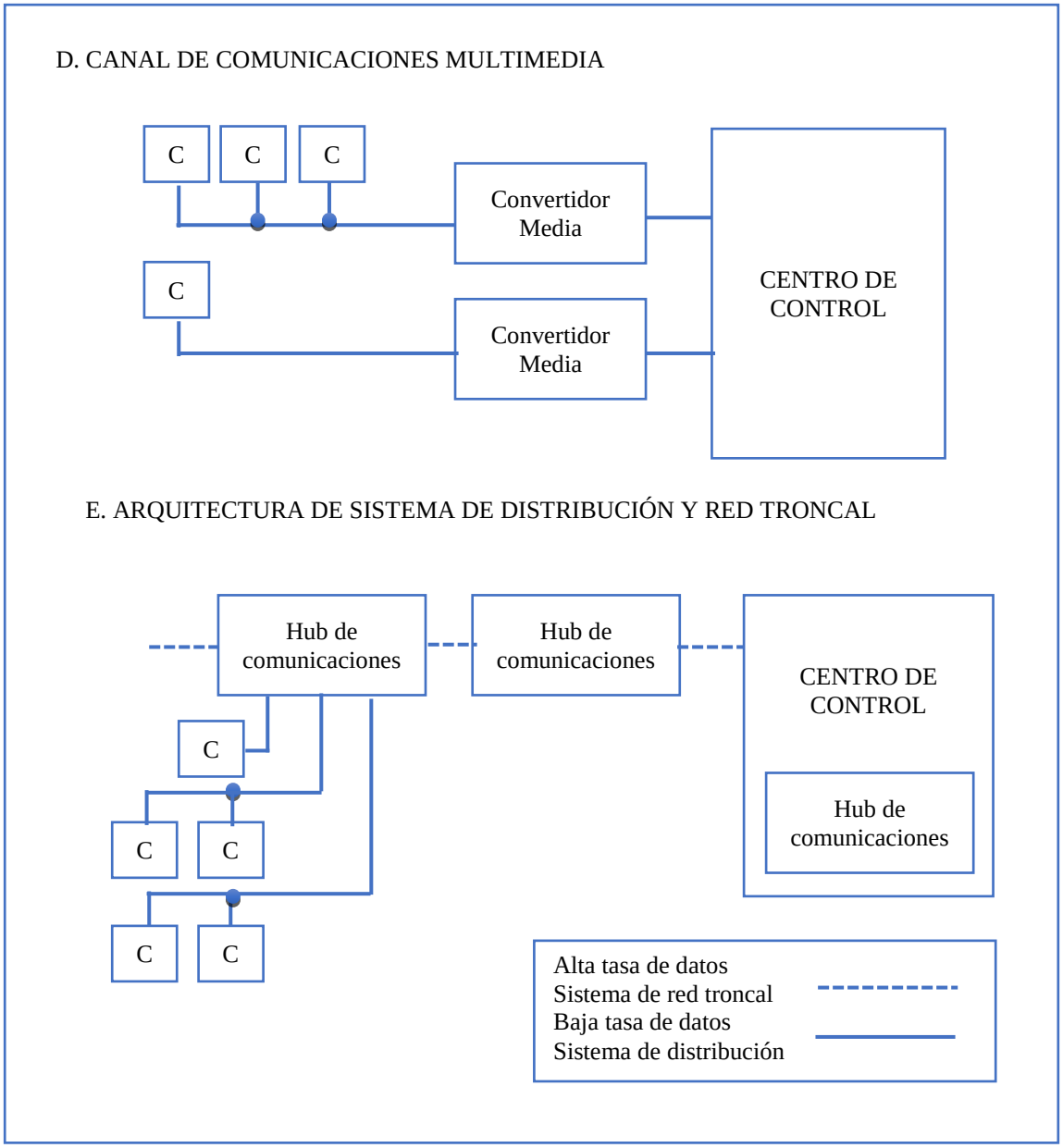
Otra forma de arquitectura de comunicaciones distribuidas que utiliza múltiples velocidades de datos se basa en la red troncal, como se muestra en la Figura 16E. La red troncal de alta velocidad de datos, conecta una serie de nodos o centros de comunicación de campo. El equipo en cada concentrador, transforma estos canales de alta velocidad de datos en un mayor número de canales de distribución de baja velocidad de datos.

Multimedia

Si más de un medio constituye la ruta de comunicaciones entre el centro de control y el controlador de campo, sin alterar la velocidad de datos y el protocolo de transmisión; entonces el sistema presenta un canal de comunicaciones multimedia (ver Figura 16D). Los canales de este tipo no afectan la definición de la arquitectura.

Figura 16. Clasificación de Arquitecturas de Comunicación





Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Figure 5-2

Tabla 14. Funciones de Procesamiento de Control de Tráfico

FUNCION DE PROCESAMIENTO	Sistema basado en computador central	Sistema de lazo cerrado		
		CENTRAL	MAESTRO	LOCAL
CONTROL				
Selección manual del tiempo del semáforo	▲	▲		
Uso de datos del detector para seleccionar el tiempo del semáforo	▲		▲	
Selección del tiempo del semáforo por hora del día	▲		▲	
Control del tiempo por cada fase del semáforo	▲		▲	
Movimientos secuenciales para vehículos y peatones	(local)			▲
Preferencia semafórica para vehículos de emergencia	(local)			▲
Carga/descarga de datos de maestros a locales	▲	▲	▲	
Generador off-line de tiempos de semáforo usando programas de optimización	▲	▲		
MEDICION DEL FLUJO DE TRÁFICO				
Monitoreo de la operación de intersecciones locales	▲		▲	
Procesamiento de datos del detector para derivar flujos de tráfico	▲		▲	
Monitoreo de la operación de intersecciones locales	▲	▲		
SISTEMA DE MONITOREO				
Monitoreo de la operación de intersecciones locales	▲	▲		
Presentación del estado del sistema en gráficos computacionales	▲	▲		
Presentación de gráficos de fases semafóricas y los datos del detector	▲	▲		
Monitoreo de fallas del equipamiento	▲		▲	

Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Table 5-2

Resumen de aplicaciones comunes de arquitecturas de comunicación

La Tabla 15 resume las aplicaciones comunes y ejemplos de las arquitecturas de comunicación descritas en este punto.

Tabla 15. Aplicación común de la Arquitectura de Comunicaciones

Arquitectura de comunicaciones del sistema de tráfico	Aplicaciones comunes	Ejemplos
CENTRAL	Requerimiento de comunicaciones limitado a un pequeño número de controladores de campo y canales de video para cada intersección local	▪ Sistemas de semaforización controlados por computadores en centros de control ▪ Pequeños o medianos sistemas de vigilancia de autopistas con video limitado
DISTRIBUIDO	Sistema de control de tráfico computarizado en campo con operaciones centralizadas	▪ Sistema de control semafórico de lazo cerrado
TRONCAL	Generación de economía al concentrar datos en canales de alta velocidad para recorridos largos hasta el centro de operaciones de tráfico.	▪ Sistemas de vigilancia de autopistas de área amplia con grandes centros de operación de tráfico
CANAL MULTIMEDIA	La geometría y/o la economía hacen que un solo medio sea impráctico.	▪ Sistemas de vigilancia de autopistas y sistemas semaforizados sin adecuada conexión a centros de operación de tráfico, que requieren alquiler de medios para acceder al centro de control. ▪ Cambio de cables de tierra a medios inalámbricos para atravesar obstáculos físicos
RED TRONCAL Y SISTEMA DE DISTRIBUCION	Requerimientos de comunicación muy pesada (incluye video) que hacen que el uso de los canales de alta velocidad sea económico para grandes enlaces de transmisión	▪ Sistemas de vigilancia de autopistas y corredores de área amplia

Fuente: Adaptado de FHWA-SA-93-052. Table 5-3

- **Lenguaje de Comunicaciones el TMC: El Protocolo**

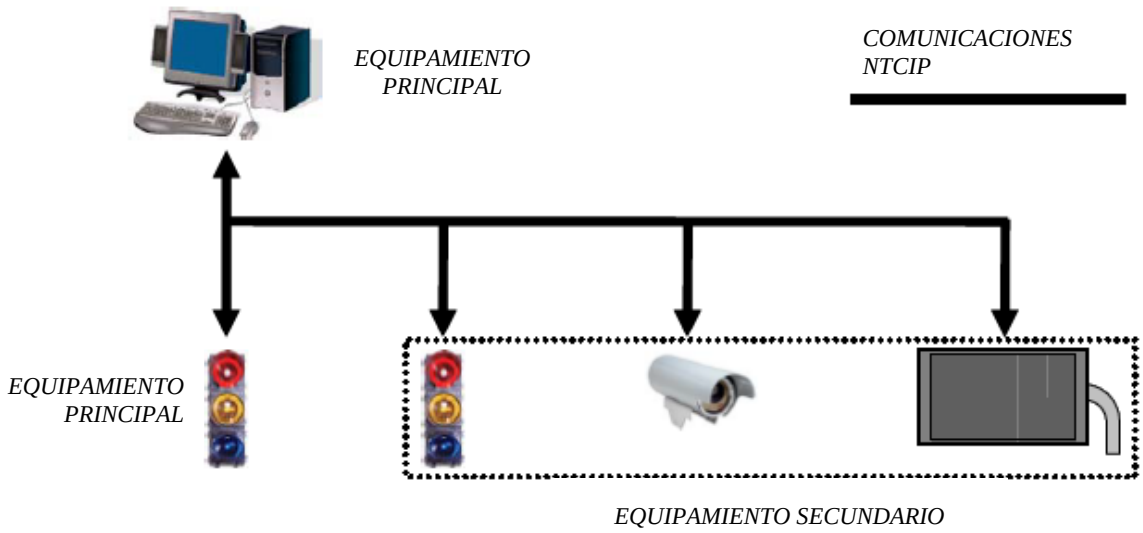
La familia de estándares de las Comunicaciones Nacionales de Transporte para el Protocolo ITS (NTCIP) de los Estados Unidos, define protocolos y perfiles que son ***estándares abiertos de comunicación de datos*** basados en consenso. Cuando se utilizan para el control remoto de dispositivos de gestión de transporte en carretera y otros, los dispositivos y software basados en NTCIP, pueden ayudar a lograr la interoperabilidad e intercambiabilidad. Cuando se utilizan entre el transporte y los centros de gestión de emergencias, los estándares NTCIP facilitan la coordinación de la Agencia y el intercambio de información. ¿Por qué se necesitan los estándares NTCIP? ¿Cómo se usan los estándares NTCIP? ¿Qué es la interoperabilidad y la intercambiabilidad? NTCIP 9001 v04, al que se hace referencia aquí como "La Guía NTCIP", explica estos términos y le brinda el "por qué" y el "cómo" para especificar e implementar estándares NTCIP en sus dispositivos y sistemas ITS.

- *Propósito del Protocolo NTCIP*

La industria del transporte ha tenido un historial de implementación de sistemas con definiciones de datos únicas y protocolos de comunicaciones patentados. Los dispositivos y sistemas de campo de un fabricante o desarrollador, no eran interoperables con los de otros fabricantes o desarrolladores. Como resultado, la expansión del sistema, después de la implementación inicial, generalmente solo se puede hacer usando equipos del mismo tipo y; por lo general, la misma marca que en la implementación inicial; a menos que, haya inversiones en esfuerzos importantes de integración de sistemas. Con los protocolos patentados, hay pocas o ninguna oportunidad para una licitación competitiva realista, ya que se agregan dispositivos de campo adicionales al sistema, debido a la falta de intercambiabilidad. Tampoco hay ninguna oportunidad para una oferta competitiva realista, para agregar tipos adicionales de dispositivos de campo al sistema, debido a la falta de interoperabilidad. Los estándares NTCIP, definen detalles de datos comunes y protocolos abiertos. El uso adecuado de los estándares abiertos NTCIP, en una implementación de ITS permite que la expansión futura del sistema, se beneficie de una verdadera oferta competitiva; así como también, se pueden agregar otros tipos de dispositivos de campo. NTCIP es una familia completa de

estándares diseñados para satisfacer las necesidades de comunicación de varios dispositivos viales fijos y centros de gestión de tráfico. El enfoque de estándares abiertos se ilustra en la Figura 17.

Figura 17. NTCIP facilita la interoperabilidad e intercambiabilidad de los equipos de campo



Fuente: Adaptado de NTCIP 9001 v04.06. Figure 1.

NTCIP es una familia de estándares abiertos, que define protocolos de comunicaciones comunes y definiciones de datos. La interoperabilidad y la intercambiabilidad son dos objetivos clave del esfuerzo de estándares abiertos de NTCIP. Los términos interoperabilidad e intercambiabilidad, generalmente reflejan la capacidad de usar múltiples marcas de un dispositivo en el mismo canal de comunicaciones, junto con la capacidad de intercambiarlos. Por ejemplo, la capacidad de colocar cualquier marca de controlador de semáforo compatible con NTCIP, en el mismo sistema al mismo tiempo, refleja la intercambiabilidad para ese tipo de dispositivo. Es por esta razón, que la familia de protocolos NTCIP, está siendo ampliamente adoptada y especificada en muchas implementaciones de sistemas nuevos.

- *Interoperabilidad*

La interoperabilidad, refleja la capacidad de múltiples sistemas centrales y dispositivos de diferentes tipos, para intercambiar información con algún propósito

común. La interoperabilidad, permite que los componentes del sistema de diferentes proveedores se comuniquen entre sí, para proporcionar funciones del sistema y trabajar juntos como un sistema completo. Por ejemplo, el uso de la misma infraestructura de comunicaciones para interconectar un Sistema de Gestión con Controladores de Semáforos, Señales de Mensajes Dinámicos (VMS), controles de video vigilancia y otros dispositivos para gestionar el tráfico, refleja un ejemplo real de interoperabilidad.

- *Intercambiabilidad*

La intercambiabilidad, refleja la capacidad de intercambiar dispositivos del mismo tipo, de diferentes proveedores, en el mismo canal de comunicaciones; y hacer que esos dispositivos, interactúen con otros del mismo tipo utilizando funciones basadas en estándares. Un ejemplo de intercambiabilidad, es un controlador de semáforo de diferentes fabricantes, que interactúan entre sí, para proporcionar la coordinación de intersecciones a lo largo de una vía arterial.

- *Generalidades del Protocolo NTCIP*

NTCIP es una familia de estándares de comunicación para transmitir datos y mensajes entre sistemas informáticos, utilizados en Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). Un estándar de comunicaciones, especifica un conjunto de reglas sobre cómo se codifican y transmiten los mensajes entre dispositivos electrónicos. El equipo en cada extremo de una transmisión de datos, utiliza la misma especificación para comunicarse con éxito. Es un poco como los idiomas humanos, que tienen un alfabeto, vocabulario y reglas gramaticales utilizadas por todos los que hablan ese idioma.

- *Comunicaciones de centro a campo (C2F)*

NTCIP proporciona estándares de comunicación para dos tipos fundamentalmente diferentes de comunicaciones ITS. El primer tipo, es entre un sistema central y múltiples dispositivos de control o monitoreo administrados por ese centro. Un ejemplo de un sistema central, es una computadora en el Municipio, que monitorea y controla la operación de los controladores en la vía, basados en microprocesadores en los semáforos dentro de una ciudad. El sistema central puede

enviar instrucciones a los controladores para cambiar los tiempos, a medida que cambian las condiciones del tráfico; y los controladores envían información de estado y flujo de tráfico a la computadora. Otros ejemplos de este tipo de comunicaciones incluyen:

a) Un sistema de comunicación a bordo de vehículos, que se enlaza con un dispositivo semafórico para facilitar la prioridad de tránsito;
b) Un sistema de gestión de autopistas, que se comunica con detectores y medidores de rampa en autopistas; y
c) Un sistema de gestión del tráfico, que controla la iluminación de las carreteras, Cámaras de Circuito Cerrado de Televisión (CCTV), Señales de Mensajes Dinámicos (VMS), transmisores de radio de aviso, sensores ambientales y estaciones de conteo de tráfico en las carreteras.

Dado que la mayoría de las aplicaciones de este tipo implican un sistema central que se comunica con varios dispositivos en la carretera o en vehículos de la Agencia, este tipo de comunicación se denomina "centro a campo" (C2F). Los protocolos NTCIP destinados a esta aplicación de comunicaciones, a menudo se usan en un entorno donde un sistema central, sondea de manera rutinaria cada dispositivo de campo; como en el caso más común de múltiples dispositivos de campo que comparten un sólo canal de comunicaciones.

- *Comunicaciones de centro a centro (C2C)*

El segundo tipo de comunicación, involucra mensajes enviados entre dos o más sistemas centrales. Este tipo de comunicación se conoce como: comunicaciones de centro a centro (C2C), aunque dos o más de los diversos sistemas pueden estar ubicados dentro del mismo "centro" o edificio, están lógicamente separados. C2C, implica comunicaciones entre pares entre cualquier número de sistemas centrales en una “red de muchos a muchos”. Este tipo de comunicación es similar a Internet; ya que, cualquier centro puede solicitar información o proporcionar información a cualquier número de otros centros. Un ejemplo de comunicaciones C2C son dos centros de gestión de tráfico, que intercambian información en tiempo real sobre el inventario y el estado de los dispositivos de control. Esto permite que cada sistema central sepa, qué plan de temporización, por ejemplo, el otro sistema central se está

ejecutando, para permitir la coordinación de la señal de tráfico; a través de los límites geográficos del centro. Otros ejemplos de este tipo de comunicación incluyen:

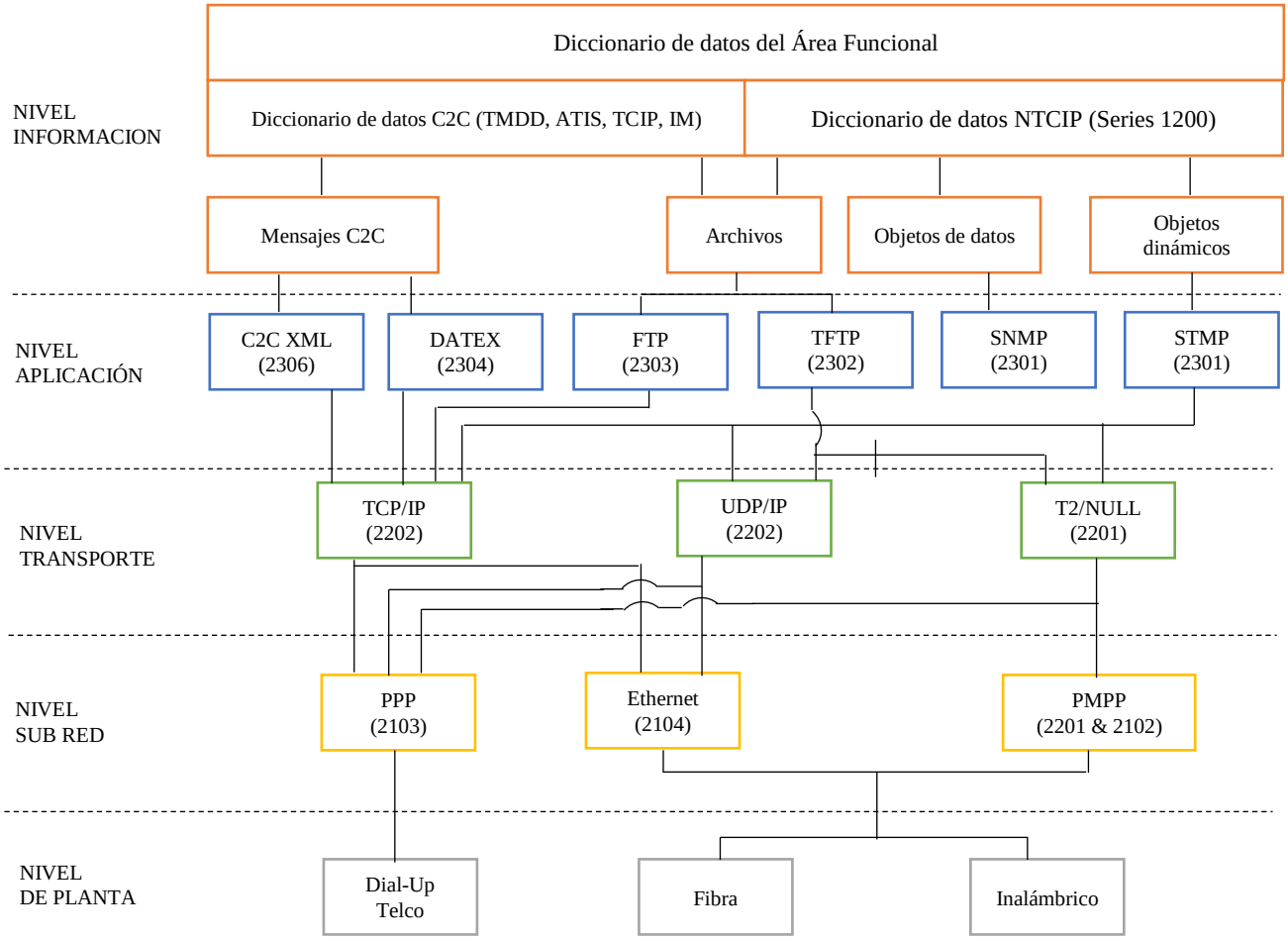
a) Dos o más sistemas de semáforos que intercambian información (incluidos los cambios de estado segundo a segundo) para lograr las operaciones coordinadas administradas por los diferentes sistemas; y para permitir que el personal de un centro monitoree el estado de las señales operadas desde otro centro;
b) Un sistema de transporte público, que informa las excepciones de cumplimiento del cronograma a un sistema de información del cliente del servicio de transporte; y a un sistema regional de información al viajero, mientras que también solicita a un sistema de gestión de semaforización, que indique a sus señales que den prioridad a un vehículo de transporte público retrasado;
c) Un sistema de gestión de emergencias, que informa un incidente a un sistema de gestión de autopistas, a un sistema de gestión de semáforos, a dos sistemas de gestión de transporte público y a un sistema de información al viajero;
d) Un sistema de gestión de autopistas, que informa a un sistema de gestión de emergencias de un mensaje de advertencia recién publicado en un letrero de mensaje dinámico, en la autopista en respuesta a su notificación de un incidente; y
e) Un sistema de monitoreo del clima, que informa a un sistema de gestión de autopistas, de la formación de hielo en la carretera, para que el sistema de gestión de autopistas pueda publicar mensajes de advertencia en señales de mensajes dinámicos, según corresponda.

- *Estructura del NTCIP*

La estructura NTCIP, que se muestra en la Figura 18, utiliza un enfoque en capas o modular para los estándares de comunicaciones, similar al enfoque en capas adoptado por Internet y la Organización Internacional de Estándares (ISO). En general, se puede considerar que las comunicaciones de datos entre dos computadoras u otros dispositivos electrónicos involucran las siguientes capas

primarias, llamadas "niveles" en NTCIP; para distinguirlas de las definidas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) e Internet. Los cinco niveles son: nivel de información, nivel de aplicación, nivel de transporte, nivel de subred y nivel de planta.

Figura 18. Estructura NTCIP

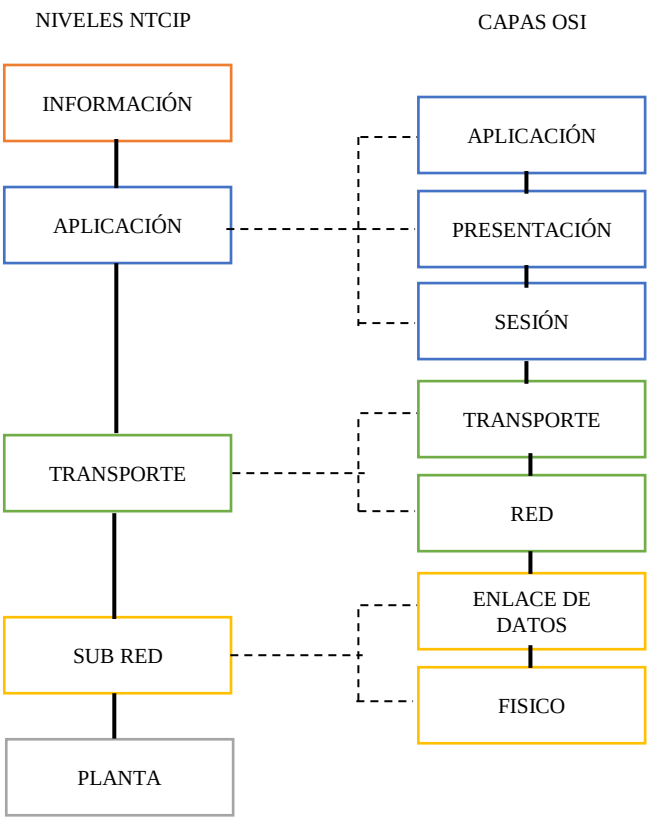


Fuente: Adaptado de NTCIP 9001 v04.06. Figure 4.

Los niveles en la estructura NTCIP, son algo diferentes de las capas de la red de comunicación; definidas por el modelo de referencia de siete capas, de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI) de ISO y otras organizaciones de desarrollo de estándares. El modelo OSI divide el proceso de comunicación en siete capas bien definidas. Cada capa tiene un propósito definido, generalmente independiente de las capas adyacentes. Aunque los protocolos de comunicaciones OSI no se usan ampliamente, el modelo en capas permanece. Con los muchos requisitos diversos de NTCIP, no es sorprendente que la familia de estándares

NTCIP haya analizado el modelo de referencia básica ISO OSI para ayudar a definir su estructura. Sin embargo, la red NTCIP se extiende más allá de la red de comunicaciones, para incluir datos informativos e interfaces con la infraestructura de comunicaciones físicas. Los niveles y la terminología utilizados en NTCIP, fueron elegidos por la simplicidad y la facilidad de comprensión por parte de los lectores, y su relevancia para las aplicaciones típicas en la industria del transporte. La Figura 19 muestra cómo los niveles de información, aplicación, transporte, subred y planta de NTCIP se relacionan libremente con el Modelo OSI.

Figura 19. Asignación de capa OSI a nivel NTCIP



Fuente: Adaptado de NTCIP 9001 v04.06. Figure 5.

a) *Nivel de información NTCIP* — Los estándares de información, definen el significado de los datos y mensajes y, generalmente, tratan con la información de ITS (en lugar de la información sobre la red de comunicaciones). Esto es similar a definir un diccionario y una lista de frases dentro de un idioma. Estas normas están por encima del modelo tradicional de siete capas ISO. Los estándares de nivel de información representan la funcionalidad del sistema a implementar.

b) *Nivel de aplicación NTCIP* — Los estándares de aplicación, definen las reglas y procedimientos para el intercambio de datos de información. Las reglas pueden incluir definiciones de gramática y sintaxis adecuadas de una sola declaración; así como, la secuencia de declaraciones permitidas. Esto es similar a combinar palabras y frases para formar una oración, o un pensamiento completo; y definir las reglas para saludarse e intercambiar información. Estos estándares son aproximadamente equivalentes a las capas de sesión, presentación y aplicación del modelo OSI.

c) *Nivel de transporte NTCIP* — Los estándares de transporte, definen las reglas y procedimientos para intercambiar los datos de la Aplicación entre el punto "A" y el punto "X" en una red; incluidas las funciones necesarias de enrutamiento, desensamblaje/reensamblado de mensajes y administración de la red. Esto es similar a las reglas y procedimientos utilizados por la compañía telefónica para conectar dos teléfonos ubicados de forma remota. Los estándares de nivel de transporte son más o menos equivalentes a las capas de transporte y red del modelo OSI.

d) *Nivel de subred NTCIP* — Los estándares de subred, definen las reglas y procedimientos para el intercambio de datos entre dos dispositivos "adyacentes"; a través, de algunos medios de comunicación. Esto es equivalente a las reglas utilizadas por la compañía telefónica para intercambiar datos a través de un enlace celular versus las reglas utilizadas para intercambiar datos a través de un cable de cobre de par trenzado. Estos estándares son aproximadamente equivalentes al enlace de datos y las capas físicas del modelo OSI.

e) *Nivel de planta NTCIP* — El Nivel de Planta se muestra en el Marco NTCIP, solo como un medio de proporcionar un punto de referencia para aquellos que están aprendiendo sobre NTCIP. El nivel de planta incluye la infraestructura de comunicaciones sobre la cual, se utilizarán los estándares de comunicaciones NTCIP y tiene un impacto directo en la selección de un nivel de subred apropiado para usar, sobre la infraestructura de comunicaciones seleccionada. Los estándares NTCIP no prescriben ningún tipo de medio sobre otro. En la mayoría de los casos,

las selecciones de medios de comunicación se realizan temprano en la fase de diseño.

Los implementadores deben seleccionar y especificar al menos un protocolo o perfil NTCIP a nivel de información, aplicación, transporte y subred para un sistema.

- *Conformidad*

Cada estándar NTCIP, contiene una sección que trata sobre "Conformidad", que establece claramente los requisitos de conformidad con el estándar mediante implementaciones que incorporan ese estándar. La facilidad o dificultad de determinar la conformidad, depende de la complejidad del estándar y la implementación resultante. La conformidad difiere del cumplimiento. El término cumplimiento, se usa con mayor frecuencia en lenguaje contractual para evaluar la determinación legal de cumplir o no con las especificaciones del contrato de una Agencia. Es necesaria una Agencia que cree una especificación, basada en los estándares NTCIP, para garantizar que todos los elementos opcionales del estándar sean necesarios para su implementación. Una especificación de la Agencia permite la eliminación explícita de elementos opcionales de los estándares NTCIP que no se aplican. Por lo tanto, si bien un proveedor puede afirmar que sus dispositivos son "compatibles con NTCIP"; cumplir con los requisitos mínimos obligatorios de un estándar NTCIP, puede no ser suficiente para cumplir con los requisitos del Proyecto de la Agencia o para cumplir con una especificación de la Agencia:

- Cumplimiento de estándares: cuando un asunto cumple con todos los requisitos obligatorios definidos por un estándar.
- Cumplimiento de especificaciones: cuando un asunto cumple con todos los requisitos de una especificación de la Agencia.

- *Opciones y niveles de conformidad*

Además de especificar una “pila de protocolos”, el diseñador del sistema también debe elegir entre las alternativas disponibles en la pila seleccionada. Estas opciones

existen en las pilas de protocolos C2C y C2F. Las opciones principales, como qué protocolo(s) admitir en cada nivel en la red de comunicaciones; a veces se agrupan de acuerdo con los niveles de conformidad, mientras que otras se pueden seleccionar individualmente.

La mayoría de los fabricantes y proveedores de sistemas, suelen ofrecer características que van más allá del estándar. Para hacer uso de tales características, es necesario especificar la inclusión de elementos o mensajes de datos específicos del fabricante, como extensiones de los estándares al adquirir un sistema de gestión.

La decisión de la Agencia de usar características superiores al estándar, debe hacerse solo con la comprensión de los posibles impactos. Estos impactos podrían ser considerables a largo plazo. Estas opciones pueden, en efecto, resultar en la adquisición de sistemas propietarios. Parte de la decisión de la Agencia debe incluir el número de características permitidas.

1.9. Definición de términos básicos

- **Actuated Signal Control (Controlador de semáforo actuado)**

Duración del tiempo de fase, está basado en los datos de detección de presencia vehicular, motorizado y/o no motorizado.

- **Adaptive Signal Control (Control de semáforo adaptativo)**

Concepto de control de tiempo del semáforo, donde el tráfico de vehículos en una red se detecta mediante un sensor en un punto de acceso aguas arriba y/o aguas abajo de una intersección semaforizada. Esta información utiliza un algoritmo matemático para predecir cuándo y dónde estará dicho tráfico, y así para realizar ajustes de la señal en intersecciones contiguas basándose en esas predicciones.

- **Automatic Vehicle Location (AVL) System (Sistema Automático de Localización Vehicular)**

Tecnología de sistema inteligente de transporte (ITS) para rastrear la localización del vehículo, la velocidad y otras medidas dentro de un sistema. La mayoría de las aplicaciones se encuentran en vehículos y sistemas de tránsito avanzado.

- **Controller (Controlador)**

Pieza de hardware que determina cómo una señal del semáforo responde a las “llamadas” de la demanda, basadas en parámetros de temporización.

- **Controller Memory (Memoria del controlador)**

Término que se refiere a la capacidad del controlador de "recordar" (es decir, mantener) un accionamiento del detector e incluye uno de los dos modos (desbloqueo o bloqueo).

- **Bit—binary digit (Dígito binario)**

La unidad más pequeña de datos digitales, a menudo representada por un uno o un cero. Ocho bits (más los bits de inicio, parada y paridad) generalmente comprenden un byte.

- **bps—Bits-per-second (Bits por segundo)**

Una medida de la tasa de transferencia de información de datos digitales a través de un canal de comunicación.

- **Byte (Byte)**

Una cadena de datos digitales generalmente formada por ocho bits de datos y bits de inicio, parada y paridad.

- **Coordinated-Actuated (Coordinado-actuado)**

Operaciones de señales semafóricas en coordinación con otras intersecciones, y usando la detección de vehículos, bicicletas y/o peatones para definir la sincronización de las mismas.

- **Coordination (or Coordinated) (Coordinación (o Coordinado))**

Capacidad de sincronizar múltiples intersecciones para mejorar el funcionamiento de uno o más movimientos direccionales en un sistema.

- **Decibel (dB)**

Una medida de la relación entre dos niveles de señal. Se utiliza con frecuencia para expresar la ganancia (o pérdida) de un sistema.

- **dBi**

Decibelios referidos a un radiador isotrópico "ideal" en el espacio libre. Se utiliza con frecuencia para expresar la ganancia de antena.

- **dBm**

Decibelios referidos a un milivatio. Unidad absoluta que se utiliza para medir la potencia de la señal, como en la potencia de salida del transmisor o la intensidad de la señal recibida.

- **DSP—Digital Signal Processing (Procesamiento digital de señal)**

El circuito DSP realiza una emulación de las tareas en tiempo real más críticas: principalmente modulación, demodulación y filtrado de FI. Además, sirve del puerto de datos de radio.

- **Fade Margin (Márgen de desvanecimiento)**

En telecomunicaciones, es la mayor reducción tolerable en la intensidad de la señal recibida promedio que se anticipará en la mayoría de las condiciones. Proporciona un margen para la intensidad de la señal reducida debido a trayectos múltiples, un ligero movimiento de la antena o pérdidas atmosféricas cambiantes. Un margen de desvanecimiento de 20 a 30 dB suele ser suficiente en la mayoría de los sistemas.

- **Host Computer (Computador anfitrión)**

La computadora instalada en el sitio de la estación maestra que controla la recolección de datos de uno o más sitios remotos.

- **Latency (Latencia)**

El retraso (generalmente expresado en milisegundos) entre el momento en que los datos se aplican a TXD (transmitir) en una radio, hasta que aparecen en RXD (recibir) en la otra radio.

- **Master (Station) (Estación maestra)**

El único transceptor de radio en una red de amplio espectro que proporciona automáticamente información de sincronización a uno o más transceptores remotos asociados.

- **Multiple Address System (MAS) (Sistema de direcciones múltiples)**

Estos son sistemas de microondas de punto a multipunto que brindan a las corporaciones y otras instituciones la capacidad de respaldar sus operaciones dedicadas.

- **Network Address (Dirección de red)**

Es un identificador de un nodo o host en una red de telecomunicaciones. Estas están diseñadas para ser identificadores únicos en toda la red, aunque algunas redes permiten direcciones locales o privadas que pueden no ser únicas.

- **Point-Multipoint System (Sistema punto-multipunto)**

Una red o sistema de comunicaciones por radio diseñado con una estación de control central que intercambia datos con varias ubicaciones remotas equipadas con equipos terminales.

- **Poll (Sondeo)**

Una solicitud de datos emitida desde la computadora host (o PLC maestro) a una radio remota.

- **PLC—Programmable Logic Controller (Controlador lógico programable)**

Un microprocesador dedicado configurado para una aplicación específica con entradas y salidas discretas. Puede servir como anfitrión o como RTU.

- **RTU—Remote Terminal Unit (Unidad de terminal remota)**

Un dispositivo de recopilación de datos instalado en un sitio remoto.

II. MÉTODO

2.1. Tipo y diseño de la investigación

Tipo de investigación

Cuantitativa

Diseño de la investigación

Experimental

Nivel de la investigación

Descriptivo

Enfoque de la investigación

Estudio de Caso

2.2. Población y muestra

- ✓ **Población**

  Usuarios que viajan por la red vial de la ciudad de Lima, provincia.

- ✓ **Muestra**

  La muestra considerada son cinco intersecciones de la Av. Petit Thouars, entre la Av. 28 de Julio y Av. Alejandro Tirado; siendo estos los siguientes:

  Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio
  Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho
  Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros
  Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández
  Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado

  <u>Nivel de aleatoriedad en el flujo de tráfico</u>

  Existen dos tipos de nivel de aleatoriedad dentro de una microsimulación. Estas son determinísticas y estocásticas. Dentro del primer tipo de nivel no se plantea

lo que son las variaciones de ciertas particularidades, tanto para los vehículos, como para conductores; por ejemplo, dimensiones del vehículo, comportamiento y aptitud del conductor. Por otro lado, en el nivel estocástico solo se determina las características en base a distribuciones estadísticas (Alcalá, 2016).

Número de corridas

La microsimulación está relacionado con un número aleatorio de modelos para proporcionar los elementos no uniformes del comportamiento de los conductores (FHWA, 2019). Estos modelos se diferenciarán uno de otros, por ello es necesario conocer cuántos desarrollos se hicieron (Fellendorf, 2010). Se debe poseer un número de muestra que sea significativo. Esto representará no toda a la población, sino a parte de esta. Es por ello que se desarrolla un modelo estocástico o estadístico de tal forma que sea la más homogénea con el fin de igualarlos a toda la población (FHWA, 2019). Este estudio comprenderá el cálculo de diversos parámetros estadísticos como tipo de distribución, el margen de error y el promedio.

$$S^2 = \frac{\sum_1^N (x-\bar{x})^2}{N-1} \qquad \text{Ec. 02}$$

Donde:

S = desviación estándar

X = variable para la que se requiere la varianza de la muestra

$\bar{x}$ = promedio de los valores de x

N = número de corridas

Por recomendación de la FHWA (2019), se recomienda desarrollar este proceso mediante el uso de margen de error y un intervalo de confianza, el cual tradicionalmente es 95% (Ecuaciones 3 y 4 respectivamente).

$$e = \frac{t_{n-1,95\%}\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)}{\bar{x}} \qquad \text{Ec. 03}$$

Donde:

e = margen de error

n = número de días u observaciones

s = desviación estándar

$\bar{x}$ = promedio de los valores de x

$t_{n-1,95\%}$ = estadística t para n-1 grados de libertad con un nivel de confianza del 95%

$$IC = \bar{x} \pm \left\{ t_{n-1,95\%} \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \right\} \qquad \text{Ec. 04}$$

Donde:

IC = Intervalo de confianza

s = desviación estándar

$\bar{x}$ = promedio de los valores de x

$t_{n-1,95\%}$ = estadística t para n-1 grados de libertad con un nivel de confianza del 95%

n = número de días u observaciones

Hallados todos estos parámetros, procede a determinar el número mínimo de corridas para estos modelos:

$$N_{mín} = \left(\frac{t_{n-1,95\%} s}{e\bar{x}} \right)^2 \qquad \text{Ec. 05}$$

Donde:

$N_{mín}$ = Número mínimo de corridas

e = margen de error

n = número de días u observaciones

s = desviación estándar

$\bar{x}$ = promedio de los valores de x

$t_{n-1,95\%}$ = estadística t para n-1 grados de libertad con un nivel de confianza del 95%

Una vez desarrollado todos los parámetros estadísticos, la FHWA (2019) recomienda el siguiente proceso de análisis:

1. Desarrollar el primer modelo con un mínimo de 4 corridas.

2. Obtener los parámetros estadísticos, intervalo de confianza y margen de error.
3. Obtener el número mínimo de repeticiones con la Ecuación 05.
4. Comparar el valor obtenido con en número de corridas del modelo.
5. Si el número de corridas es mayor al mínimo, se detiene el proceso y es suficiente para la evaluación.
6. Si el último paso no cumple, repetir desde el proceso número 2 hasta que cumpla el parámetro.

2.3. Técnicas para la recolección de datos

✓ **Técnicas**

Recopilación de datos existentes, actualizados al año base de investigación de:

- la red vial de Lima,
- número, diseño y operación de intersecciones semaforizadas, y
- demandas de tráfico de la red vial

✓ **Instrumentos**

Modelo de simulación avanzada de tráfico.

2.4. Validez y confiabilidad de instrumentos

No corresponde, porque la presente investigación se basa en data primaria tomada en campo y no con encuestas.

2.5. Procesamiento y análisis de datos

1. Planificación y análisis del modelo de simulación avanzado de tráfico
2. Modelo base de desarrollo
3. Corrección de errores
4. Calibración del modelo
5. Análisis alternativos
6. Conclusiones

2.5.1. Metodología

El enfoque de investigación consiste en el desarrollo teórico, el modelado de simulación y la implementación y evaluación de campo de las estrategias propuestas. El énfasis principal en este proyecto es producir y probar en el campo algoritmos de control adaptativo operacional del tráfico en intersecciones. Por lo tanto, se hace énfasis en la metodología para abordar las cuestiones clave en la realización de este proyecto en lugar de describir una formulación de un algoritmo propuesto.

Hay varios problemas que deben abordarse en el desarrollo de algoritmos de control adaptativo que incluyen, entre otros, la filosofía de control, los requisitos de vigilancia, la formulación teórica, los requisitos computacionales, los requisitos de hardware y software del controlador, los requisitos de comunicaciones y las interfaces con otros sistemas (por ejemplo, TMC de autopistas) para gestión integrada de corredores u otros TMC de Agencias locales para control multi-jurisdiccional. Las cuestiones clave para el desarrollo y la evaluación de estrategias de control adaptativo se analizan a continuación.

- **Desarrollo de estrategias de control adaptativo**

El enfoque para desarrollar un algoritmo de control adaptativo, es seleccionar la estrategia de control más prometedora de todas las existentes identificadas en la literatura y diseñar e implementar nuevas funciones y características que se requieren para satisfacer las necesidades y requisitos de los lugares de prueba seleccionados y que son representativos de arterias principales (incluidos los corredores arteriales en tramos de autopista). Algunas consideraciones clave incluyen:

Filosofía de control: la suposición común, es que el control adaptativo cambia continuamente la configuración de la señal del semáforo, para que coincida con los patrones de tráfico medidos (o previstos) en la red. Sin embargo, este enfoque puede no ser beneficioso en condiciones de congestión porque puede crear embotellamientos por colas (*spillbacks*) aguas arriba de las intersecciones críticas. Además, la coordinación con rampas de autopistas con sensores adyacentes o rampas de salida congestionadas, puede necesitar anular la adaptación “ciega” a los patrones de tráfico en la arteria

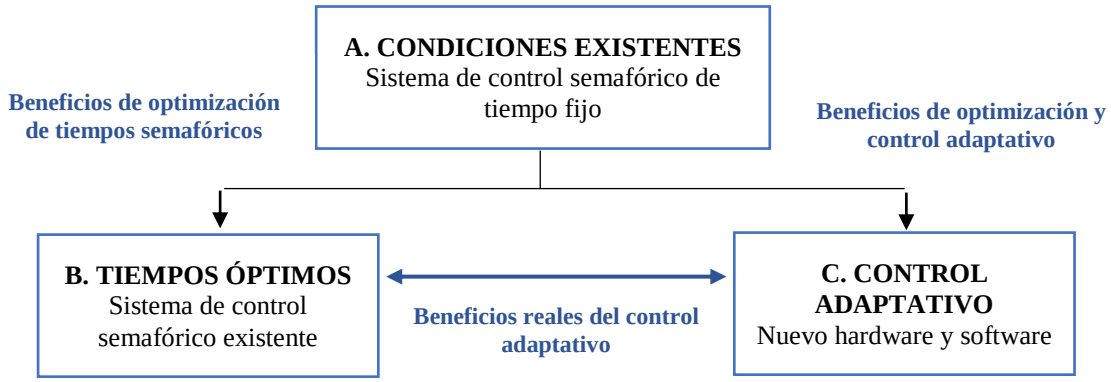
principal. Es fundamental comprender la diferencia entre ***"controlar"*** y ***"adaptar"***, para diseñar un algoritmo que satisfaga los objetivos y las limitaciones para el área específica del proyecto (Skabardonis A., Comes G.; 2010).

Requisitos de vigilancia: la eficacia del control adaptativo depende de la disponibilidad y precisión de los datos sobre las condiciones del tráfico, es decir, *el tamaño, la forma y la velocidad de los pelotones de flujo que se acercan a la intersección*. El costo de instalación y mantenimiento de los sistemas de vigilancia convencionales (detectores de lazo-bucle) es muy elevado, especialmente para los sistemas que requieren múltiples puntos de detección en intersecciones aguas arriba, lo que dificulta enormemente el desarrollo generalizado de tales sistemas. Investigaremos el potencial de las nuevas tecnologías de detectores y cómo pueden funcionar con los algoritmos adaptativos para Centrales de Control de Tráfico – TMCs.

- **Evaluación de las estrategias de control adaptativo propuestas**

El objetivo de la evaluación es cuantificar los beneficios del control adaptativo en TMCs. Es importante diferenciar entre los beneficios del control propuesto (con nuevo hardware y software) frente a: *A. el sistema de control semafórico existente con configuraciones actuales de tiempo fijo* y, *B. el sistema de control semafórico tecnológico existente con configuraciones de tiempo óptimas para estimar los verdaderos beneficios del control adaptativo*. La Figura 20 ilustra la metodología propuesta:

Figura 20. Medición de los beneficios del control semafórico adaptativo



- La comparación de A versus B, proporciona los beneficios debido al funcionamiento óptimo del sistema con el hardware existente y la estrategia de control (por ejemplo, planes semafóricos de tiempo fijo)
- La comparación de A versus C, proporciona los beneficios totales debido al control adaptativo de las condiciones tecnológicas existentes.
- La comparación de B versus C proporciona los verdaderos beneficios del control adaptativo de la TMC.

Fuente: Adaptado de Skabardonis A., Comes G.; 2010. Figure 3.1.

Las medidas de efectividad (MOEs en sus siglas en inglés) para la ***evaluación de las estrategias*** alternativas incluyen: *tiempos de viaje, demoras y número de paradas en enlaces arteriales e intersecciones semaforizadas*. Las ***medidas del sistema*** pueden incluir: *VKT (vehículos-kilómetros recorridos), VHT (vehículos-horas recorridas)* y fallas de ciclo semafórico. Las ***medidas energéticas*** y ***medioambientales*** pueden incluir: el *consumo excesivo de combustible y las emisiones de los vehículos (CO, HC y NOx)*. Estas medidas medioambientales suelen derivarse de las principales medidas de rendimiento de los tiempos de viaje, demoras y paradas.

También es importante considerar los impactos en el tráfico de la estrategia o estrategias propuestas en cada componente del sistema. Por ejemplo, *es bien sabido que la coordinación de señales semafóricas, mejora el rendimiento del tráfico que fluye a través de la arteria principal a expensas de las calles transversales* (Skabardonis A., Comes G.; 2010). Por lo tanto, el plan de evaluación analizará las medidas de desempeño por separado en:

- Flujos de tráfico en enlaces arteriales directos
  - tiempo de viaje (velocidad)
  - demora
  - número de paradas (% de vehículos detenidos)
- Cruce de las calles transversales
  - longitud de la cola
  - demora
- Sistema total
  - VKT
  - VHT
  - fallas de ciclo semafórico
  - consumo de combustible
  - emisiones

2.5.2. Modelado de simulación

El desempeño de las estrategias de control existentes y propuestas se evaluará primero mediante simulación. La simulación proporciona varios atributos atractivos, incluida la capacidad de evaluar el rendimiento del sistema en una amplia variedad de condiciones de tráfico. La simulación permite variar muchas características del sistema, incluidos *los volúmenes, las proporciones de giro, las tasas de flujo de saturación (que pueden cambiar debido a las condiciones climáticas) y eventos como cierres de carriles, adelantamientos, etc.* Sin embargo, es importante darse cuenta de que la simulación generalmente no lo hace. Apoyar las pruebas de problemas operativos, como errores del detector. Esto se puede aproximar probando el rendimiento del algoritmo con datos del detector menos que ideales, pero aún no podemos analizar los efectos de las pérdidas de datos aleatorios. Hay varias consideraciones importantes en la evaluación de estrategias de control a través de la simulación:

- **Selección de modelo**

Hay una serie de herramientas de simulación disponibles para modelar operaciones de semáforos en arterias y redes. Los modelos existentes se pueden clasificar en

macroscópicos y microscópicos. Los modelos macroscópicos consideran las tasas de flujo promedio en la red y utilizan relaciones analíticas para modelar el flujo de tráfico. Los modelos microscópicos, por el contrario, simulan el movimiento y las interacciones de vehículos individuales. La micro simulación se ha seleccionado para este proyecto de investigación, porque las estrategias de control semafórico que se están considerando a menudo reaccionan a eventos de un solo vehículo. Por ejemplo, la operación de señal del semáforo activada, monitorea los *detectores de avance* y puede *extender el tiempo en verde* si un vehículo es registrado por un *detector de aproximación* activo. Tales efectos son difíciles de reproducir en simulación macroscópica.

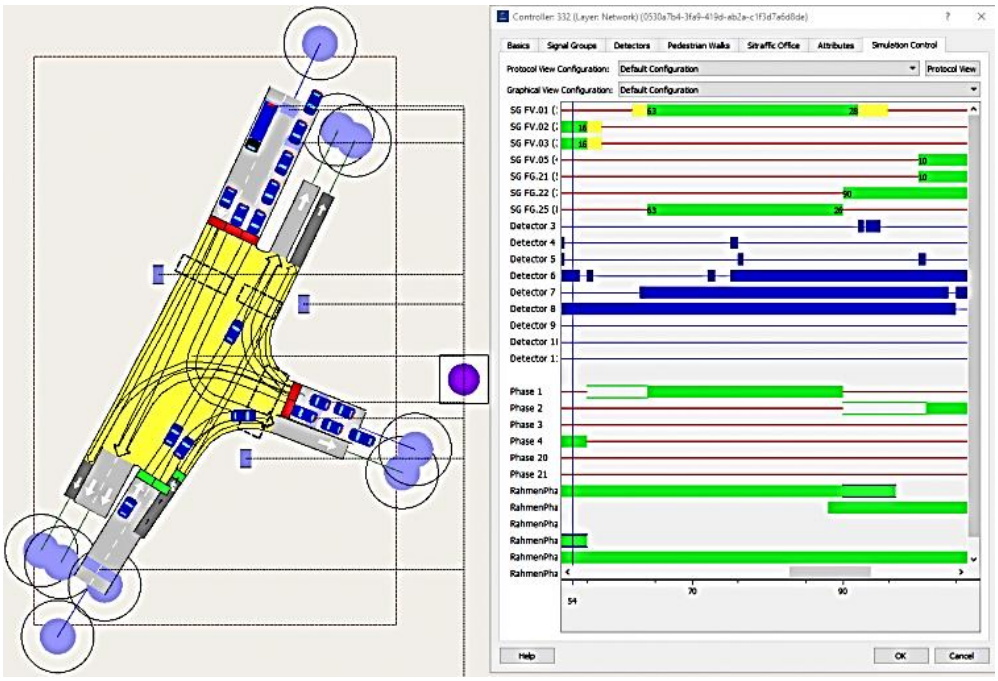
Entre los diversos modelos microscópicos disponibles, AIMSUN Next 20 fue seleccionada como la herramienta principal para modelar estrategias de control porque permite modelar redes de transporte pequeñas y grandes: desde una única intersección hasta una región completa; y luego, simular los viajes que la gente quiere hacer y combinarlos con las opciones de transporte disponibles como taxis, autobuses, autos compartidos, bicicletas o incluso caminar. Aimsun Next le permite realizar evaluaciones de operaciones de tráfico de cualquier escala y complejidad. Las aplicaciones son infinitas, pero las relacionadas con fines de esta investigación son:

- Optimización del plan de control de señales semafóricas y evaluación del control adaptativo
- Sistemas de transporte inteligente (ITS)

- **Interfaces de control de señales semafóricas**

Las interfaces de control de semáforos proporcionan enlaces a sistemas de control de tiempos del semáforo dinámico, de modo que sus algoritmos se pueden incorporar en una simulación y las señales semafóricas *se establecen en respuesta a las condiciones de la red de tráfico*. Aimsun Next tiene interfaces para software especializado en optimización de tiempos, fases y desfases de redes semafóricas como: LISA +, SCATS, Siemens UTC System (con SCOOT), UTOPIA y VS-PLUS, que permiten una emulación precisa del control adaptativo.

Figura 21. Emulación de control adaptativo en AIMSUN Next



Fuente: Adaptado de aimsun.com

- **Calibración de condiciones de línea base**

El primer paso en el modelado de simulación de estrategias es calibrar el modelo de simulación con las mediciones de campo para asegurar que el modelo de simulación replica las condiciones de campo. La calibración del modelo es un proceso complejo dados los numerosos parámetros en los modelos de simulación microscópica. La calibración del modelo se llevará a cabo de acuerdo con las pautas desarrolladas por el Manual de Usuario del Software (*AIMSUN Next 20, User Manual*), cuyas características se presentan a continuación:

En los sistemas de tráfico, el comportamiento del sistema real generalmente se define en términos de las variables de tráfico, flujos, velocidades, ocupaciones, longitudes de cola, etc., que pueden medirse mediante detectores de tráfico en ubicaciones específicas de la red vial. Para validar el modelo de simulación de tráfico, *el simulador debería poder emular el proceso de detección de tráfico y producir una serie de observaciones simuladas*. Luego se utiliza una comparación estadística con las mediciones reales para determinar si se logra la precisión deseada en la reproducción del comportamiento del sistema. Los principales componentes de un modelo de microsimulación de tráfico son:

- La red vial:
  - La representación geométrica exacta de la red vial (perfil longitudinal, transversal, alturas, radios de giro y secciones), tramos especiales (básicos y heterogéneos), las intersecciones y los movimientos de giro.
  - La inclusión de esquemas de gestión del tráfico que controlen la velocidad de los vehículos, el movimiento de giro, permitido y de los esquemas de control del semáforo (fases, tiempos, desfases) y los detectores puestos en la red vial asociados, señales de control y de mensaje variable.
- Demanda de tráfico:
  - Patrones de flujo en secciones de entrada al modelo de la red vial y porcentajes de giro en las intersecciones.
  - Matrices de OD distribuidas en el tiempo para cada tipo de vehículo
  - Modelos de asignación de tráfico dinámico que controlan la elección de ruta.
  - Balanceo de volúmenes de tráfico para compensación de la red vial.
- Modelos de comportamiento de vehículos individuales
  - Seguimiento de vehículos, cambio de carril, aceptación de brechas, etc.

Todos estos componentes interactúan y ninguno debe tomarse de forma aislada para calibrar y validar una red. Sin embargo, existe un proceso en la construcción de un modelo y se toman las acciones apropiadas para calibrarlo en cada paso. Existen numerosas pautas para ayudar a los modeladores a satisfacer las expectativas de sus partes interesadas en la construcción de modelos. Ejemplos incluyen:

- La sección 3 de la caja de herramientas de análisis de tráfico de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos – FHWA, cubre en particular el uso de herramientas de microsimulación (FHWA, 2019).
- Transport for London (Reino Unido) Directrices de modelado del Centro Transporte para Londres – TfL que establecen una guía de modelado y auditoría para evaluaciones de transporte (TfL, 2010).

Se puede encontrar una revisión de las directrices en el Caso de directrices de Multitude Project (Antoniou C., et al., 2014). Este esquema de calibración del modelo discutirá 4 etapas:

1. *Verificaciones estáticas*. Construir el modelo de la red vial y verificarlo estáticamente.

2. *Comprobaciones dinámicas en una simulación en ejecución.*
3. *Estimación de la demanda de viajes.*
4. *Comparación estadística con datos observados.*

1. Construcción de modelo y verificación estática

El editor gráfico de Aimsun Next ha sido diseñado para ayudar al usuario a construir el modelo de red vial. Las redes se pueden construir superponiendo manualmente secciones y uniones en una imagen de fondo importada de un Sistema de Información Geográfica – SIG, de una base de datos de mapas como OpenStreetMap (OSM), que también importará las características de la red como: las clasificaciones viales, las velocidades y los carriles, y conectará las secciones en las intersecciones. Una vez creada la red, se han incluido los tramos correctamente configurados en la clasificación vial, con restricciones de carriles y velocidad, así como los diversos dispositivos existentes como: señales de mensajes variables – VMS, detectores y paradas de autobus; la red se puede verificar estáticamente con la herramienta *Check and Fix Network*. Esto validará la verificación de la red para verificar la consistencia y cualquier error como secciones desconectadas, giros en conflicto, etc. De esta manera, Aimsun Next proporcionará un nivel más alto de validación de red semiautomática que el que se puede lograr mediante la inspección visual de un modelador.

2. Controles dinámicos

Durante una simulación, las comprobaciones dinámicas que se pueden realizar son, utilizar las salidas de las replicaciones (corridas del modelo) para observar el número de vehículos perdidos en la simulación o que faltan en un giro, *lo que es indicativo de problemas de calibración*. Verificaciones similares a simple vista incluyen: buscar áreas de frenado fuerte o simplemente observar la simulación en modo animado con conocimiento previo de la situación en la red vial.

3. Estimación de la demanda de viajes

La demanda de viajes es posiblemente el componente más importante del modelo para lograr la calibración. La estimación de la demanda a partir de los datos observados es una parte importante de un proyecto de modelado de transporte, y Aimsun Next ofrece algunas herramientas para ayudar con el proceso. Sin embargo,

tenga en cuenta que estimar la demanda de un modelo pequeño, puede ser tan simple como ingresar un conjunto de recuentos de secciones y convertirlos en un *estado de tráfico*[21]. Alternativamente, puede requerir flujos de trabajo complejos en un *modelo de cuatro etapas* de varios niveles, con varias iteraciones, para generar una estimación sólida de la demanda de múltiples clases de usuarios en matrices desagregadas.

4. Validación

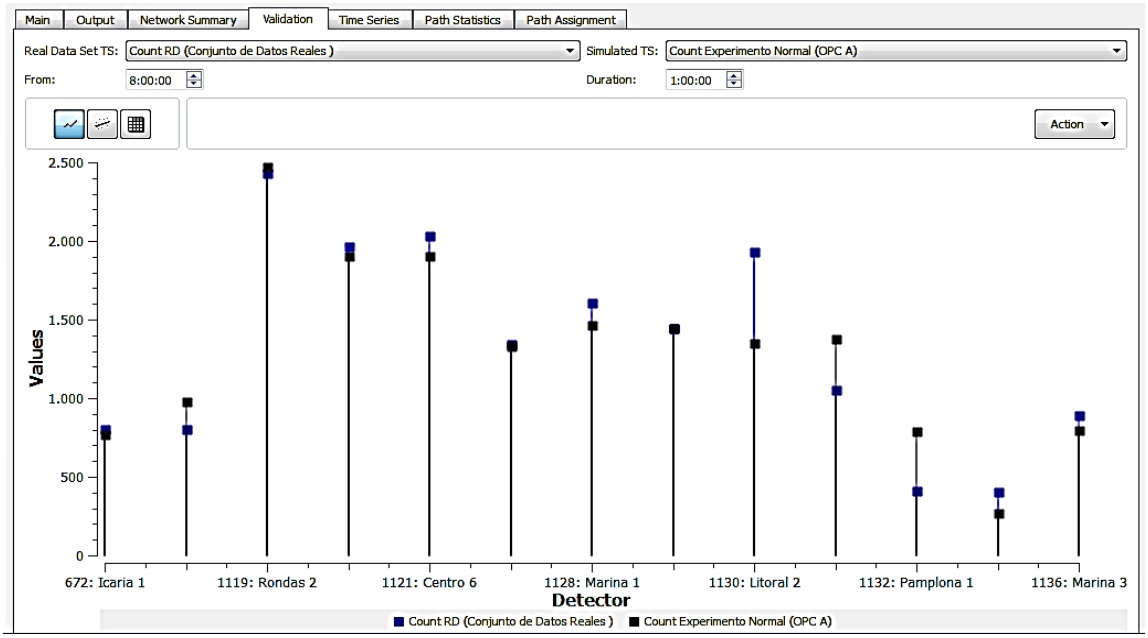
Una vez que se ha ejecutado una simulación basada en un vehículo o se ha calculado un promedio de simulaciones, el editor de replicación, el editor de resultados o el editor de promedio tienen datos en la *carpeta de Validación*. El objetivo de esta carpeta es poder comparar los resultados de la simulación con los *Datos Reales* definidos para el Escenario (p.j. situación actual, de base o sin proyecto). Una vez que se define el conjunto de datos reales y los datos simulados están disponibles, la carpeta de Validación se verá como la de la Figura 22, siguiente. La *Serie de tiempo* del conjunto de datos reales y la simulada, se seleccionan en el menú desplegable y se muestran de 3 formas:

- Como un grafico
- Como análisis de regresión
- Como una tabla

Para mostrar los datos del conjunto de datos reales frente a los datos simulados como un gráfico, vea la Figura 22.

[21] En un estado de tráfico en Aimsun Next, los datos de demanda se componen de los flujos de entrada en las secciones de entrada y las proporciones de giro en cada nodo de la red. Ambos se pueden definir por tipo de vehículo. Estos datos pueden obtenerse como resultado de un modelo de asignación previo, a partir de datos observados recogidos por detectores o definidos por el usuario como hipótesis experimental.

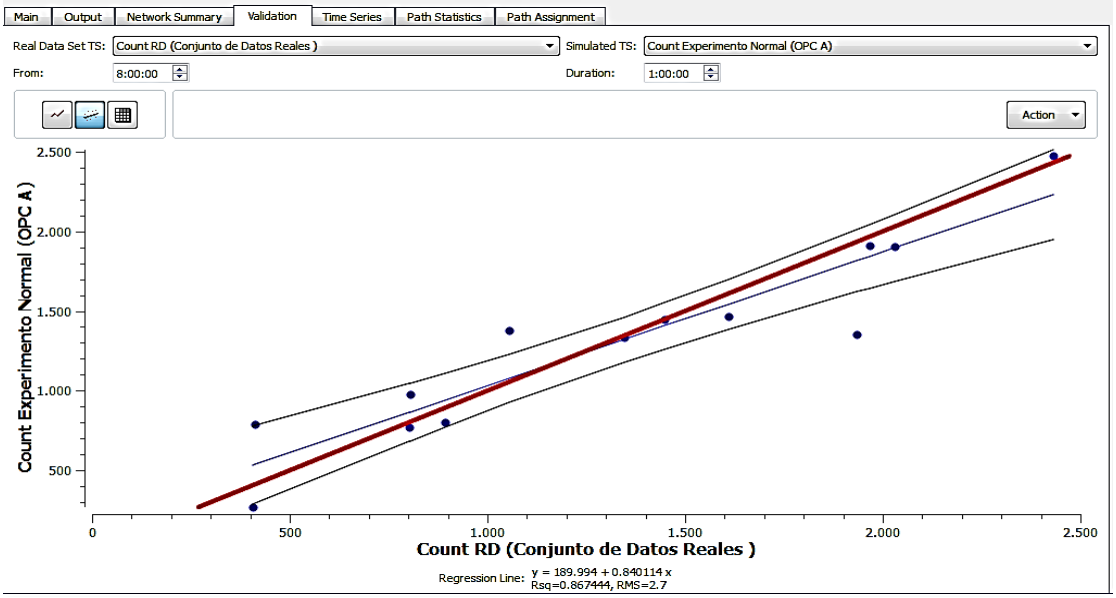
Figura 22. Serie de tiempo que valida el conjunto datos reales versus la salida del experimento con el detector de tráfico



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

Para mostrar una regresión lineal del conjunto de datos reales frente a los datos simulados, vea la Figura 23. Se muestra información sobre la línea de regresión lineal, R_{sq} (coeficiente de determinación, R cuadrado) y RMS.

Figura 23. Serie de tiempo que valida el conjunto datos reales versus la salida del modelo



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

La tercera opción es mostrar los datos reales frente a los datos de la simulación, en una vista de tabla. Aimsun Next calcula automáticamente la diferencia absoluta y la diferencia relativa de cada par de valores y colorea las celdas de los relativos diferentes según su valor, para dar una impresión visual fácilmente asimilable de dónde se encuentran las principales desviaciones.

Figura 24. Comparación de resultados estadísticos de simulación versus datos reales, con fines de calibración del modelo

Main | Output | Network Summary | Validation | Time Series | Path Statistics | Path Assignment

Real Data Set TS: Count RD (Conjunto de Datos Reales) Simulated TS: Count Experimento Normal (OPC A)

From: 8:00:00 Duration: 1:00:00

Action

	Object	Count RD (Conjunto de Datos Reales)	Count Experimento Normal (OPC A)	Absolute Difference	Relative Difference (%)
1130: Litoral 2	1130: Litoral 2	1935	1354	-581	-30,0258
1132: Pamplona 1	1132: Pamplona 1	413	788	375	47,5888
1131: Litoral 1	1131: Litoral 1	1056	1380	324	23,4783
673: Icaria 2	673: Icaria 2	805	978	173	17,6892
1128: Marina 1	1128: Marina 1	1610	1468	-142	-8,81988
1133: Badajoz 1	1133: Badajoz 1	407	269	-138	-33,9066
1121: Centro 6	1121: Centro 6	2031	1906	-125	-6,1546
1136: Marina 3	1136: Marina 3	892	799	-93	-10,426
1120: Rondas 1	1120: Rondas 1	1968	1908	-60	-3,04878
1119: Rondas 2	1119: Rondas 2	2430	2473	43	1,73878
672: Icaria 1	672: Icaria 1	803	771	-32	-3,98506
1123: Centro 5	1123: Centro 5	1345	1333	-12	-0,892193
1129: Marina 2	1129: Marina 2	1448	1445	-3	-0,207182
Mean	Mean	1318,69	1297,85	-20,8462	-1,58082

Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

Además de la información que se muestra en la carpeta Validación, se pueden calcular otros dos estadísticos de validación:

- Estadístico de Theil
- Estadístico GEH

Theil's U

El estadístico U de Theil es una medida de precisión relativa que compara los resultados simulados (Y) con los datos reales (X). Se calcula de la siguiente manera:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(w_j - v_j)^2}{m}}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(w_j)^2}{m}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(v_j)^2}{m}}} \qquad \text{Ec. 06}$$

Dónde:

w: es el flujo simulado

w_{ij}: es la salida del modelo de simulación que se caracterizará por el conjunto de valores *ij*, del flujo simulado en el detector *i* en el momento *j*, donde el índice *i* identifica al detector y el índice *j* el intervalo tiempo de muestreo.

v_{ij}: son las medidas reales correspondientes para el detector *i* en el intervalo de tiempo de muestreo *j*.

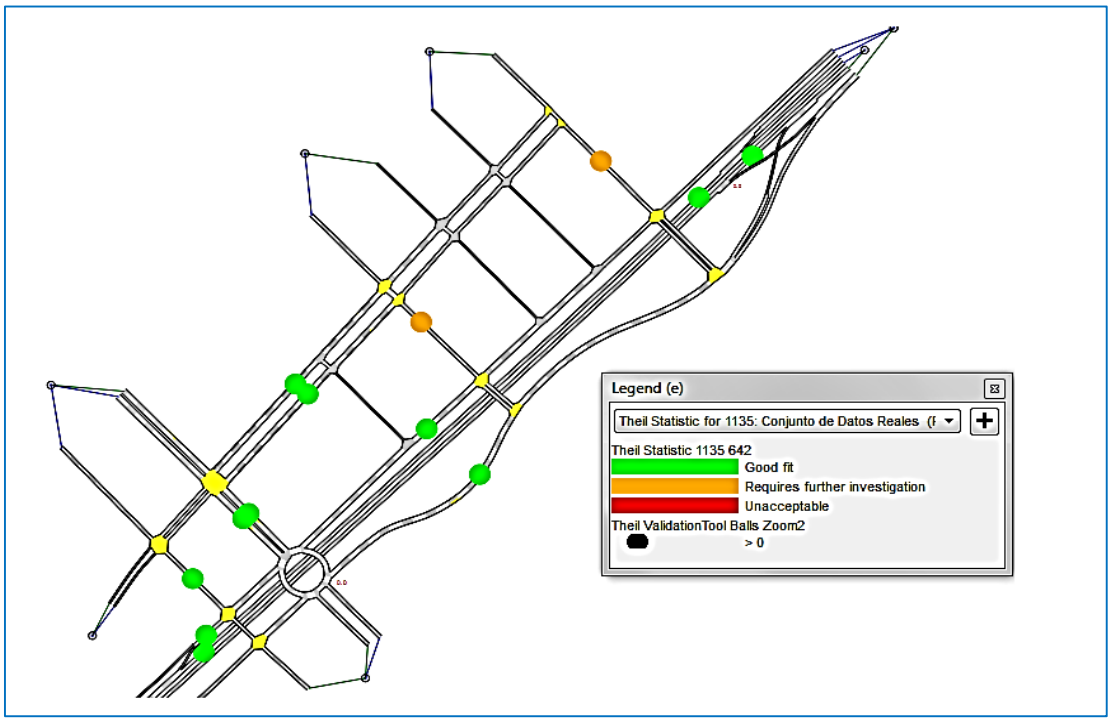
m: número de intervalos de tiempo

En Aimsun Next 20, para calcular la estadística de Theil para cada detector, seleccione la *opción Acción: Calcular Theil*. Una vez seleccionado, se crearán automáticamente dos modos de visualización. *a) Estadística de Theil para la replicación*, dónde la calcula para cada detector y devuelve 4 valores posibles:

- Negro: no aplicable. No hay datos para el detector.
- Verde: buen ajuste. La U de Theil está entre 0 y 0,2.
- Naranja: requiere más investigación. La U de Theil está entre 0,2 y 0,7.
- Rojo: inaceptable. La U de Theil es mayor que 0,7.

b) Estadística discreta de Theil, similar al modo de vista anterior con la diferencia de que incluye el signo de la diferencia entre las mediciones reales y simuladas. El modo de vista Estadístico U de Theil se selecciona en la vista 2D como se muestra en la Figura 25 siguiente.

Figura 25. Vista del resultado de calibración del modelo con el Estadístico U de Theil



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

GEH para Aimsun

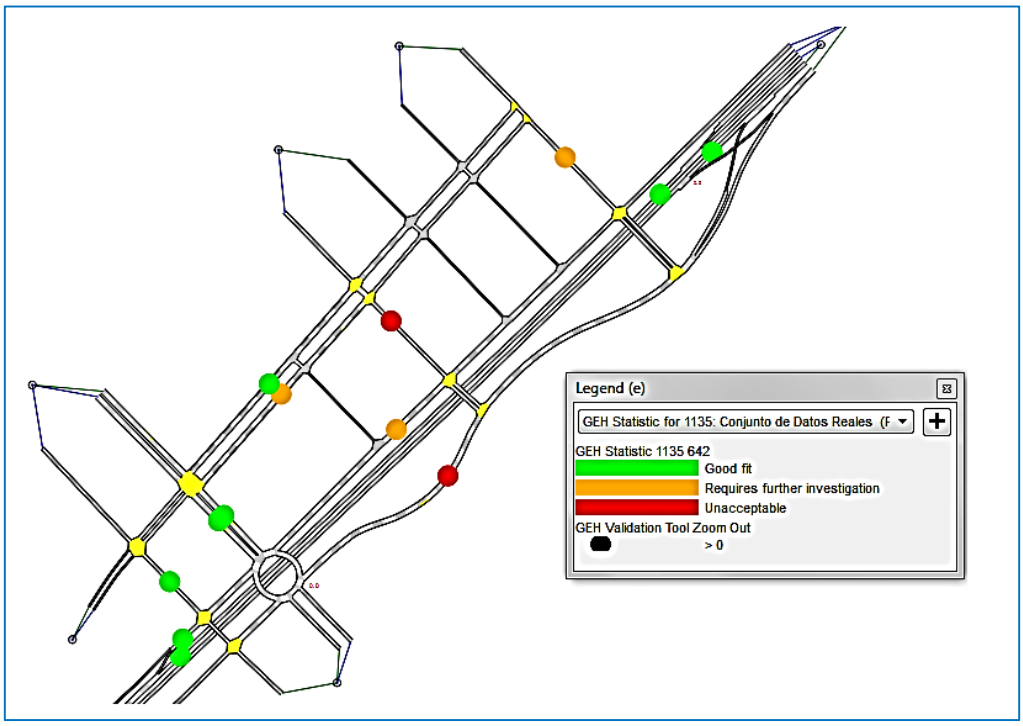
El estadístico GEH se utiliza en Ingeniería de Tráfico para comparar dos conjuntos de datos de tráfico. Aunque su forma matemática es similar a una *prueba de chi-cuadrado*, no es una verdadera prueba estadística. Es una fórmula empírica que ha demostrado ser bastante definida en la Ecuación 06.

Para calcular el estadístico GEH para cada detector, seleccione la opción *Acción: Calcular GEH*. Se crean automáticamente modos de visualización similares a los del estadístico de Theil. Los límites de GEH se definen utilizando los siguientes rangos:

- 0-5: buen ajuste (verde, valor 0)
- 5 - 10: Requiere mayor investigación (valor naranja 1)
- > 10: inaceptable (valor rojo 2)

Se crean automáticamente dos tipos de modos de visualización para el estadístico GEH, que lo muestra mediante una simple pantalla Roja, Ámbar, Verde.

Figura 26. Vista del resultado de calibración del modelo con el Estadístico GEH

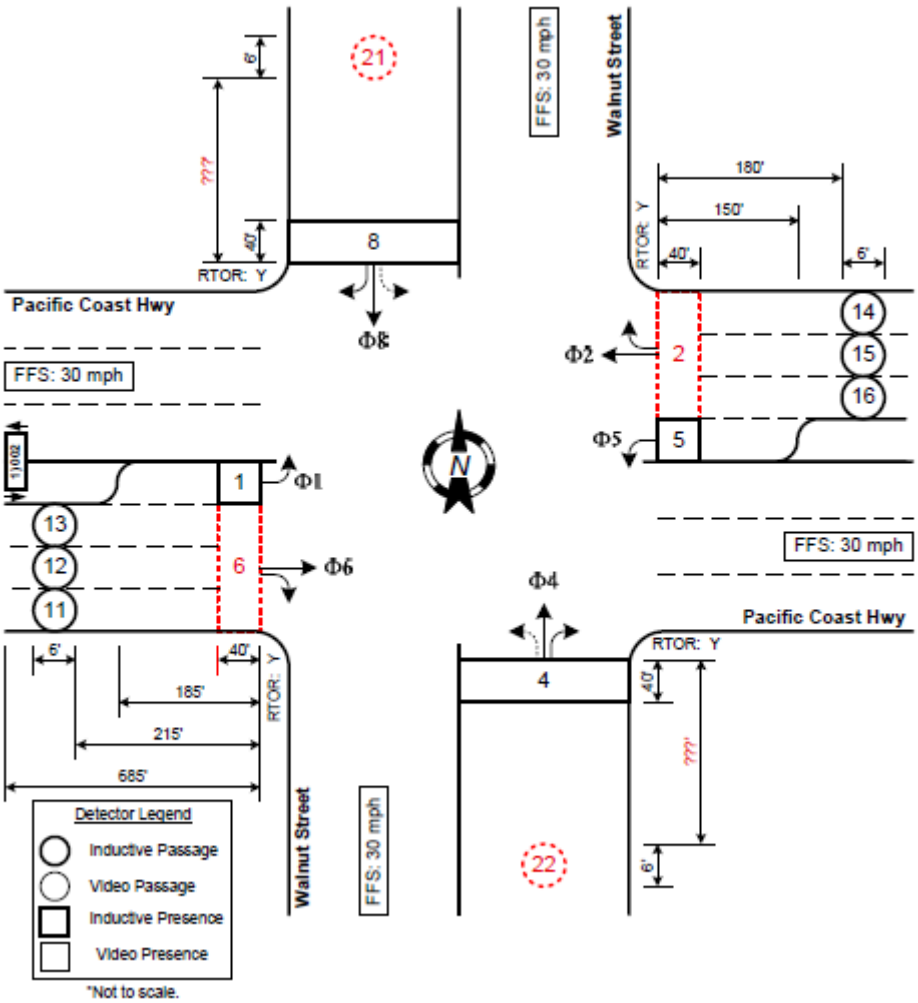


Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

- **Patrones de detección**

Los patrones de detección producen un *efecto reproducible en un detector*, como si un vehículo de un tipo, longitud particular (y posiblemente una línea de transporte público) hubiera estado presente en un detector dado, *en un momento particular, durante una duración particular y viajando a una velocidad particular*. Los patrones de detección permiten la recopilación de eventos de detección para almacenarlos y reproducirlos en simulaciones posteriores. Los patrones de detección son útiles, pero no se limitan a, *probar planes de control adaptativo* sin aplicar una demanda de tráfico, lo que le da al desarrollador un control completo sobre las entradas a un plan de control semafórico para ayudar a la depuración exitosa.

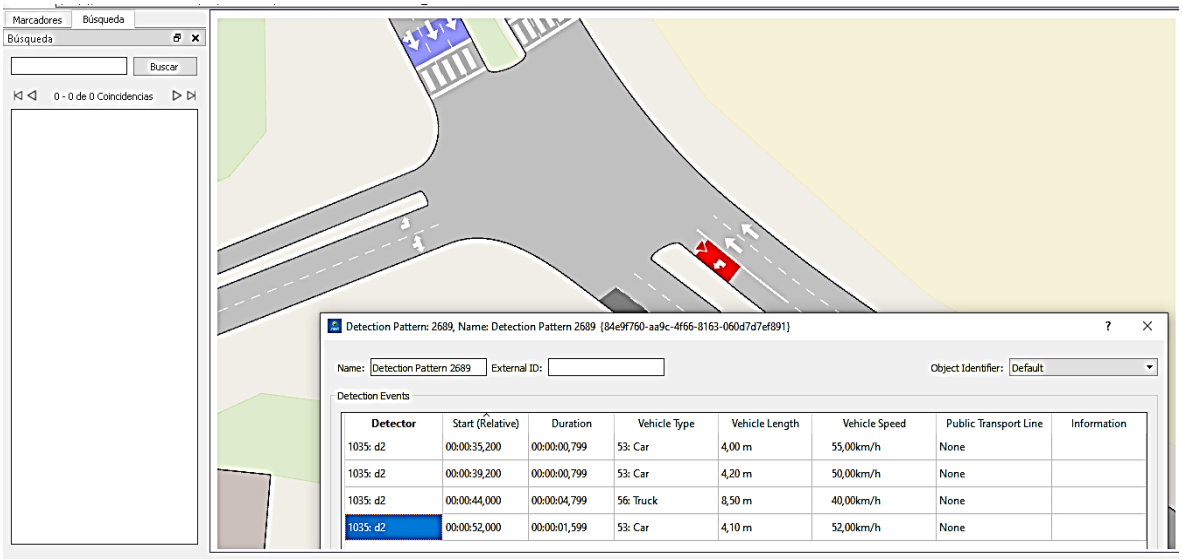
Figura 27. Configuración típica de geometría y detectores asignados a una intersección semaforizada



Fuente: Skabardonis A., Comes G.; 2010. APPENDIX A

En Aimsun Next 20, si se está ejecutando una simulación animada cuando el *editor de patrones de detección está abierto y se crea un evento de detección*, los tiempos asociados con el evento de detección serán los tiempos de simulación actuales. Los patrones de detección se pueden crear sin una simulación activa, pero todos los tiempos deberán ingresarse manualmente.

Figura 28. Patrones de detección en Aimsun Next 20



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

- **Estrategias de control adaptativo SCATS en Aimsun Next 20**

Sydney Coordinated Adaptive Traffic System, abreviado SCATS, es un sistema inteligente de transporte que gestiona la sincronización dinámica (en línea, en tiempo real) de las fases en las señales semafóricas; lo que significa que, intenta encontrar la mejor fase – es decir, tiempos de ciclo (*cycle*), repartos (*splits*) y desfases (*offsets*) – para una situación de tráfico (para intersecciones individuales, así como para toda la red). SCATS se basa en la selección automática de planes semafóricos de una librería, en respuesta a los datos derivados de los detectores de bucle u otros sensores de tráfico.

Arquitectura

La comunicación es entre Aimsun Next y WinTraff. Wintraff es un software que emula el funcionamiento de hasta 250 controladores de semáforos, compatibles con SCATS, desarrollado por la organización *Road and Maritime Services* en Nueva Gales del Sur (NSW), Australia. Esta comunicación entre procesos, utiliza un *modelo cliente-servidor* donde el *canal de comunicación se realiza mediante sockets (TCP/IP)*, con Aimsun Next actuando como servidor y el proceso WinTraff actuando como cliente.

Relación entre los objetos Aimsun Next y los objetos SCATS

Para garantizar una conexión correcta entre Aimsun Next y SCATS, es esencial que los objetos SCATS, como semáforos y detectores, se correspondan con los objetos Aimsun.

Por lo tanto, se deben cumplir las siguientes reglas para intersecciones, semáforos, detectores y el plan de control semafórico.

- *Intersecciones SCATS*: Cada intersección SCATS debe estar representada en Aimsun Next como un controlador de tipo SCATS.
- *Una intersección SCATS puede estar representada por una o más uniones Aimsun*. El controlador SCATS debe estar conectado a todos los cruces Aimsun que forman la intersección SCATS.
- *Grupos de señales semafóricas SCATS*: El modelo Aimsun debe contener la misma definición de grupos de señales semafóricas que el modelo SCATS con los mismos giros asociados.
- *Cada detector SCATS debe tener un detector correspondiente en el modelo Aimsun*. El detector modelado debe tener, al menos, recuento de vehículos y ocupación, así como, capacidades de medición.
- *Para cada intersección controlada por SCATS*, el tipo de control debe establecerse en Externo y se debe proporcionar un plan de control pre-programado o fijo con la definición de todas las fases y su duración.

Detectores SCATS

SCATS tiene dos tipos de detectores:

- Detectores físicos: que miden "recuento" y "ocupación".
- Detectores lógicos (balizas): identifican los vehículos de transporte público y están asociados a un detector físico y un conjunto de líneas de transporte público.

Cada detector físico en SCATS (detector físico en sí o el detector físico asociado con un detector lógico), debe modelarse como un detector en el modelo Aimsun. Si este detector corresponde a un detector físico, entonces el detector modelado debe tener, al menos, *Conteo y Ocupación* como capacidades de medición; y si este detector representa un detector físico asociado con un detector lógico, entonces el detector modelado debe tener, al menos, *Vehículo equipado* como una capacidad de medición. Todas las líneas de transporte público asociadas con detectores lógicos, deben modelarse como líneas de transporte público con vehículos 100% equipados. Tenga en cuenta que la longitud del detector está fuertemente relacionada con la ocupación medida. La longitud del detector modelado debe adaptarse para coincidir con las ocupaciones SCATS esperadas.

Depuración

La interfaz SCATS puede configurarse para producir información de depuración. Esta opción se selecciona en el *Editor de escenarios*. Cuando esta opción está activa, Aimsun Next generará archivos de registro almacenados en la misma carpeta que el documento Aimsun Next. Los nombres de los archivos son (donde X representa el puerto de comunicación de los controladores). Se puede generar una salida de depuración adicional de un controlador SCATSim y luego usarla como entrada a una unión controlada por SCATS para reproducir el mismo patrón de señales, sin vincularlo a SCATSim. Esto está documentado en la Sección del controlador. Estos archivos de registro se crearán en la carpeta que contiene el *archivo.ang* del modelo y se denominarán *prefijo + _id.txt* donde *id* es el ID de intersección de SCATS.

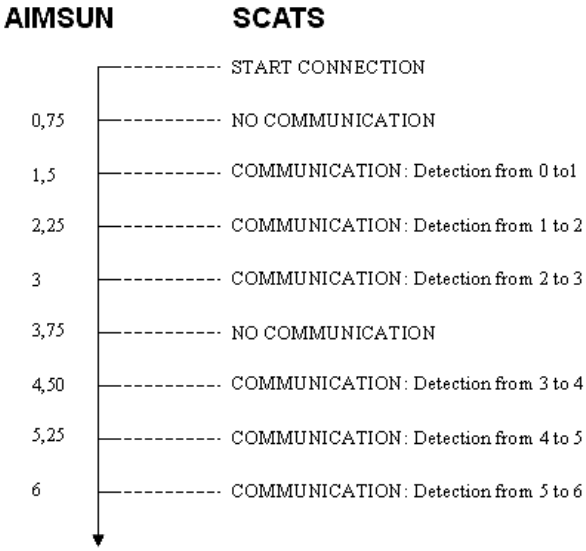
Aimsun Next: intercambio de información SCATS

Aimsun Next proporciona a SCATS los datos de activación del detector en cada paso de la simulación y SCATS responde con los cambios de estado del grupo de señales semafóricas, asumiendo que al comienzo de la simulación todos los grupos de señales están en rojo. Para garantizar que Aimsun Next y SCATS permanezcan en sintonía, los *tokens de sincronización* se pasan entre ellos en cada paso de la simulación. SCATS asume que se realiza una transferencia de datos cada segundo; y hay 1 segundo de datos disponible desde el detector. Por lo tanto, *el ciclo de detección debe establecerse en 1 segundo*. Si el paso de simulación no es de 1 segundo, los datos se envían lo antes posible siguiendo las *reglas de sincronización de datos*.

Reglas de sincronización de datos

Aimsun Next y la mayoría de los controladores adaptativos, intercambian información cada segundo, esto es un requisito del controlador. Esto implica que el ciclo de detección en Aimsun Next debe ser de un segundo. Como esto es independiente del paso de simulación, la comunicación se basa en enviar la información de un segundo detector en el primer paso de simulación después de que esté disponible. La Figura 29 ilustra cuándo se realiza la comunicación con el controlador, utilizando 0,75 s como paso de simulación:

Figura 29. Comunicación de datos del detector con el controlador del semáforo

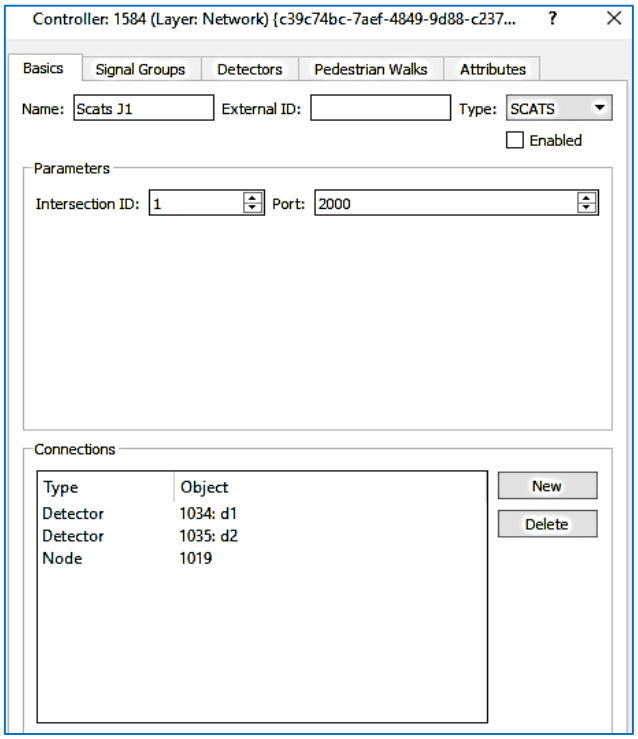


Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

Definición de objetos SCATS en Aimsun Next

La definición de los objetos SCATS especifica un controlador SCATS en el modelo para cada intersección. El primer paso es seleccionar el *editor Adaptive Controller* para un controlador SCATS.

Figura 30. Controlador adaptativo SCATS



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

En la pestaña Básicos las opciones son:

- *ID de intersección*: el identificador de intersección SCATS correspondiente al cruce vinculado a este controlador.
- *Puerto*: este número de puerto de comunicación define la comunicación entre Aimsun Next y SCATS (esto es común a todos los controladores SCATS).
- *Conexiones*: define las conexiones entre el controlador y los dispositivos bajo su control. Los enlaces se realizan mediante el botón Nuevo o la herramienta Conexión. Todos los nodos y detectores controlados por *SCATS Intersection* deben estar conectados.

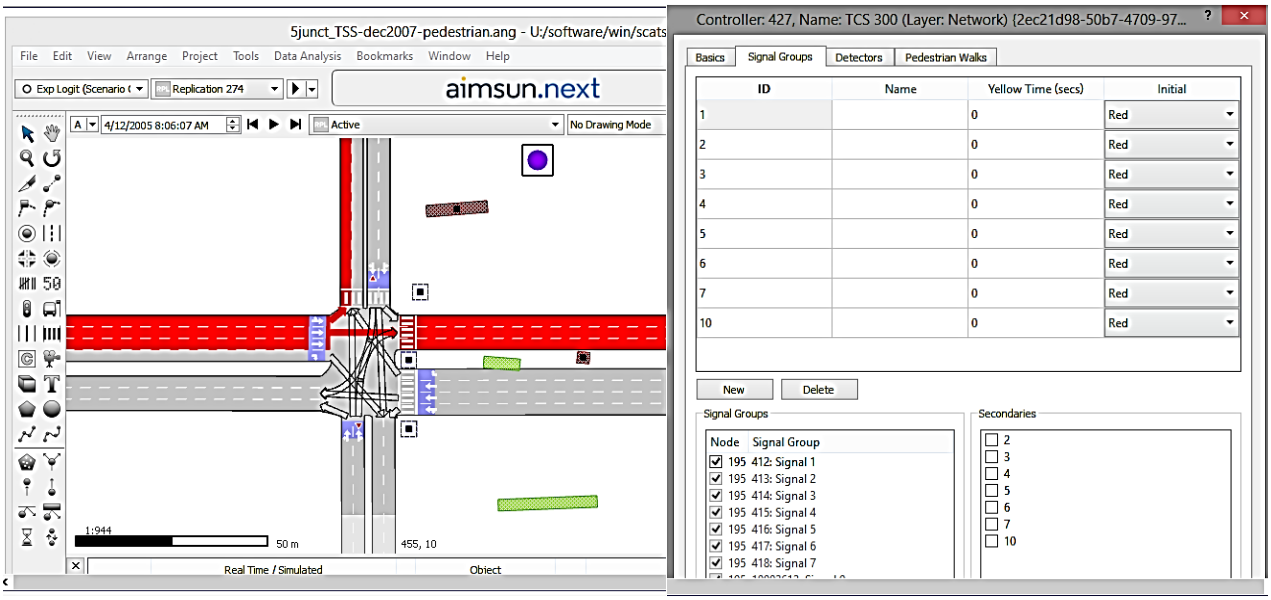
Tabla de grupos de señales semafóricas

El segundo paso es establecer cómo el controlador "ve" los diferentes grupos de señales. Cada grupo de señales SCATS tiene:

- *ID:* es el identificador del grupo de señales SCATS. En un controlador, estos identificadores deben ser consecutivos y comenzar desde 1. Estos identificadores determinan el orden en que Aimsun Next recibe su estado, y este orden debe ser el mismo que tiene SCATS en su configuración.
- *Nombre:* es el nombre del grupo de señales SCATS (opcional).
- *Tiempo amarillo:* no se utiliza.
- *Inicio:* es el estado inicial del grupo de señales SCATS al comienzo de la simulación.

Un conjunto de grupos de señales semafóricas Aimsun, se puede asociar con *un solo grupo SCATS* para que puedan controlarse juntos. El siguiente ejemplo muestra la señal con SCATS ID 1 vinculada al grupo de señales semafóricas 1 en la simulación.

Figura 31. Grupo de señales semafóricas AIMSUN con SCATS



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

Tabla de detectores

El tercer paso es establecer los enlaces del controlador a los detectores asociados. Para agregar un nuevo detector SCATS:

- Haga clic en el botón Nuevo,
- establecer la ID y
- seleccione un detector de la lista de detectores conectados al controlador.
- seleccione la casilla de verificación si el detector está configurado como SPIP.

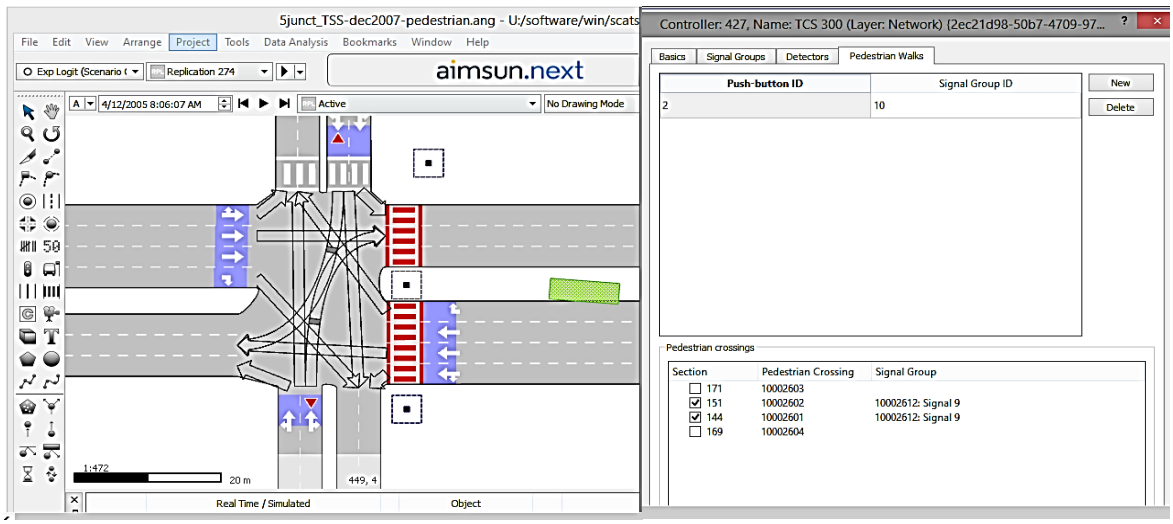
Cada detector SCATS tiene como atributos:

- *ID*: representa el identificador SCATS. Un entero único> 0. Tenga en cuenta que no es necesario que sean números consecutivos.
- *ID y nombre del detector*: el detector en el modelo asociado con este detector SCATS.
- *Líneas PT detectadas*: define las líneas de transporte público asociadas con un detector lógico (una baliza en SCATS; si el detector SCATS corresponde a un detector físico, no se seleccionan líneas PT). En este tipo de detectores, Aimsun Next envía el mensaje Información del vehículo de transporte público en el seguimiento del vehículo.

Tabla de senderos peatonales

El cuarto paso es establecer cómo el controlador "ve" los diferentes pasos de peatones. Para agregar una nueva correspondencia de peatones SCATS, haga clic en el botón Nuevo y luego configure el ID del botón pulsador, el grupo de señales asociado con este ID del botón pulsador y seleccione los pasos de peatones asociados con este botón pulsador de la lista.

Figura 32. Detección de peatones en AIMSUN con SCATS



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

Simulación mesoscópica

Es posible utilizar SCATS con el simulador mesoscópico, pero existen limitaciones en la información del detector que deben tenerse en cuenta. En la simulación mesoscópica, se considera que todos los detectores están al final del tramo. El *modelo de seguimiento vehicular mesoscópico* es una simplificación del *modelo de seguimiento vehicular de Gipps*[22], donde se eliminan las restricciones de aceleración y desaceleración; con esta modificación, el modelo Gipps se utiliza para calcular la primera vez que un vehículo puede entrar en un tramo y la primera vez que un vehículo puede salir del mismo tramo (Hora de salida). Este tiempo se calcula utilizando el tiempo de salida del vehículo principal, el tiempo de entrada actual del vehículo y las propiedades físicas del vehículo como la velocidad, las propiedades del tramo como la longitud y, finalmente, la demora incurrida en el tramo corriente abajo. Este tiempo se calcula cuando el vehículo es el

[22] Gipps, P. G. 1981. A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Part B, 15, 105-111.

primero en la cola en salir del tramo y se utiliza para calcular la presencia en los detectores. El momento en que el vehículo inicia su presencia en el detector es:

DetectorStartPresence = TimeSalir – DetectorLength / VehicleSpeed; y el momento en que el vehículo termina su presencia en el detector es:
DetectorEndPresence = TimeSalir + VehicleLength / VehicleSpeed

Figura 33a. Comparación de perfiles de detección de tráfico meso y micro simulados

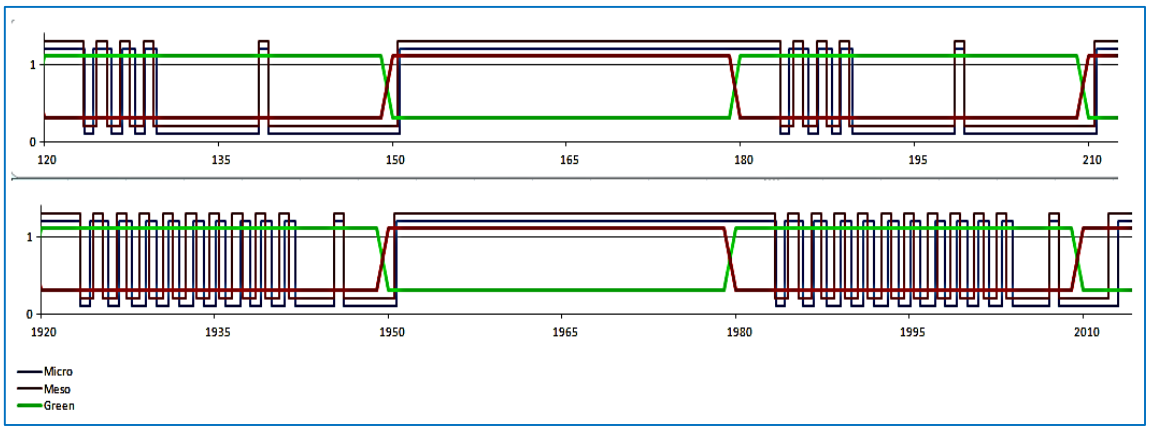


Figura 33b.

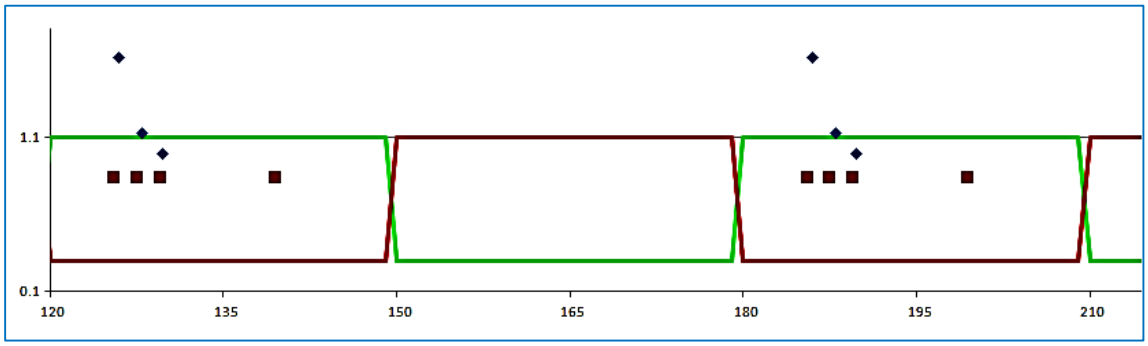
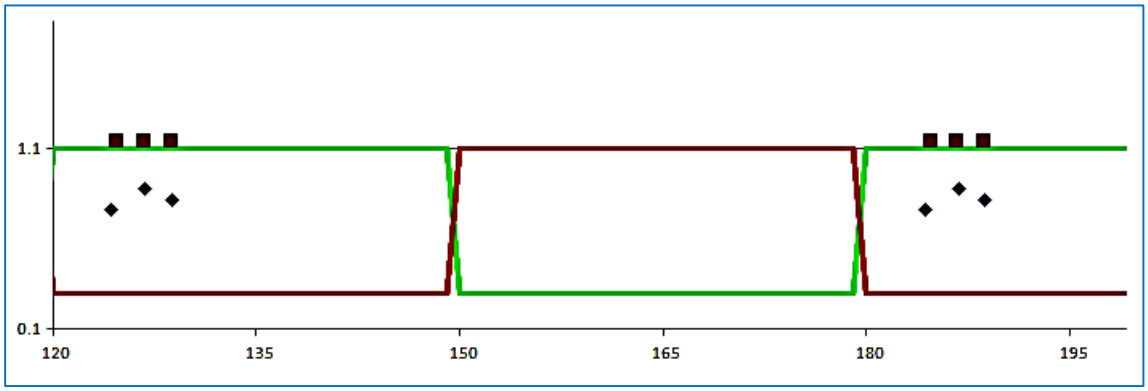


Figura 33c.



Fuente: Aimsun Next 20. User Manual

La Figura 33a, muestra la comparación de los perfiles de detección *meso y micro* en dos períodos diferentes de la simulación (diferentes grados de saturación): 300 veh/h arriba y 700 veh/h abajo. Se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los primeros vehículos que cruzan el detector al inicio del verde (*Green)* forman parte del proceso de descarga de la cola.
- Durante este período, la ocupación en micro es mayor que en meso, porque los vehículos en micro aceleran mientras que en meso están detenidos o se mueven a velocidad de flujo libre; de ahí que en micro atraviesan el detector a una velocidad menor que la de flujo libre, produciendo ocupaciones superiores a 0,85 s (partiendo de 1,6 s y disminuyendo progresivamente a medida que el vehículo ha vuelto a la cola, porque ha tenido más espacio para acelerar); mientras que, en meso atraviesan el detector a velocidad de flujo libre, produciendo ocupaciones de 0.85 s. El gráfico que compara la ocupación se encuentra en la Figura 33b.
- Durante este período la brecha en micro es más corta que en meso y aumenta progresivamente hacia el valor de 1,15 s, que es constante en meso.
- Una vez que se disipa la cola, los vehículos viajan sin restricciones durante el resto del tiempo verde.
- Durante este período los perfiles de ocupación son exactamente iguales e iguales a 0.85 s porque en micro y en meso los vehículos cruzan el detector a la misma velocidad, igual a la velocidad de flujo libre.
- Durante este período la brecha es la misma en micro y meso, y depende solo del nivel de demanda (más corta cuanto mayor es la demanda – Figura 33c).
- Dado que en este modelo el detector está al final de la sección y es más corto que la longitud efectiva de los vehículos, solo se puede detener un vehículo encima de él, por lo que no es posible *el puenteo*, ni en meso ni en micro. Si movemos el detector hacia atrás más de 0.5 m, entonces los dos primeros vehículos en la cola cuando la señal sea roja estarían encima del detector en micro, produciendo un *puente*; sin embargo, meso consideraría que el detector está ubicado al final de la sección, y no observaría puentes, por lo que la diferencia entre meso y micro sería mayor.

En situaciones donde hay una congestión creciente, en los tramos aguas abajo del nodo SCATS, la emulación de detección mesoscópica puede producir perfiles de ocupación

más altos en comparación con la simulación microscópica. Esto se debe al hecho de que los vehículos en meso pagan la demora causada por el cambio de carril aguas abajo antes de salir del tramo donde se encuentra el detector. La brecha no se ve afectada, pero el rendimiento (número de vehículos que salen por ciclo) se reduce. Para reducir este efecto, se recomienda reducir los tramos aguas abajo y calibrar la longitud de éstos con las distancias de giro hacia delante, para evitar cambios de carril de vehículos en los tramos posteriores a los cruces que tienen los controladores SCATS.

2.5.3. Elección del área de estudio

Como caso de estudio se eligió a la Av. Petit Thouars en el tramo de la Av. Alejandro Tirado hasta la Av. 28 de Julio, identificando cinco (05) intersecciones controladas con semáforos y dos (02) intersecciones de prioridad.

Figura 34. Área de estudio

Fuente: Elaboración propia adaptado de Google Earth

La Figura 34, muestra la ubicación de las intersecciones evaluadas que se encuentran dentro del área de estudio, las mismas que se detallan en la Tabla 16, identificando su tipo de control (semaforizada o de prioridad).

Tabla 16. Intersecciones evaluadas

Número	Intersección	Tipo de control
1	Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio	Semaforizada
2	Av. Petit Thouars – Jr. Hernán Velarde	Prioridad
3	Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho	Semaforizada
4	Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros	Semaforizada
5	Av. Petit Thouars – Jr. Madre de Dios	Prioridad
6	Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández	Semaforizada
7	**Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado**	**Semaforizada**

Fuente: Elaboración propia

2.5.4. Definición de escenarios de modelación

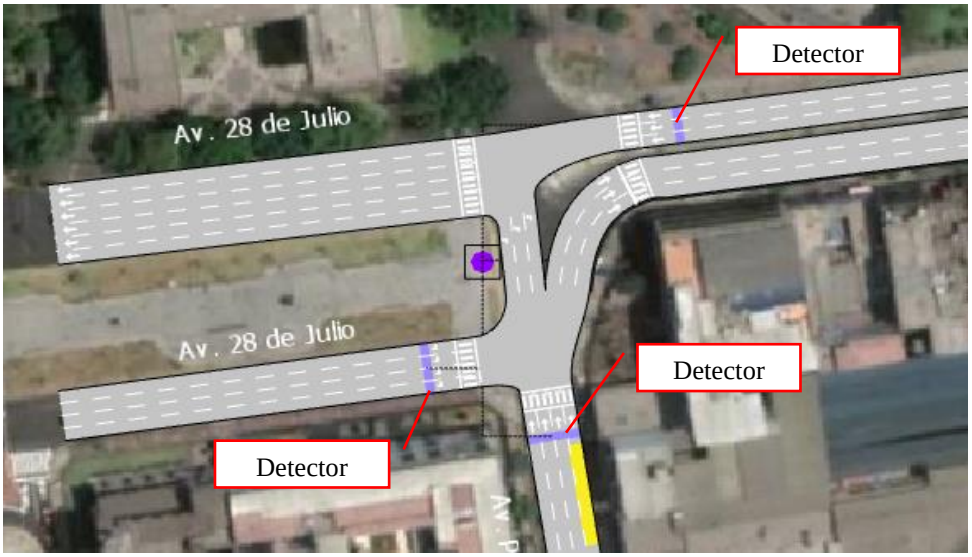
Escenario Actual

Las intersecciones evaluadas cuentan con semáforos de tiempo fijo, es decir con tiempos de ciclo previamente fijados, cuyo uso principal se da en intersecciones con patrones de movilidad del tránsito relativamente estable y constante, o donde, el tránsito puede adaptarse fácilmente a una programación coordinada sin causar demoras o congestión. Estas condiciones de estabilidad del flujo y adaptabilidad de los semáforos de tiempo fijo, dejaron de ser eficientes en ciudades congestionadas hace más de 30 años.

Escenario Propuesto 1

La primera propuesta considera implementar detectores para el control del tránsito de vehículos en cada uno de los accesos de las cinco intersecciones de la Av. Petit Thouars evaluadas. Cada detector, registra y transmite la cantidad de vehículo que alcanzan en una determinada corriente del tránsito vehicular. En la Figura 35 detalla un ejemplo de la ubicación de los detectores en la intersección Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio.

Figura 35. Ejemplo de ubicación de detectores en todos los accesos

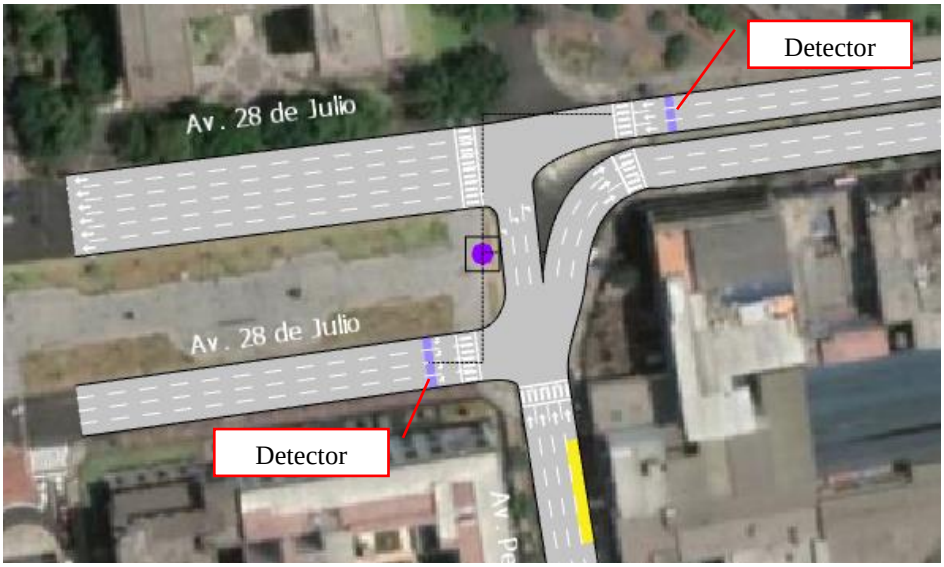


Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Escenario Propuesto 2

La segunda propuesta considera implementar detectores para el control del tránsito de vehículos solo en las vías transversales o secundarias a la Av. Petit Thouars con la finalidad de mantener la coordinación semafórica de la Av. Petit Thouars. En la Figura 36 detalla un ejemplo de la ubicación de los detectores en la intersección Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio.

Figura 36. Ejemplo de ubicación de detectores en las calles secundarias



Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

2.5.5. Simulación de estrategias seleccionadas

- **Parámetros de la simulación**

Tipología de vía y entorno de capacidades: Se asignó una capacidad horaria por carril según el tipo de arco y clasificación de vía, de acuerdo a lo establecido en la Tabla 17.

Tabla 17. Tipología de arco y entorno de capacidades

Tipo de arco	Clasificación vial	Nombre en AIMSUN	Capacidad horaria por carril
1	Conector	-	9999
2	Vías arteriales urbana	*Arterial*	1500
3	Vías colectoras urbanas	*Urban Road*	1200
4	Vías locales	*Street*	1000
5	Circunvalaciones	*Ringroad*	2200
6	Vía interurbana principal	*Road*	1800
7	Vía interurbana secundaria	*Signalized Street*	1400
8	Autopistas	*Freeway*	2200

Fuente: AIMSUN.

Ancho de carril (m): De acuerdo a la topografía del área de estudio, se asignaros los anchos de carriles a cada arco o vía.

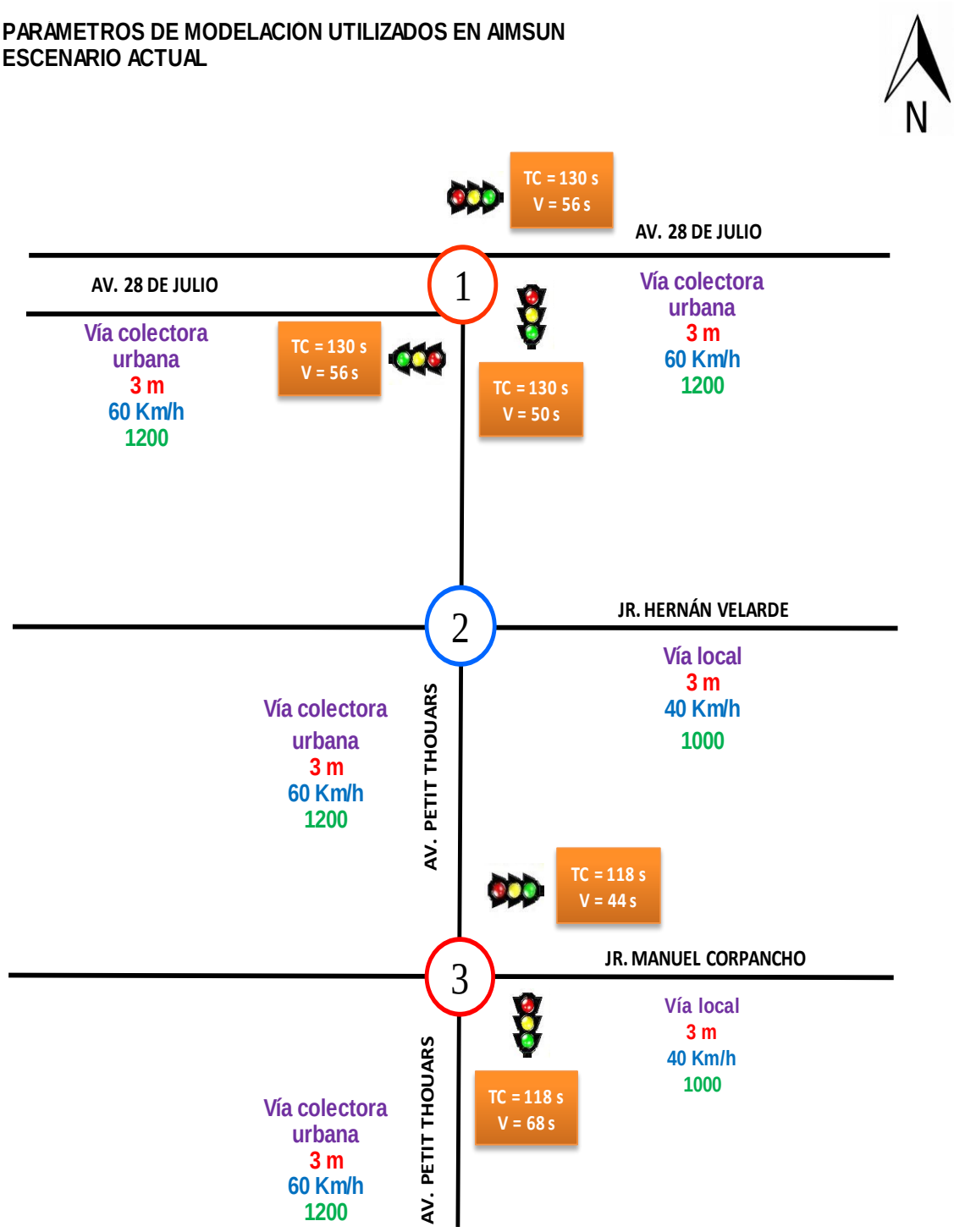
Velocidad Máxima (Km/h): Se le asignó a cada arco o vía la velocidad máxima normativa de acuerdo al Reglamento Nacional de Tránsito (Decreto Supremo N° 016-2009-MTC y sus modificatorias).

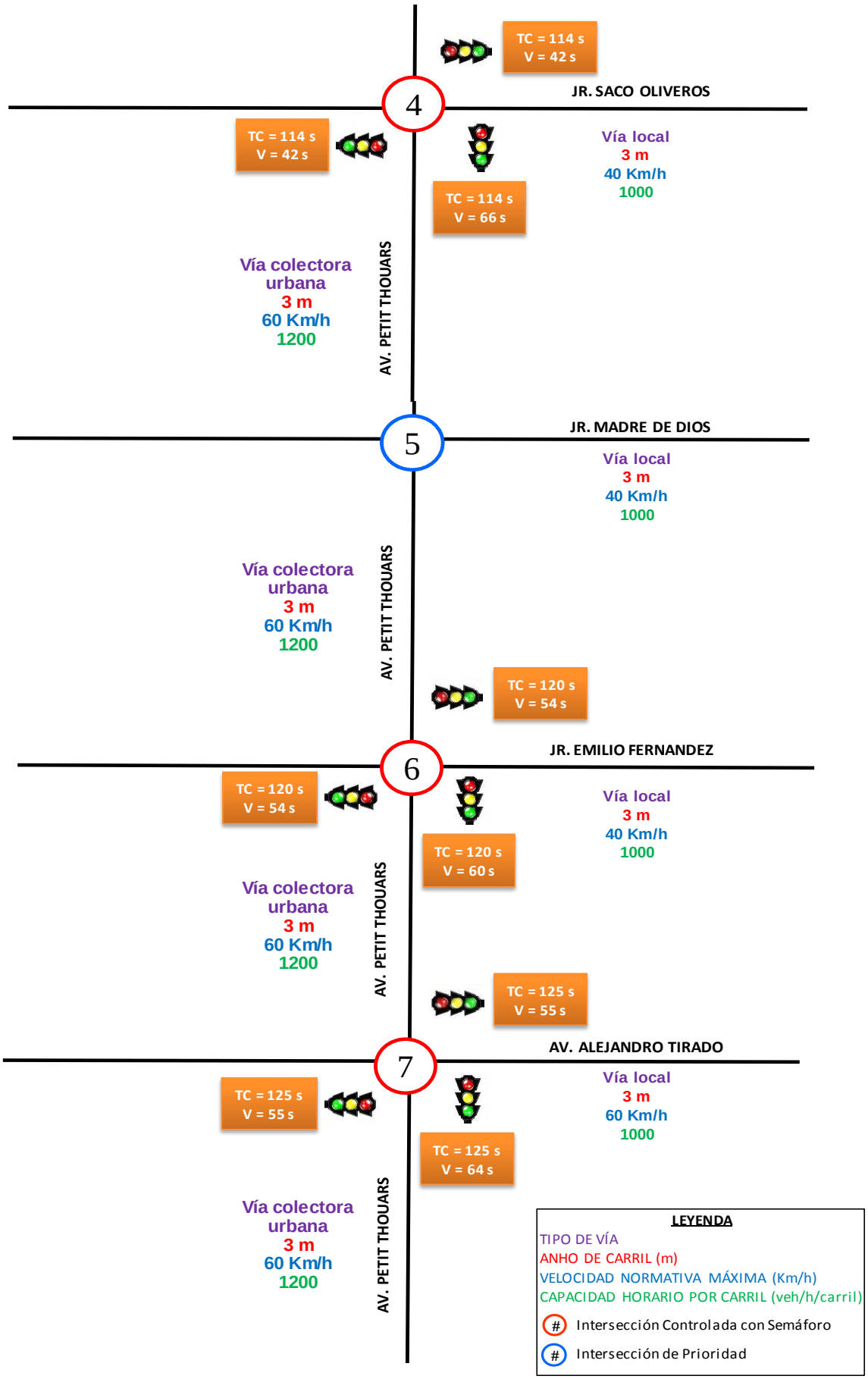
Volumen vehicular (veh): De acuerdo a la información recaba en gabinete de estudios previos, se ha asignado el volumen y la dirección de los flujos vehiculares.

Tiempos de ciclo (seg): De acuerdo a la información recabada en gabinete de estudios previos, se han ingresado las fases y tiempos de ciclo de las cinco intersecciones semafóricas.

La Figura 37, muestra los parámetros ingresados al modelo en la situación actual, donde los tiempos de semáforo son fijos y la Figura 38, detalla los parámetros para la situación propuesta con planes de semaforización actuado.

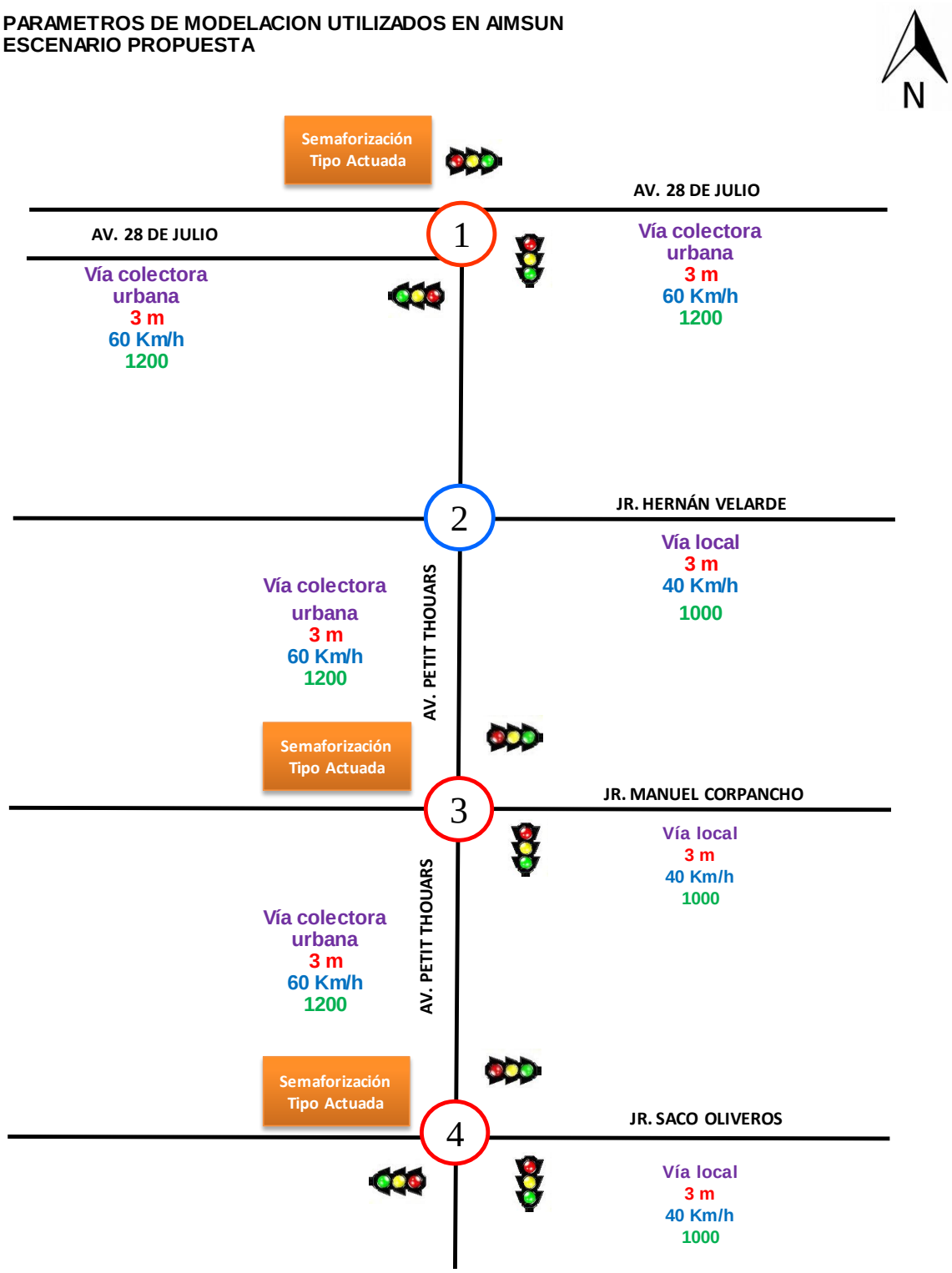
Figura 37. Parámetros de modelación utilizados – Situación Actual

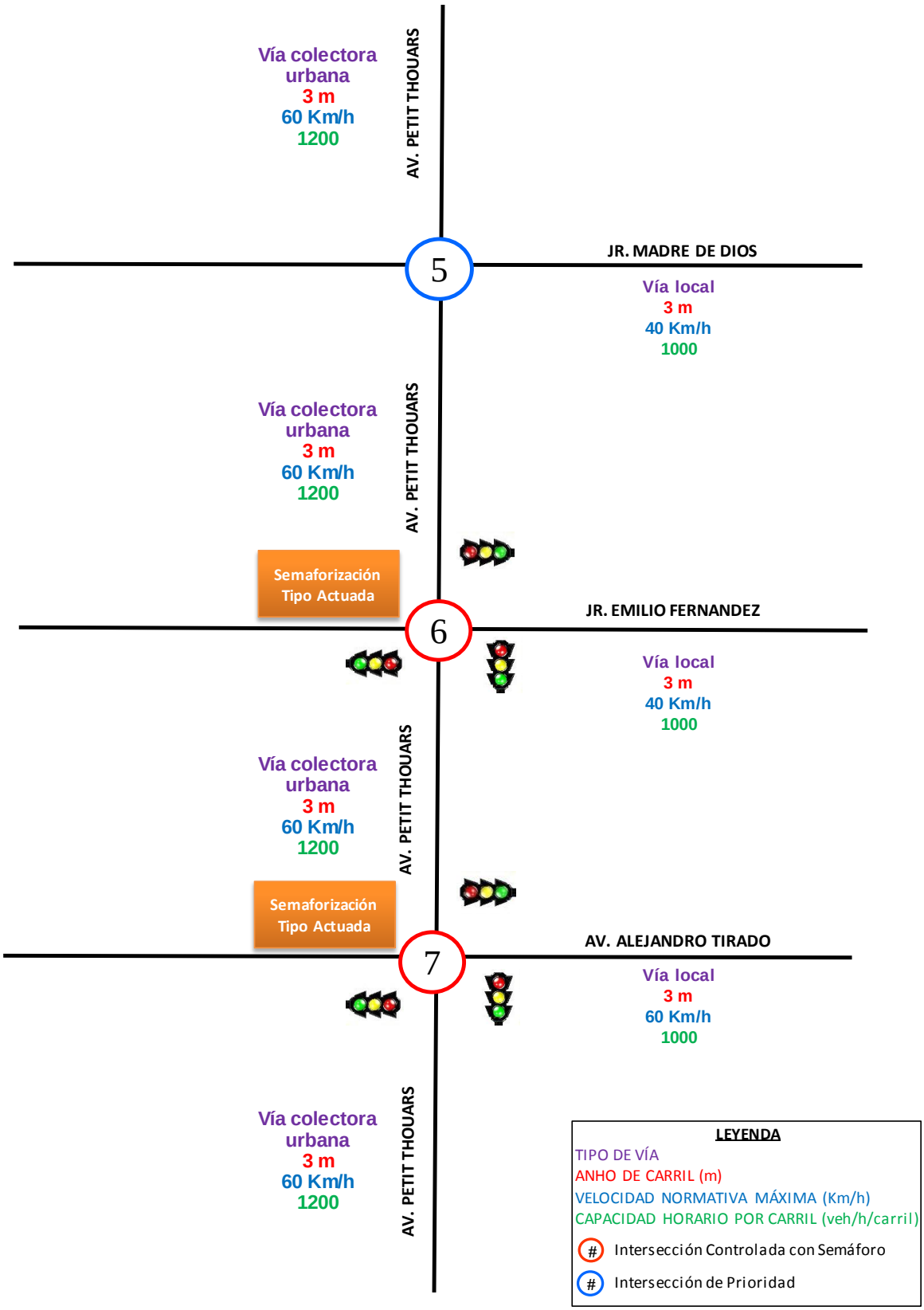




Fuente: Estudios de Tránsito – INTRAPERU SAC

Figura 38. Parámetros de modelación utilizados – Situación Propuesta

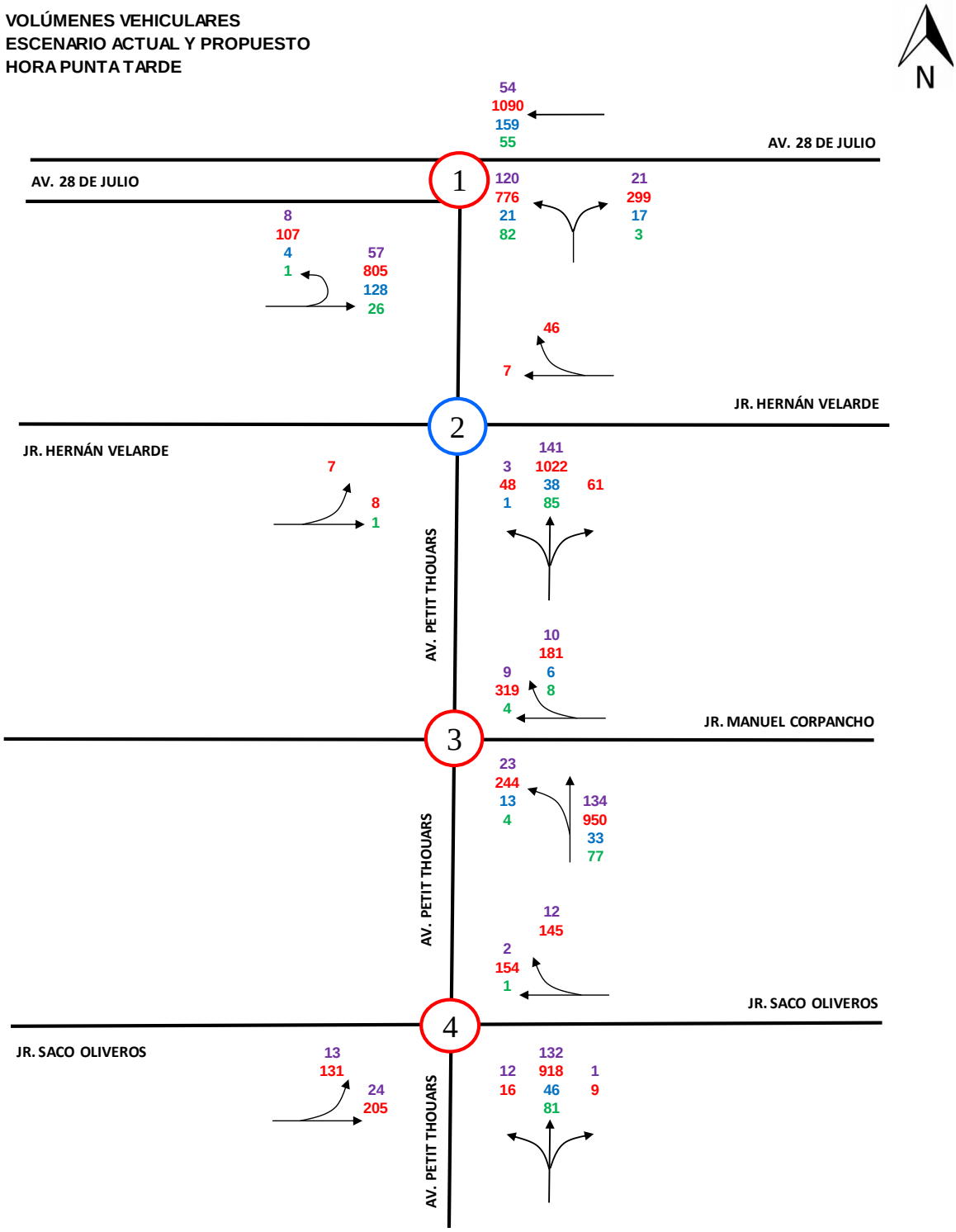


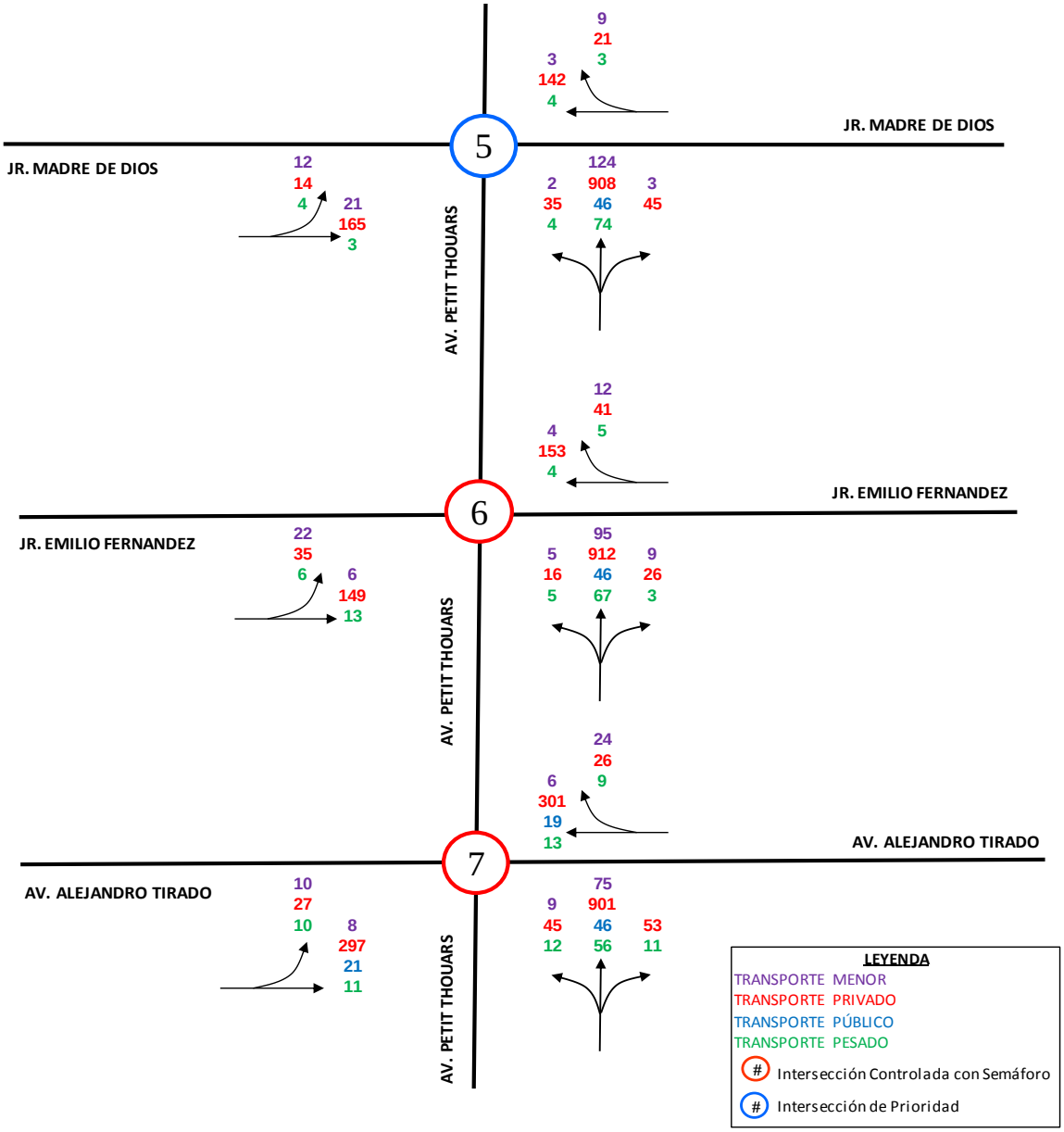


Fuente: Estudios de Tránsito – INTRAPERU SAC

La Figura 39, muestra los flujos vehiculares obtenidos de la revisión de antecedentes en estudios de tránsito, los que fueron ingresados al modelo, tanto de la situación actual como propuesta.

Figura 39. Flujos vehiculares – Situación Actual y Propuesta





Fuente: Estudios de Tránsito – INTRAPERU SAC

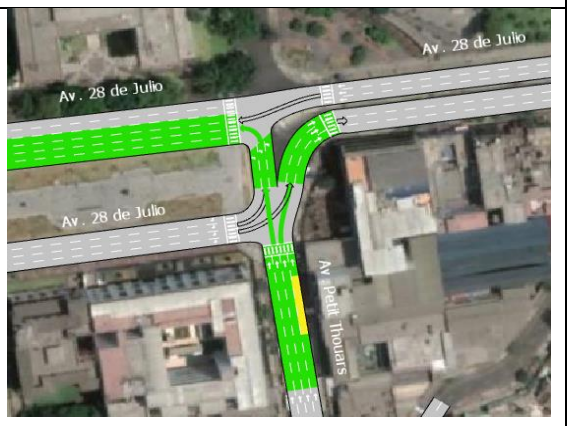
- **Condiciones de semaforización existentes**

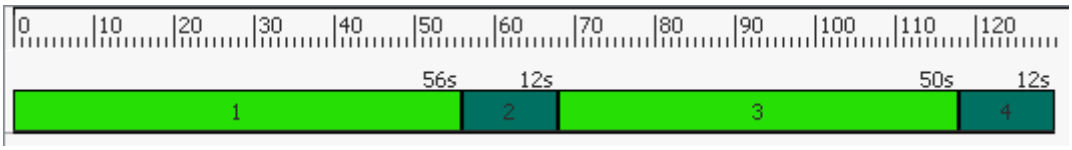
En el área de estudio, existen cinco intersecciones con sistema de control semafórico de tiempo fijo, donde se muestras los diagramas de fases y tiempos de ciclo de cada una; siendo estas las siguientes:

- Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio
- Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho
- Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros
- Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández
- Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado

Figura 40. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección:

Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio

Fase I	Fase II
	
Verde = 56 seg.	Verde = 50 seg.
Tiempo de ciclo = 130 Segundos	

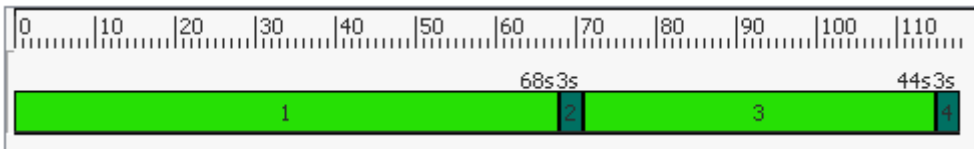


Fuente: Elaboración propia en AIMSUM Next 20.

Figura 41. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección:

Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho

Fase I	Fase II
Verde = 68 seg.	Verde = 44 seg.
Tiempo de ciclo = 118 Segundos	



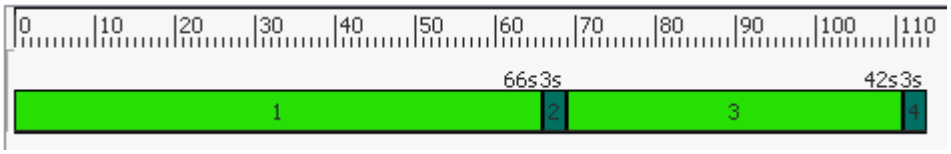
Fuente: Elaboración propia en AIMSUM Next 20.

Figura 42. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección:

Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros

Fase I	Fase II
Verde = 66 seg.	Verde = 42 seg.

Tiempo de ciclo = 114 Segundos



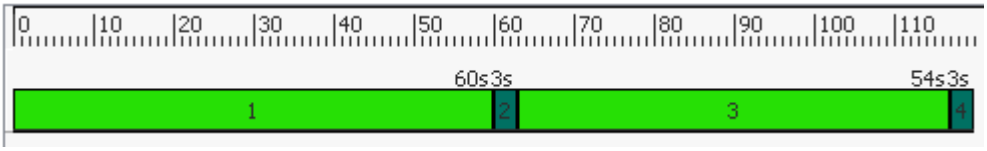
Fuente: Elaboración propia en AIMSUM Next 20.

Figura 43. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección:

Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández

Fase I	Fase II
Verde = 60 seg.	Verde = 54 seg.

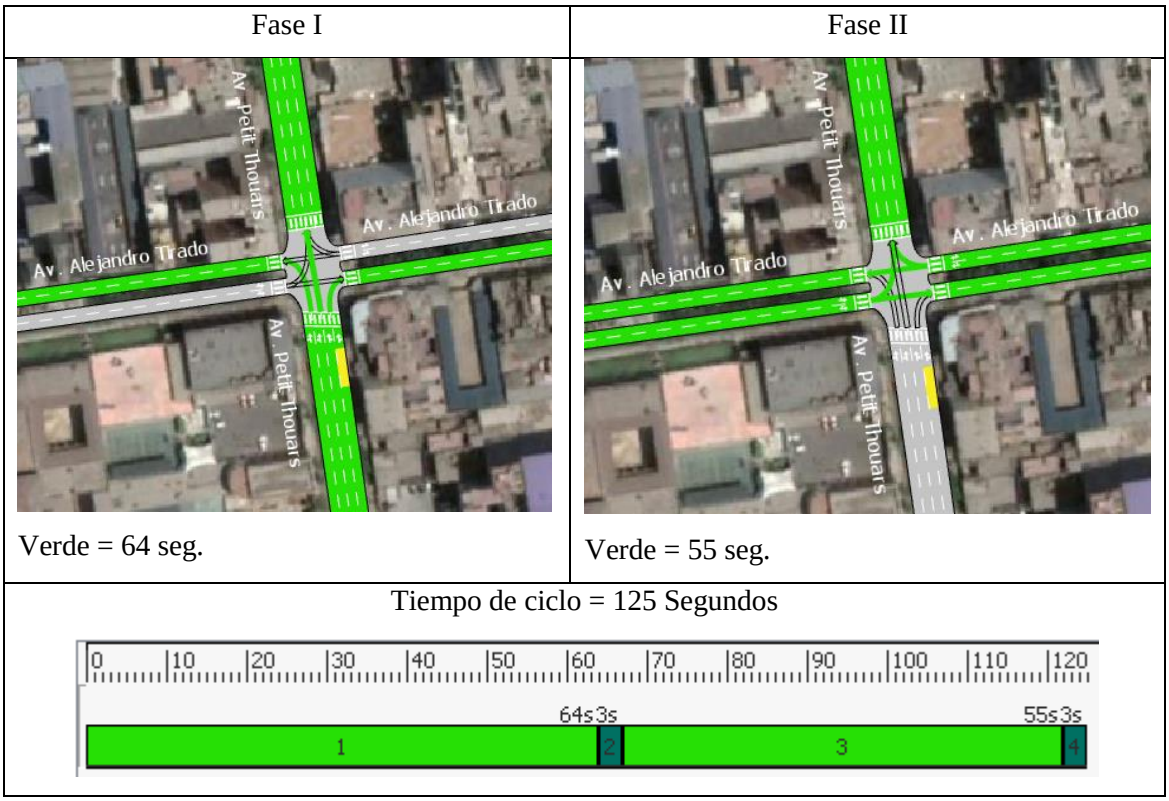
Tiempo de ciclo = 120 Segundos



Fuente: Elaboración propia en AIMSUM Next 20.

Figura 44. Diagrama de fases y tiempos de ciclo intersección:

Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado



Fuente: Elaboración propia en AIMSUM Next 20.

- **Simulación de planes de control actuados SCATS**

Se establecieron cinco intersecciones con planes de control actuados SCATS, vinculado cada uno a un controlador, y cada uno de estos se encuentra conectado a los detectores planteados en las intersecciones.

Las Figuras 45 y 46, muestran el diseño de toda la red modelada de la Av. Petit Thouars, desde la Av. 28 de Julio hasta la Av. Alejandro Tirado; y de las Figuras 47 al 51 se detallan las intersecciones semafóricas con plan de control actuado SCATS.

Figura 45. Diseño de red modelada, Av. Petit Thouars tramo Av. 28 de Julio – Jr. Madre de Dios

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 46. Diseño de red modelada, Av. Petit Thouars tramo Jr. Madre de Dios – Av. Alejandro Tirado

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 47. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS

Intersección: Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 48. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS

Intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 49. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS

Intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 50. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS

Intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 51. Diseño de intersección semafórica con plan de control actuado SCATS

Intersección: Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

- **Validación del modelo de simulación**

Para la validación del modelo de simulación, se realizó una comparación entre el flujo vehicular de entrada medido en campo y el flujo vehicular de entrada del modelo. El GEH definido en la Ecuación 07 y los parámetros descritos en la Tabla 18, entregó los siguientes resultados para la calibración del modelo en el área de estudio:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(E-V)^2}{E+V}} \qquad \text{Ec. 07}$$

Donde:

GEH = Indicador estadístico

E = Volumen estimado del modelo

V = Volumen medido en campo

Tabla 18. Descripción del indicador estadístico GEH

GEH	Indicador Estadístico
5.0	Variación permisible
5.0 - 10.0	Se justifica la investigación
10.0 a más	Existe una alta probabilidad de un problema con el modelo

Fuente: Geoffrey E. Havers - 1970.

Las Tablas 19, 20 y 21, demuestran que se justifican los modelos de simulación de tránsito ya que los indicadores GEH son menores que 5, en todos los accesos analizados.

Tabla 19. GEH del Escenario Actual

ACCESO	Volumen de entrada (vehs/hr)		GEH
	Modelo	Campo	
Av. 28 de Julio Oeste	1224	1136	2.56
Av. 28 de Julio Este	1456	1358	2.61
Jr. Herán Valverde Oeste	16	16	0.00
Jr. Herán Valverde Este	52	53	0.14
Jr. Manuel Corpancho	520	537	0.74
Jr. Saco Oliveros Oeste	424	373	2.55
Jr. Saco Oliveros Este	260	313	3.13
Jr. Madre de Dios Oeste	284	219	4.10
Jr. Madre de Dios Este	188	182	0.44
Jr. Emilio Fernández Oeste	208	231	1.55
Jr. Emilio Fernández Este	204	219	1.03
Av. Alejandro Tirado Oeste	416	384	1.60
Av. Alejandro Tirado Este	444	398	2.24
Av. Petit Thouars	1196	1208	0.35
GEH Promedio			1.65

Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

Tabla 20. GEH del Escenario Propuesto 1

ACCESO	Volumen de entrada (vehs/hr)		GEH
	Modelo	Campo	
Av. 28 de Julio Oeste	1200	1136	1.87
Av. 28 de Julio Este	1444	1358	2.30
Jr. Herán Valverde Oeste	16	16	0.00
Jr. Herán Valverde Este	52	53	0.14
Jr. Manuel Corpancho	564	537	1.15
Jr. Saco Oliveros Oeste	420	373	2.36
Jr. Saco Oliveros Este	268	313	2.64
Jr. Madre de Dios Oeste	284	219	4.10
Jr. Madre de Dios Este	188	182	0.44
Jr. Emilio Fernández Oeste	200	231	2.11
Jr. Emilio Fernández Este	204	219	1.03
Av. Alejandro Tirado Oeste	412	384	1.40
Av. Alejandro Tirado Este	428	398	1.48
Av. Petit Thouars	1216	1208	0.23
GEH Promedio			1.52

Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

Tabla 21. GEH del Escenario Propuesto 2

ACCESO	Volumen de entrada (vehs/hr)		GEH
	Modelo	Campo	
Av. 28 de Julio Oeste	1152	1136	0.47
Av. 28 de Julio Este	1328	1358	0.82
Jr. Herán Valverde Oeste	12	16	1.07
Jr. Herán Valverde Este	52	53	0.14
Jr. Manuel Corpancho	504	537	1.45
Jr. Saco Oliveros Oeste	396	373	1.17
Jr. Saco Oliveros Este	276	313	2.16
Jr. Madre de Dios Oeste	256	219	2.40
Jr. Madre de Dios Este	196	182	1.02
Jr. Emilio Fernández Oeste	248	231	1.10
Jr. Emilio Fernández Este	260	219	2.65
Av. Alejandro Tirado Oeste	408	384	1.21
Av. Alejandro Tirado Este	380	398	0.91
Av. Petit Thouars	1252	1208	1.25
GEH Promedio			1.27

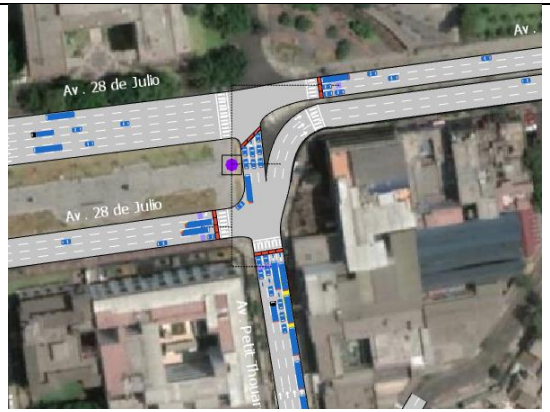
Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

2.5.6. Presentación de resultados del modelo de simulación

Vistas 2D del modelo en situación actual y propuesta

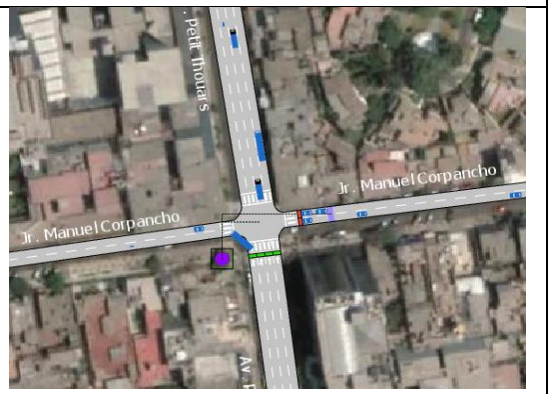
Las Figuras del 52 a 56 muestran un comparativo en 2D, de la situación actual de las intersecciones semafóricas con tiempos fijos y la situación propuesta con planes de control actuados SCATS.

Figura 52 Comparación de escenarios Vista 2D, Intersección: Av. Petit Thouars – Av. 28 de Julio

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2
		

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 53. Comparación de escenarios Vista 2D, Intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Manuel Corpancho

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2
		

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 54. Comparación de escenarios Vista 2D, Intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Saco Oliveros

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

Figura 55. Comparación de escenarios Vista 2D, Intersección: Av. Petit Thouars – Jr. Emilio Fernández

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

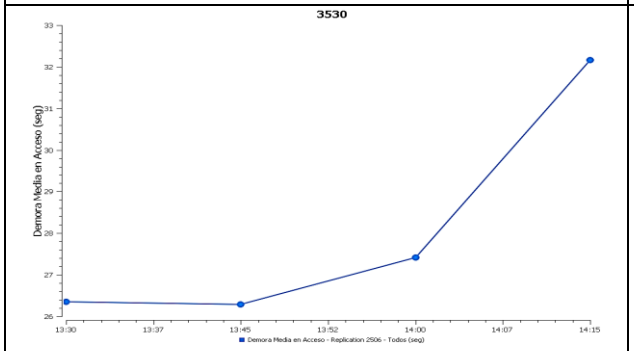
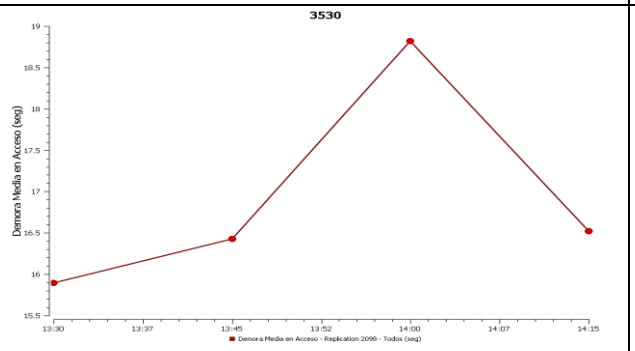
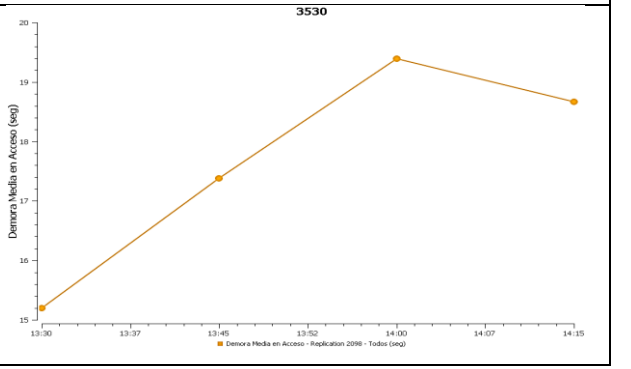
Figura 56. Comparación de escenarios Vista 2D, Intersección: Av. Petit Thouars – Av. Alejandro Tirado

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2

Fuente: Elaboración propia en Google Earth y AIMSUM Next 20.

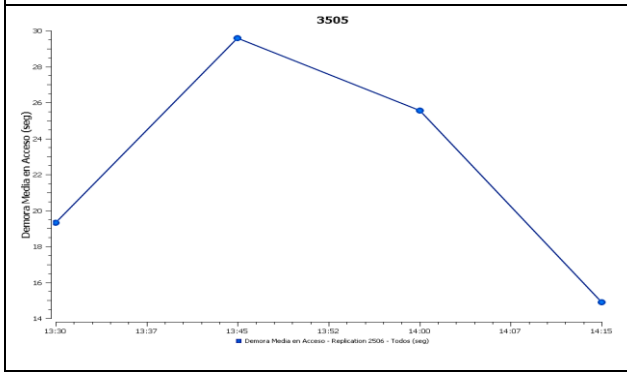
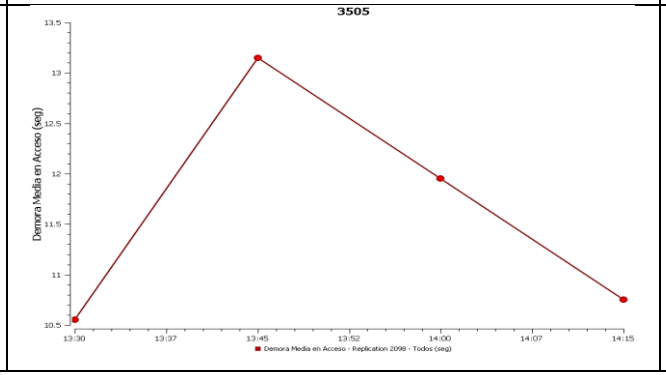
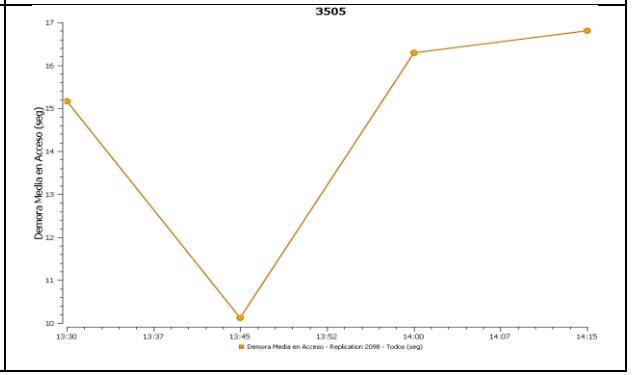
Las Figuras del 57 al 61 muestran gráficamente la variación de las demoras (seg) por periodos de 15 minutos evaluados en la simulación, comparando la situación actual con la propuesta.

Figura 57. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouars con Av. 28 de Julio

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2
		

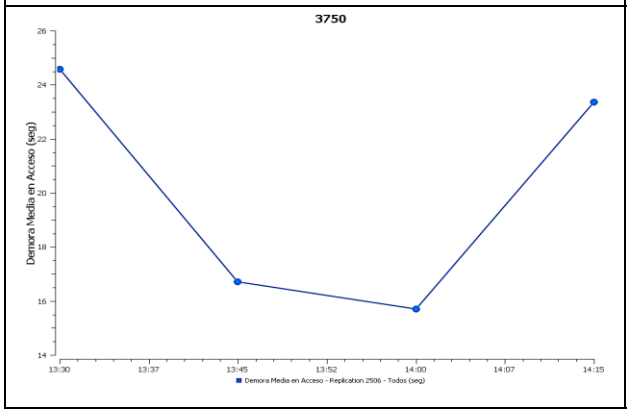
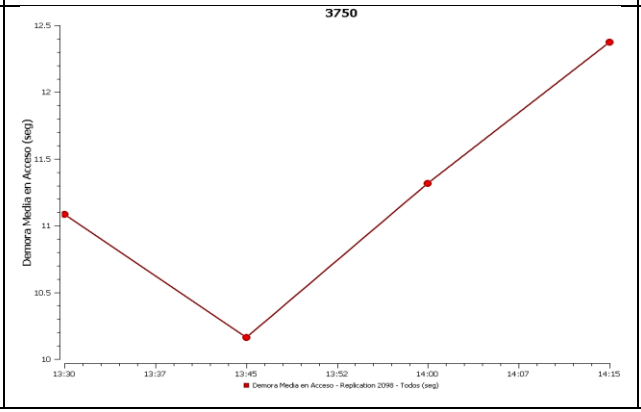
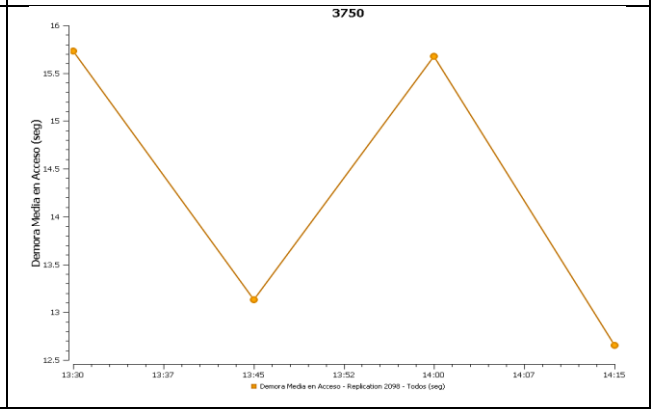
Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

Figura 58. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouras con Jr. Manuel Corpancho

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2
		

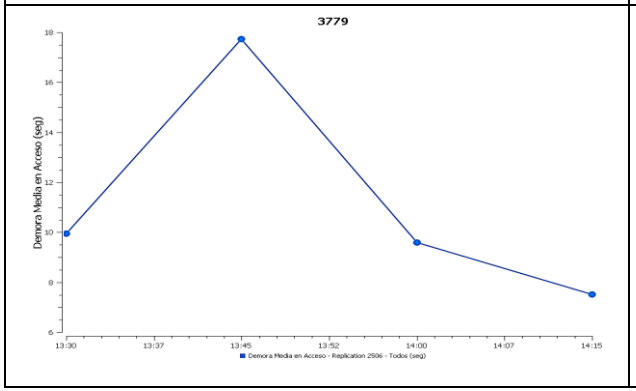
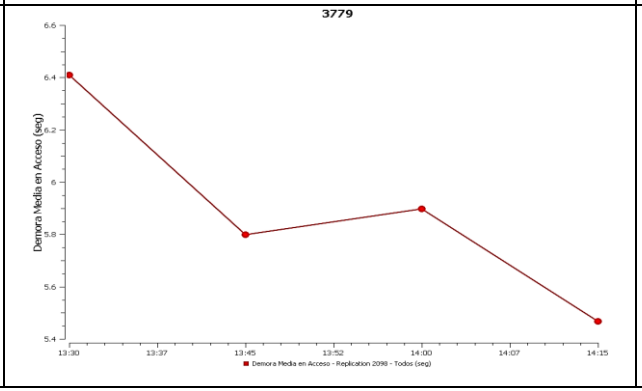
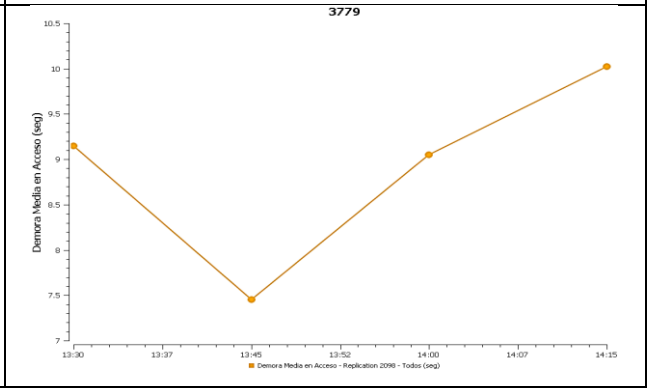
Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

Figura 59. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouras con Jr. Saco Oliveros

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2
		

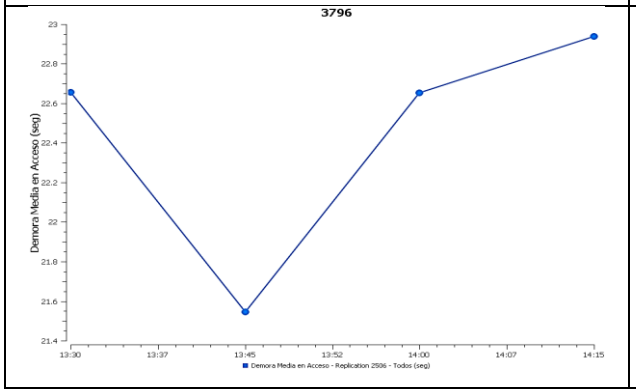
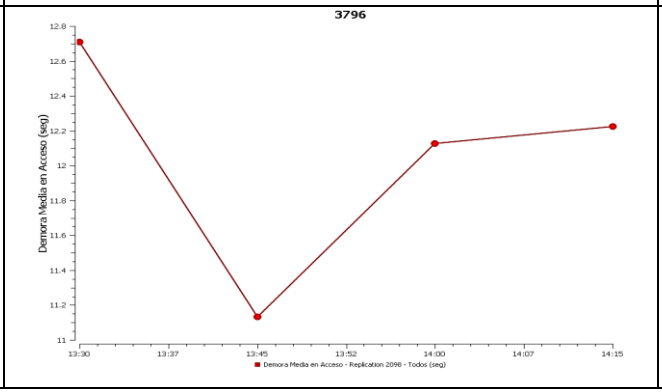
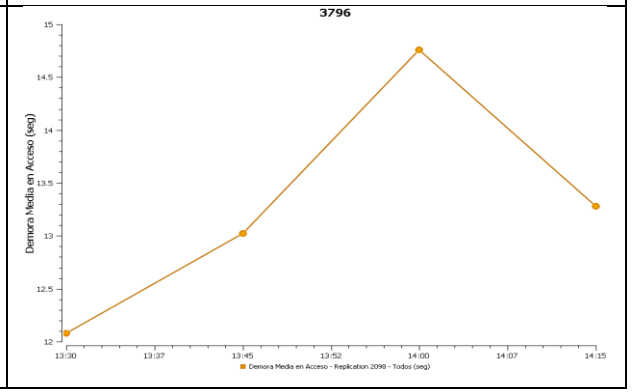
Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

Figura 60. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouras con Jr. Emilio Fernández

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2
		

Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

Figura 61. Comparativo gráfico de demora media (seg) de la intersección Av. Petit Thouras con Av. Alejandro Tirado

Situación Actual	Situación Propuesta 1	Situación Propuesta 2
		

Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

En la Tabla 22, se detallan los resultados obtenidos de las medidas de efectividad de la situación actual y propuesta.

Tabla 22. Resultados de las Medidas de Efectividad según escenario modelado

MOE	Unidad	Escenario Actual		Escenario Propuesto 1		Escenario Propuesto 2	
		Valor	Desviación Estándar	Valor	Desviación Estándar	Valor	Desviación Estándar
Cola Media	veh	74.01	ND	43.18	ND	51.63	ND
Número de Paradas	#/veh/km	0.09	ND	0.09	ND	0.1	ND
Tiempo de Demora	seg/km	100.37	94.38	66.2	59.15	68.32	52.25
Tiempo de Viaje	seg/km	166.03	95.95	131.44	59.81	133.66	52.92
Velocidad	km/h	29.46	15.88	32.05	12.06	31.2	12.09

Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

La Tabla 23, muestra la diferencia de los indicadores de medidas de efectividad obtenidas en la simulación, observando que en el escenario propuesta 1 comparada con el escenario actual, la cola media disminuyó en 30.83 veh, el número de paradas se mantuvo, el tiempo de demora se redujo en 34.17 seg/km, el tiempo de viaje disminuyó en 34.59 seg/km y la velocidad aumentó en 2.59 km/h. Asimismo, haciendo la misma comparación entre el escenario propuesto 2 con el escenario actual, la cola media disminuyó en 22.38 veh, el número de paradas aumentó en 0.01 #/veh/km, el tiempo de demora se redujo en 32.05 seg/km, el tiempo de viaje disminuyó en 32.37 seg/km y la velocidad aumentó en 1.74 km/h.

Tabla 23. Diferencia entre escenarios modelados

MOE	Unidad	Escenario Actual VS Escenario Propuesto 1	Escenario Actual VS Escenario Propuesto 2
Cola Media	veh	-30.83	-22.38
Número de Paradas	#/veh/km	0	0.01
Tiempo de Demora	seg/km	-34.17	-32.05
Tiempo de Viaje	seg/km	-34.59	-32.37
Velocidad	km/h	2.59	1.74

Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

2.6. Aspectos éticos

- Sobre las técnicas de recopilación de información: es información pública de la Municipalidad de Lima
- Sobre la utilización del instrumento: las herramientas computacionales a utilizar, son de propiedad del autor.

III. RESULTADOS

3.1. Resultados descriptivos

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 23 y la comparación de los dos escenarios 1 y 2 (sensores SCATS colocados en todas las aproximaciones a las intersecciones versus colocados solo en las calles secundarias respectivamente), se concluye que:

- El escenario propuesto 1, tiene mejores resultados en los indicadores de medidas de efectividad que el escenario propuesto 2: disminución de colas medias (31 vehículos aproximadamente en la red), número de paradas o detenciones totales del vehículo (cero), disminución de tiempos de demoras en la red vial (34 segundos aproximadamente por kilómetro recorrido por cada vehículo en la red), ***disminución de tiempos de viaje*** (35 segundos aproximadamente por segundo por kilómetro recorrido por cada vehículo en la red), aumento de más de 2 km/h por cada vehículo que circula en la red. Sin embargo, en la implementación del escenario 1 se pierde la coordinación semafórica de la Av. Petit Thouars, ***implementada solamente para favorecer a los motoristas que circulan sobre esta vía***, esto se produce por que se generan más demoras (seg) y colas (veh) en las vías secundarias.

- De acuerdo al análisis anterior, se debería ***implementar una coordinación semafórica de área amplia, en red, grilla o malla, y no en eje o corredor como se encuentra actualmente la Av. Petit Thouars***, que favorezca también a los usuarios de las calles secundarias, implementando un beneficio equilibrado del sistema. El experimento demuestra que, el escenario 2 beneficia también a las calles secundarias que vienen siendo ignoradas y mal atendidas en el sistema semafórico actual.

- Cabe resaltar, que los resultados matemáticos del modelo, son los encontrados ***en una hora de simulación***; por lo que, para una ciudad como Lima Metropolitana que opera 16 horas al día y duerme las otras 8 horas, con los conocidos niveles de congestión diarios, se podrían extrapolar muy fácilmente los beneficios y rendimientos sobre la económica del transporte de toda la red, alcanzando

rendimientos económicos sobre la inversión de la implementación del sistema como el propuesto; sumamente altos, superiores inclusive a los encontrados en ciudades de los Estados Unidos del orden de los 40:1 dólares de inversión (FHWA, 2005).

- Para evaluar las mejorar en los niveles de congestión, solamente en la reducción del tiempo de viaje, vamos a anualizar los resultados de la modelación y tenemos:
    - Vehículos que ingresan a la red en hora punta de situación actual: 6,660 veh/h (Figura 39).
    - Disminución del tiempo de viaje en 1 hora: 35 seg/km/veh, que equivale a 0.00972 h/km/veh
    - Horas al año: 8760 h, de éstas podríamos asumir 9 horas punta para Lima, tendríamos un total de 973 h
    - Disminución del tiempo de viaje en 1 año: 9.45972 h/km/veh = 9.46 h/km/veh aproximadamente.
    - Disminución de la congestión anualizada para el total de vehículos que circulan en la red, durante 9 horas punta: **63,004 horas/km/año** aproximadamente.

- Para la modelación del Caso de estudio, hemos utilizado solamente una red vial de 7 intersecciones semaforizadas de un total de1,500 aproximadamente que tiene la red vial de Lima Metropolitana al año 2020, según la página web de Protránsito – MML. En ese sentido, podemos extrapolar el resultado encontrado sobre el total de la red semaforizada, asumiendo un valor conservador promedio de 1,000 vehículos para una hora punta que circulan en cada intersección; tendríamos un ahorro aproximado de **9,000 horas/km/año**. A su vez, cada intersección semaforizada tiene un área límite operacional aproximada de 50 m lineales por acceso (*FHWA, 2013. Signalized Intersections: An Informational Guide. Exhibit 4-1. Intersection functional boundaries*); los cuales, representan unos 200 metros por intersección (0.2 kilómetros). En esa misma lógica, las 1,500 intersecciones semaforizadas en Lima, generan una longitud aproximada de **300 km**, sobre las cuales, tendríamos un ahorro generalizado aproximado de **2,700,000 horas/año**. Finalmente, podemos monetizar este ahorro anualizado, sobre la base de la Estimación del Valor Social del Tiempo de Viaje – VST, desarrollado por la Universidad del Pacífico por encargo del Ministerio de Economía y Finanzas en el año 2012, que encontró un

VST ponderado para todos los Niveles Socio Económico – NSE para Lima de **S/ 6.92 hora**, considerando que el usuario trabaja 176 horas mensual. Valor del Tiempo de Ocio – VTO = 40% Valor del Tiempo de Trabajo – VTT. Así, el ahorro anual por congestión por la implementación del escenario propuesto 1 sería de **18,684,000 S/ año**. Este valor social soportaría la rentabilidad económica de cualquier proyecto de inversión en sistemas automatizados de gestión de tránsito urbano a nivel nacional; y para el proyecto de Lima, si se implementara de manera adecuada, podría tener un período de recuperación de la inversión de 6.5 años.

3.2. Prueba de normalidad

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para una muestra (Kolmogorov, 1933), es una prueba de bondad de ajuste, que sirve para contrastar la hipótesis nula de que la distribución de una variable se ajusta a una determinada distribución teórica de probabilidad. En ese sentido, se procedió a contrastar los resultados de las cuatro corridas efectuadas para en la modelación de tránsito, para cada escenario modelado, el mismo que se detalla en la Tabla 24 a continuación.

Tabla 24. Demoras (seg) según número de corrida y escenario modelado

Número de corrida	Escenario Actual	Escenario Propuesto 1	Escenario Propuesto 2
1	90,99	45.84	52.24
2	110.11	48.03	54.25
3	90,99	44.93	52.49
4	74.01	43.18	51.63

Fuente: Elaboración propia con los resultados del AIMUN Next20

Tabla 25. Parámetros utilizados, y valores obtenidos de la muestra de demoras (seg) del Escenario Actual

Parámetro	Valor
H_0	La muestra sigue una distribución dada
H_a	La muestra no sigue la distribución dada
Estadístico de Kolmogorov-Smirnov (D)	0,265
Valor p de la prueba (p)	0,942
p> 0,05 (α)	Aceptar H_0

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en: https://www.aatbio.com/tools/kolmogorov-smirnov-k-s-test-calculator

Tabla 26. Parámetros utilizados, y valores obtenidos de la muestra de demoras (seg) del Escenario Propuesto 1

Parámetro	Valor
H_0	La muestra sigue una distribución dada
H_a	La muestra no sigue la distribución dada
Estadístico de Kolmogorov-Smirnov (D)	0,307
Valor p de la prueba (p)	0,747
p> 0,05 (α)	Aceptar H_0

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en: https://www.aatbio.com/tools/kolmogorov-smirnov-k-s-test-calculator

Tabla 27. Parámetros utilizados, y valores obtenidos de la muestra de demoras (seg) del Escenario Propuesto 2

Parámetro	Valor
H_0	La muestra sigue una distribución dada
H_a	La muestra no sigue la distribución dada
Estadístico de Kolmogorov-Smirnov (D)	0,265
Valor p de la prueba (p)	0,942
p> 0,05 (α)	Aceptar H_0

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en: https://www.aatbio.com/tools/kolmogorov-smirnov-k-s-test-calculator

De los resultados obtenidos en la Tablas 24 al 27, se concluye que los datos NO difieren significativamente de los que se distribuyen normalmente.

3.3. Contrastación de las hipótesis

Sobre la hipótesis general:

Demostramos que, con la implementación de este sistema, y comparándolos con la situación actual en dos escenarios: el primero colocando los detectores en todos los accesos de las intersecciones y el segundo, colocándolos solo en las calles secundarias, obtenemos, reducción de longitudes de cola importantes (de 70 veh en situación actual a 43 veh y 51 veh en los escenarios 1 y 2 respectivamente), esto oscila entre el 39 y el 20 por ciento de reducción de esa medida de congestión. Es un resultado concluyente de efectividad del sistema y demuestra positivamente la hipótesis general.

Sobre las hipótesis específicas:

a) En efecto, no cuenta con Profesionales altamente capacitados en Ingeniería de Tránsito Urbano, Ingeniería de Telecomunicaciones y Sistemas Avanzados de Semaforización, que coadyuven a implementar, gestionar y mantener, una Institución Especializada de la categoría de la desarrollada en la presente investigación. De otra manera, no tendríamos los elevados niveles de congestión demostrados. Es fácilmente verificable en la página web de Protránsito MML.

b) Efectivamente, el sistema de semaforización de la red metropolitana de Lima es sumamente obsoleto y de tiempo fijo; las nuevas adquisiciones de equipamiento semafórico tienen un sistema de comunicaciones de lenguaje (protocolo), en más del 90% de la red de tecnología cerrada o propietaria de la empresa que lo implemento, lo que hace no intercambiable, ni expandible, ni interoperable dicho sistema.

c) El control de prioridad semafórica se utiliza para darle mayor fluidez en las intersecciones al sistema de transporte público masivo en buses o trenes. Esto necesitaría como mínimo de infraestructura semafórica adecuada, sensores de comunicación tanto en campo como equipamiento en vehículo, que no existe.

d) Así es. En diciembre de 2017 con el cambio de gestión municipal, se firmó un contrato de ***CIENTO VEINTE MILLONES DE SOLES*** para la "Adquisición e Implementación y Puesta en Marcha de los Proyectos de Semaforización de la Provincia de Lima" – Licitación Pública N° 015-2017-CS/MML, implementado bajo responsabilidad de Protránsito MML. El proyecto tiene casi tres años que no viene siendo supervisado ni auditado de acuerdo a normatividad de Control de la República del Perú.

IV. DISCUSION

La gestión operacional de las intersecciones con semáforo, es la parte de la infraestructura vial urbana más compleja y desafiante para los Ingenieros Especialistas; dado que, obedece al equilibrio en la distribución del tiempo y del espacio de todos los usuarios que llegan al mismo instante a usar la intersección. En ese sentido, hay tres elementos principales de los cuales depende la eficacia del servicio de la intersección con semáforo: a) la capacidad y correcto diseño de Ingeniería que atienda adecuadamente a todos los movimientos de los usuarios; b) la mezcla de usuarios, es decir, mientras más diferencia y variedad exista entre ellos (peatones, ciclistas, micro movilidad, y todo tipo de motoristas), más complejo y difícil será atenderlos con rapidez y seguridad; y c) la eficiencia del control semafórico, dónde exista tecnología obsoleta, mal diseño de tiempos, repartos de fases y desfases, y los criterios técnicos ampliamente detallados en la presente investigación, peor será su rendimiento.

Los principales beneficios de la tecnología de control de semaforización adaptativo, soportados por la Ingeniería Telemática, sobre los sistemas convencionales son que puede: a) distribuir continuamente el tiempo de luz verde de manera equitativa para todos los movimientos del tráfico; b) mejorar la confiabilidad del tiempo de viaje moviendo progresivamente los vehículos a través de luces verdes; c) reducir la congestión creando un flujo más suave y constante; y d) prolongar la eficacia de la sincronización, optimización y coordinación de intersecciones semaforizadas.

Mejora del flujo de tráfico

Esperar, avanzar, parar, esperar, espera un poco más, y así sucesivamente; hace que la mayoría de los conductores pasen más tiempo echando humo ante los semáforos en rojo. Quizás la intersección estaba vacía, pero el semáforo permaneció en rojo durante un tiempo enloquecedor. O tal vez la vía esté tan congestionada que tenga que esperar tres o más ciclos completos de luz antes de poder girar a la izquierda. ¿Por qué los semáforos no se ajustan a las condiciones reales?

Las tecnologías de control de semáforos adaptativas (ASCT), junto con una sincronización bien diseñada a través de herramientas con los algoritmos matemáticos adecuados, pueden hacer precisamente eso. Al recibir y procesar datos de sensores

ubicados estratégicamente, ASCT puede determinar qué luces deben ser rojas y cuáles deben ser verdes. ASCT ayuda a mejorar la calidad del servicio que los viajeros experimentan en nuestras carreteras y autopistas locales. Menos retrasos innecesarios y el tráfico se mueven de forma rápida y sin problemas. En promedio, el ASCT mejora el tiempo de viaje en más del 10 por ciento. En áreas con tiempos semafóricos particularmente desactualizados, como en el caso de la ciudad de Lima las mejoras pueden ser del 50 por ciento o más.

Respuestas más rápidas a las condiciones del tráfico

El proceso tradicional de temporización del semáforo consume mucho tiempo y requiere cantidades sustanciales de *datos de tráfico recopilados manualmente*, como en ***todos los estudios de tráfico que se hacen en el país***, incluyendo el de la presente investigación. Los planes tradicionales de tiempos, según la hora del día, ***NO se adaptan a las demandas de tráfico variable e impredecible***. Esto produce quejas de los usuarios, conductores frustrados y seguridad vial degradada. En ausencia de quejas (típico en Perú), pueden pasar meses o años (o nunca) antes de que se actualicen los ajustes de sincronización ineficientes. Con ASCT, se recopila información y la sincronización del semáforo se actualiza continuamente.

Los eventos especiales, la construcción o los incidentes de tráfico, ***suelen causar estragos en las condiciones del tráfico***. Si bien se pueden anticipar proyectos de construcción a gran escala y eventos regulares, determinar su impacto en las condiciones del tráfico puede ser extremadamente difícil. Otras interrupciones, como los choques, o atropellamientos son imposibles de adaptarse a la sincronización del semáforo de la hora del día.

Disminuir costos

La sincronización obsoleta genera costos sustanciales para las empresas y los consumidores. Representan más del 10 por ciento de todos los retrasos y la congestión del tráfico solo en las vías principales. Para los consumidores, esto provoca retrasos excesivos y consumo de combustible. Para las empresas, disminuye la productividad y aumenta los costos laborales.

Según el Instituto de Transporte de Texas, el costo de la congestión del tráfico es de ***US$ 87,2 mil millones en un año, en combustible desperdiciado y pérdida de productividad. Eso se traduce en $750 por viajero*** (información actualizada por última vez el 8 de septiembre de 2017). En Lima ni en ninguna ciudad del país, se ha desarrollado nunca un Estudio de Congestión del Tráfico que permita cuantificar objetivamente los mismos indicadores.

Tipos de ASCT

La implementación de ASCT maximizará la capacidad de los sistemas existentes y, en última instancia, reducirá los costos tanto para los usuarios del sistema como para las agencias operativas de transporte urbano. Hay muchas opciones disponibles de muchos proveedores, y hay más en desarrollo. Las tecnologías de control de señales adaptativas disponibles incluyen la técnica de optimización de compensación de ciclo dividido (SCOOT), el sistema de tráfico adaptativo coordinado de Sydney (SCATS), el sistema eficaz distribuido optimizado jerárquico en tiempo real (RHODES) y las políticas optimizadas para el control adaptativo (OPAC) "Ciclo fijo virtual" y ACS Lite.

La satisfacción del cliente

Con ASCT, la FHWA aborda un problema legítimo. El Informe de señales de tráfico de 2007, publicado por la Coalición Nacional de Operaciones de Transporte (NTOC), asignó una calificación general de "D" a las prácticas de operaciones de señales de tráfico en los Estados Unidos, lo que indica que: ***"los programas de la agencia que respaldan el mantenimiento y las operaciones eficientes de las señales de tráfico no son tan eficaces como podrían ser"***. En promedio, los viajeros pasan 36 horas al año en atascos de tráfico.

Otros beneficios

Las tecnologías de control de señales semafóricas adaptativas, también son más respetuosas con el medio ambiente. El uso de ASCT puede reducir las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono debido a la mejora del flujo de tráfico.

V. CONCLUSIONES

La definición de control adaptativo se ha modificado en la última década, pero los primeros pioneros eligieron cuidadosamente la palabra "adaptativo". Una metodología de control adaptativo debe contener un modelo en línea que pueda describir con precisión el comportamiento del flujo de tráfico a lo largo de un corredor semaforizado y su relación con el tiempo de ciclo, el reparto (*split*) y los desfases de coordinación con intersecciones cercanas (*offsets*). Un algoritmo evalúa el rendimiento potencial de varios ajustes de señal mientras busca el óptimo. Los cambios de tiempo derivados se implementan en incrementos pequeños pero frecuentes para evitar una interrupción drástica del flujo de tráfico. De ello se deduce que el control adaptativo no debe simplemente ajustar los tiempos u omitir fases en función de algunas reglas generales. La metodología adaptativa debe ser robusta y, sin embargo, lo suficientemente estable para poder hacer frente a una amplia gama de condiciones de tráfico en diferentes lugares.

El beneficio logrado por el control adaptativo, depende de la condición base del área de estudio en cuestión. A menudo se observan mejoras drásticas, si la condición base no está coordinada y se ejecuta libremente, como en nuestro caso. Por otro lado, si se aplica el control adaptativo a un corredor tranquilo con un conjunto de tiempos de semáforo bien ajustados, se espera que los beneficios, si los hay, sean pequeños. Sin embargo, el desafío es si el beneficio obtenido inicialmente sobre la condición básica se puede mantener de un año a otro a medida que el plan de tiempos semafórico se vuelve obsoleto por el incremento de la tasa de motorización y/o el cambio en el uso del suelo urbano. Esta condición en Lima y otras ciudades peruanas, ha ocurrido de manera drástica por la bonanza económica en el país durante 15 años (2000 – 2015). Por lo tanto, el control adaptativo debe evaluarse unos años después de su implementación.

Predecir el futuro es siempre un poco peligroso, especialmente para los sistemas y servicios intensivos en tecnología, como las telecomunicaciones. Una serie de nuevas tecnologías en este campo se vienen utilizando a gran escala por los Departamentos de Transporte de países que tienen Sistemas Avanzados de Semaforización como: tecnologías inalámbricas de banda ancha y sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID), para usuarios peatonales o personas con movilidad reducida.

VI. RECOMENDACIONES

Los sistemas adaptativos de hoy son más abiertos y flexibles, pero varían considerablemente en cuanto a características proporcionadas. Las siguientes son consideraciones importantes para la selección. El corazón de un sistema de control adaptativo es el algoritmo adaptativo que debe basarse en principios de Ingeniería de Tráfico sólidos y ser capaz de hacer frente a una amplia gama de niveles de tráfico, desde condiciones ligeras hasta congestionadas, utilizando diferentes criterios de optimización. Debe contener un modelo matemático sólido que se pueda ajustar o calibrar para las condiciones locales. Debe optimizar el ciclo, dividir y compensar de manera integrada y producir tiempos racionales que no violen las expectativas del conductor y, por lo tanto, la seguridad. Los cambios de tiempo deben implementarse de forma incremental, pero con una frecuencia de una vez por ciclo.

Para reducir los costos iniciales y de expansión, el sistema debe poder integrarse con la mayoría, si no con todos los controladores que posee la agencia de transporte (Municipalidad), tanto los basados en Protocolo de Comunicaciones NTCIP como los heredados. Por la misma razón, el requisito del detector debe revisarse cuidadosamente. Las comunicaciones solían ser un elemento de costo importante para los sistemas adaptativos, pero con los avances recientes, los usuarios deberían poder esperar una solución flexible y rentable.

Además, el sistema debe asegurar la provisión de un módulo de simulación en tiempo real (como AIMSUN Next20), para evaluar las condiciones antes y después puede ayudar al usuario a ajustar el sistema. Esta herramienta también es muy eficaz para facilitar la formación de los operadores y la planificación de la expansión del sistema.

Finalmente, se recomienda continuar con la investigación de estos sistemas que, por su amplia necesidad y capacidad de implementación en nuestras ciudades, deben ser continuamente estudiados y adaptados a cada realidad de la manera más profesional posible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO, ITE, NEMA (2009). *NTCIP 9001 version v04. National Transportation Communications for ITS Protocol. The NTCIP Guide.* American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Institute of Transportation Engineers (ITE). National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Washington, D.C., Rosslyn, Virginia. USA.

Antoniou C., Barcelo J., Brackstone M., Celikoglu H.B., Ciuffo B., Punzo V., Sykes P.,

BTD (2010). *The Benefits of Retiming/Rephasing Traffic Signals in the Back Bay. Benefit Cost Evaluation of Signal Improvements*. Boston Transportation Department and Howard/Stein-Hudson Associates, Inc.

CEPAL, GTZ (Julio 2003) *Congestión de Tránsito, el problema y cómo enfrentarlo*. Documento de Trabajo. Santiago de Chile.

CEPAL (2001) *Telemática: un nuevo escenario para el transporte automotor*. Documento de Trabajo. ISBN: 92-1-321897-4. Santiago de Chile.

ERTICO (9th September 1998). *Guidebook for Assessment of Transport Telematics Applications: Updated Version Deliverable D2.3.1*. Report.

European Commission (August 1997). *Socio-Economic Impacts of Telematics Applications in Transport. Assessment of Results from the 1992-1994 Transport Telematics Projects*. Report.

Ezell S. (2010). *Intelligent Transportation Systems*. The Information Technology & Innovation Foundation – ITIF. Washington, DC.

FHWA (2019). *TAT Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software 2019 Update to the 2004 Version*. Report No. FHWA-HOP-18-036. United States Department of Transportation. Washington, D.C.

FHWA (2017). *Intelligent Transportation Systems for Traffic Signal Control, Deployment Benefits and Lessons Learned*. Updated Report. Project number FHWA-JPO-17-500. United States Department of Transportation. Washington, D.C.

FHWA (2012). *Model Systems Engineering Documents for Adaptive Signal Control Technology (ASCT) Systems*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration FHWA-HOP-11-027. Washington, D.C.

FHWA (2007). *Intelligent Transportation Systems for Traffic Signal Control, Deployment Benefits and Lessons Learned*. Project number FHWA-JPO-07-004. United States Department of Transportation. Washington, D.C.

FHWA (2006). *Regional ITS Architecture Guidance Document. Developing, Using and Maintaining and ITS Architecture for your Region.* Federal Highway Administration. Washington, D.C.

FHWA (2005). *Traffic Control Systems Handbook*. Publication Number: FHWA-HOP-06-006. Federal Highway Administration. Washington, D.C.

FHWA (2003). *The National ITS Architecture, Version 5.0.* Federal Highway Administration. Washington, D.C.

FHWA (1996). *Traffic Control Systems Handbook*. Publication Number: FHWA-SA-95-032. Federal Highway Administration. Washington, D.C.

FHWA (1993). *Communications Handbook for Traffic Control Systems*. FHWA-SA-93-052. Federal Highway Administration. Washington, D.C.

Fundación Telefónica de España. RIS-220-01. (2000). *Introducción a la telemática y a las redes de datos*. Documento de Trabajo

Gordon, R., Tighe, W. (2005). *Traffic Control Systems Handbook*. Report No. FHWA-HOP-06-006. Washington, DC 20590

Gordon, R., Reiss, R., Dunn, W. & Morehead, D. (1993). *Communications Handbook for Traffic Control Systems*. FHWA-SA-93-052. Washington, DC 20590.

Gutiérrez Cayo, Cesar (2017). *Diseño e implementación de un sistema de control neuro-difuso en un centro de control y monitoreo de tráfico vehicular centralizado para la ciudad de Puno.* Repositorio Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica. Universidad Nacional Del Altiplano – Puno. Perú.

IMT (2004). *Hacia Una Arquitectura Nacional para los Sistemas Inteligentes de Transporte.* Publicación Técnica. Secretaría de Comunicaciones y Transportes del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Queretaro, México.

Leader, S (2004). *Telecommunications Handbook for Transportation Professionals: The Basics of Telecommunications*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-HOP-04-034, Washington, DC.

Ley N° 27972. *Ley Orgánica de Municipalidades*. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 06 de mayo de 2003.

Mercier, P. (1998). *Wireless Communications for Traffic Control Systems*. ITS America'98 Whitepaper. Southlake, TX.

MTC, JICA (2005). *Plan Maestro de Transporte Urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú (Fase 1) Informe Final*. Documento de Trabajo. Agencia De Cooperación Internacional De Japón (JICA), Consejo de Transporte de Lima y Callao, Ministerio de Transportes y Comunicaciones de la República del Perú.

Piteira da Cunha, J. (2016). *Wireless Communication System for Traffic Management and Control*. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Skabardonis A.; Comes G. (2010). *Effectiveness of Adaptive Traffic Control for Arterial Signal Management: Modeling Results*. Final Report for PATH TO 6322. PATH

Research Report UCB-ITS-PRR-2010-33. University of California at Berkeley. Sacramento, CA.

STT, C&M, (2008). *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte*. Secretaría de Tránsito y Transporte de Santa Fe de Bogotá (STT), Cal Y Mayor y Asociados S.C. Colombia.

TfL (2010). *Traffic Modelling Guidelines v3.0*. Transport for London. UK.

Toledo T., Vortisch P., Wagner P. (2014). *Traffic Simulation: Case for guidelines*. Research Centre Institute for Energy and Transport. Luxembourg, EU.

UPM (2003). *Libro Verde de los Sistemas Inteligentes de Transporte*. Documento de Trabajo. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Vangelis E., Tragos C., Adam A., Bassi A. (2017). *Designing, Developing, and Facilitating Smart Cities. Urban Design to IoT Solutions*. Springer International Publishing. Switzerland.

WB (2011). *Passenger Transport ITS Toolkit Handbook*. World Bank Group.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

Problemas General	Objetivos General	Hipótesis General	Variables Independiente	Indicador V.I.	Variables Dependiente	Indicador V.D.
¿La ciudad de Lima necesita un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica, que ayude a mitigar la congestión??	Desarrollar una propuesta técnica, basada en el estado del arte y de la práctica internacional, para la implementación de un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica de la ciudad de Lima, que ayude a aliviar la congestión del tráfico vehicular.	La implementación de un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica de la ciudad de Lima, podría aliviar la congestión del tráfico vehicular hasta en un 30% durante todas las horas del año.		--.--	***Congestión del tráfico***	***horas/año, S/ año***
Problemas Especifico	**Objetivos Específicos**	**Hipótesis Especificas**				
¿Está la Autoridad Municipal preparada técnicamente para los cambios fundamentales en la planificación, el diseño e implementación de sistemas de gestión automatizado ITS?	Presentar los conceptos técnicos y procedimientos metodológicos, para conocimiento de las Autoridades Municipales sobre la implementación de un Sistema de Gestión Automatizado de la red semafórica.	La Autoridad Municipal NO está preparada técnicamente para los cambios fundamentales en la planificación, el diseño e implementación de sistemas de gestión automatizado ITS.	Detenciones en las intersecciones semaforizadas	Si/No	--.--	número de veh. en cola/hora (anualizado)
¿La red semafórica de la ciudad de Lima, tiene un mecanismo de interfaz entre el sistema de control actual de tiempo fijo y una aplicación de control adaptativo-responsivo?	Proponer un mecanismo de interfaz entre el sistema de control actual de tiempo fijo y una aplicación de control adaptativo-responsivo.	La red semafórica de la ciudad de Lima, NO tiene un mecanismo de interfaz entre el sistema de control actual de tiempo fijo y una aplicación de control adaptativo-responsivo.	Demoras en las intersecciones semaforizadas	Si/No	--.--	segundos/vehículo/ hora (anualizado)
¿Está preparada la red semafórica de la ciudad para implementar una aplicación de control de prioridad?	Proponer un mecanismo de aplicación de control de prioridad para la red semafórica.	La red semafórica de la ciudad, NO está preparada para implementar una aplicación de control de prioridad.	Demoras en las intersecciones semaforizadas	Si/No	--.--	segundos/vehículo/ hora (anualizado)
¿Existe un presupuesto potencialmente disponible para implementar un programa ITS?	Revisar el presupuesto designado por la Autoridad Municipal para la implementación del Sistema ITS de control semafórico de la ciudad.	SI existe un presupuesto potencialmente disponible para implementar un programa ITS, que está siendo mal utilizado.	Costo de la implementación del sistema ITS		--.--	Soles

Elaboración propia

Anexo 2: Instrumento de recolección de datos

FLUJO VEHICULAR DIRECCIONAL CLASIFICADO

FORMATO DE CAMPO

INTERSECCION:
ENCUESTADOR:
PERIODO: **FECHA:**
APROXIMACIÓN: **GIROS:**

HORA	AUTOMOVIL (AUTO/MINI VAN/VAN/PICK UP/ST W)			MOTOTAXI			MOTO LINEAL			CAMIONETA RURAL (COMBI)			MICROBUS			ÓMNIBUS			BUS INTERPROVINCIAL			CAMIÓN LIGERO			CAMIÓN PESADO		
:00 :15																											
:15 :30																											
:30 :45																											
:45 :00																											

Fuente: Elaboración propia en base a C&M, 2008.

ESPACIO PARA CONSIGNAR EL NOMBRE DEL ESTUDIO A ADELANTAR	**ESTUDIO DE TIEMPOS DE RECORRIDO Y DEMORAS** **MÉTODO DEL VEHÍCULO EN MOVIMIENTO** *FORMATO DE CAMPO*	*ESPACIO PARA CONSIGNAR LA RAZON SOCIAL Y/O LOGOTIPO DE LA ENTIDAD CONTRATANTE Y DE LA FIRMA CONSULTORA*

Fecha: (D.M.A.)_____ Tramo: _____ Hoja: _____ De: _____

Hora Inicio: _____ Hora Final:_____ Recorrido Nº: _____ Longitud: _____

Condición Climática: _____ Sentido: _____ Velocidad de Flujo Libre: _____ Km/h

Observador: _____ Supervisor: _____ Velocidad de Detención: _____ Km/h

VÍA RECORRIDA	**CRUCE CON VÍA TRANSVERSAL**	**LECTURA DEL ODÓMETRO**	**TIEMPO ACUMULADO DE PARADA**		**TIEMPO TOTAL ACUMULADO** (min -s)	**CAUSA DE LA DEMORA**
			INICIO (min - s)	**FINAL** (min - s)		

MBOLOS PARA CAUSAS DE DEMORAS: S = Semáforo; SP = Señal de "Pare"; GI = Giro a izquierda; GD = Giro a Derecha; VE = Vehículos estacionados; P = Cruce de peatones; B = Transporte Público sirviendo pasajeros; C = Congestión; Para otro tipo de demoras definir el símbolo adecuado

Observaciones: _____

_____

_____

Firma Supervisor: _____ Firma Aforador: _____

Fuente: C&M, 2008.

ESPACIO PARA CONSIGNAR EL NOMBRE DEL ESTUDIO A ADELANTAR	**ESTUDIO DE TIEMPOS DE RECORRIDO Y DEMORAS EN TRANSPORTE PÚBLICO** *FORMATO DE CAMPO*	*ESPACIO PARA CONSIGNAR LA RAZON SOCIAL Y/O LOGOTIPO DE LA ENTIDAD CONTRATANTE Y DE LA FIRMA CONSULTORA*

Fecha: (D.M.A.)_____ Ruta Nº: _____ Nº Vehículo: _____ Nº Orden: _____

Hora Inicio: _____ Hora Final:_____ Empresa: _____

Condición Climática: _____ Terminal de salida: _____ Sentido: _____

Observador: _____ Tipo Vehículo: _____ Hoja: _____ De: _____

VIA RECORRIDA	**CRUCE CON VIA TRANSVERSAL**	**TIEMPO ACUMULADO DE DEMORA**		**TIEMPO TOTAL ACUMULADO** (min -s)	**CAUSA DE LA DEMORA**
		INICIO (min - s)	**FINAL** (min - s)		

SIMBOLOS PARA CAUSAS DE DEMORAS: S = Semáforo; SP = Señal de "Pare"; TPI = Tiempo Perdido Intencional; E = Entrecruzamiento; RE = Resaltos o Resonador; V = Velocidad de Caminata < 5 KPH; ADP = Ascenso Descenso de Pasajeros; C = Congestión; Para otro tipo de demora definir símbo

Observaciones: _____

_____

_____

Firma Supervisor: _____ Firma Aforador: _____

Fuente: C&M, 2008

Anexo 3: Base de datos

Volumen vehicular hora punta tarde de la Intersección Av. Petit Thouars con Av. 28 de Julio

Horas de Control	APROXIMACION (Sur Norte)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23				
13:15-13:30	23		6		2				194		67		0				1		3		2		2		2		0		12		1		2				317	1182	339	1325
13:30-13:45	19		2		0				237		55		0				0		2		1		2		3		0		15		0		1				337	1249	363	1384
13:45-14:00	42		6		0				124		83		0				5		1		1		3		3		0		23		0		2				293	1233	322	1356
14:00-14:15	28		7		6				221		94		0				0		1		0		3		3		0		24		1		3			1	392	1339	429	1453
Tarde	0	112	0	21	0	8	0	0	0	776	0	299	0	0	0	0	0	6	0	7	0	4	0	10	0	11	0	0	0	74	0	2	0	8	0	1				

Horas de Control	APROXIMACION (Este - Oeste)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión				Trailer							
	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33				
13:15-13:30	17				1				256				3				31				16				2				14				1				341	1285	422	1589
13:30-13:45	4				1				221				3				24				11				1				14				2				281	1266	353	1570
13:45-14:00	21				1				305				1				24				17				3				5								377	1282	436	1568
14:00-14:15	8				1				308								13				7				3				19								359	1358	416	1627
Tarde	0	0	50	0	0	0	4	0	0	0	1090	0	0	0	7	0	0	0	92	0	0	0	51	0	0	0	9	0	0	0	52	0	0	0	3	0				

Horas de Control	(Oeste - Este)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión				Trailer							
	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43				
13:15-13:30	2		15						22		188				1		1		26				8				2		1		8						274	1138	324	1348
13:30-13:45	2		14				1		20		191				3		1		21				7				2				8				1		271	1118	316	1320
13:45-14:00	3		12				1		24		206				1		1		26				4								5						283	1162	315	1355
14:00-14:15	1		14						41		220				1		1		20				5				1				4						308	1136	338	1294
Tarde	8	0	55	0	0	0	2	0	107	0	805	0	0	0	6	0	4	0	93	0	0	0	24	0	0	0	5	0	1	0	25	0	0	0	1	0				

Fuente: INTRAPERU SAC

Volumen vehicular hora punta tarde de la Intersección Av. Petit Thouars con Jr. Hernán Velarde

Horas de Control	APROXIMACION (Sur Norte)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión				Trailer							
	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23				
13:15-13:30		2	29				2			8	250	15			0				4				4				2				13				2		331	1307	351	1447
13:30-13:45			21							15	280	30			0				2				3				3				15				1		370	1379	396	1511
13:45-14:00		1	48							11	196	16			0				6				4				3				23				2		310	1326	338	1446
14:00-14:15			35				6			14	296				0				1				3			1	3				25				4		388	1399	428	1513
Tarde	0	3	133	0	0	0	8	0	0	48	1022	61	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	14	0	0	1	11	0	0	0	76	0	0	0	9	0				

Horas de Control	APROXIMACION (Este - Oeste)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión				Trailer							
	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33				
13:15-13:30											2	10																									12	49	12	49
13:30-13:45											3	10																									13	51	13	51
13:45-14:00												7																									7	45	7	45
14:00-14:15											2	19																									21	53	21	53
Tarde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

Horas de Control	(Oeste - Este)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión				Trailer							
	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43				
13:15-13:30										1	1																										2	12	2	12
13:30-13:45										2	4																										6	15	6	15
13:45-14:00										4	3																										7	19	7	19
14:00-14:15																															1						1	16	3	18
Tarde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0				

Fuente: INTRAPERU SAC

Volumen vehicular hora punta tarde de la Intersección Av. Petit Thouars con Jr. Manuel Corpancho

Horas de Control	APROXIMACION (Sur Norte)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión				Trailer							
	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23				
13:15-13:30		9	27				2			68	224				0			1	4				4				0			1	12			0	2		354	1348	367	1467
13:30-13:45		10	20				0			51	280				0			5	2				3				2			1	14			0	1		389	1431	412	1542
13:45-14:00		3	44				0			72	182				0			2	5				4				2			1	21			0	2		338	1398	365	1501
14:00-14:15		1	35				6			53	264				0			5	1				3				3			1	21			0	4		397	1478	434	1577
Tarde	0	23	126	0	0	0	8	0	0	244	950	0	0	0	0	0	0	13	12	0	0	0	14	0	0	0	7	0	0	4	68	0	0	0	9	0				

Horas de Control	APROXIMACION (Este - Oeste)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión				Trailer							
	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33				
13:15-13:30			2	4							78	49							0				0					2				1					136	532	138	541
13:30-13:45			2	1							70	45							0	0			0					1				1					120	537	122	547
13:45-14:00			4	5							83	41							0	1			0					1			1	2					138	535	140	543
14:00-14:15			1	0							88	46							0				0					1			3	4					143	537	155	556
Tarde	0	0	9	10	0	0	0	0	0	0	319	181	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	4	8	0	0	0	0				

Fuente: INTRAPERU SAC

Volumen vehicular hora punta tarde de la Intersección Av. Petit Thouars con Jr. Saco Oliveros

Horas de Control	APROXIMACION (Sur Norte)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23				
13:15-13:30		2	34				1			2	231	2							6				4				2				21					1		306	306	335	335
13:30-13:45		5	31							5	218	3							3				5				2				19					2		293	599	320	655
13:45-14:00		4	36	1			1			4	204	2							4				6				3				23							288	887	318	973
14:00-14:15		1	29							5	265	2							4				4				3				15							328	1215	350	1323
Tarde	0	12	130	1	0	0	2	0	0	16	918	9	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	19	0	0	0	10	0	0	0	78	0	0	0	3	0				

Horas de Control	APROXIMACION (Este - Oeste)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33				
13:15-13:30				4							44	33																									81	81	78	78
13:30-13:45			1	2							35	36																			1						75	156	74	153
13:45-14:00			1	3							36	35																									75	231	72	225
14:00-14:15				3							39	41																									83	314	81	306
Tarde	0	0	2	12	0	0	0	0	0	0	154	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0				

Horas de Control	(Oeste - Este)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43				
13:15-13:30		4	6							33	49																										92	92	85	85
13:30-13:45		3	5							29	52																										89	181	84	169
13:45-14:00		2	6							36	48																										92	273	87	256
14:00-14:15		4	7							33	56																										100	373	93	348
Tarde	0	13	24	0	0	0	0	0	0	131	205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

Fuente: INTRAPERU SAC

Volumen vehicular hora punta tarde de la Intersección Av. Petit Thouars con Jr. Madre de Dios

Horas de Control	APROXIMACION (Sur Norte)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23				
13:15-13:30			32	2						8	222	9							5				5				3			2	16							304	304	331	331
13:30-13:45		1	30	1			1			9	209	9							4				4				1				20					1		290	594	315	646
13:45-14:00			33							10	213	12							7				6				2			2	17					1		303	897	336	982
14:00-14:15		1	28							8	264	15							3				3				3				18					1		344	1241	371	1352
Tarde	0	2	123	3	0	0	1	0	0	35	908	45	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	18	0	0	0	9	0	0	4	71	0	0	0	3	0				

Horas de Control	APROXIMACION (Este - Oeste)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33				
13:15-13:30			2	2							33	6																			1							44	44	43	43
13:30-13:45			1	3							40	4																			1	1						50	94	50	93
13:45-14:00			1	2							34	5																			1	2						45	139	47	141
14:00-14:15				2							35	6																			1							44	183	44	185
Tarde	0	0	4	9	0	0	0	0	0	0	142	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0				

Horas de Control	(Oeste - Este)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43				
13:15-13:30		2	6							4	39																										51	51	46	46
13:30-13:45		3	5							5	44																			1	1						59	110	57	102
13:45-14:00		4	4							2	35																			3	2						50	160	52	154
14:00-14:15		3	6							3	47																										59	219	53	207
Tarde	0	12	21	0	0	0	0	0	0	14	165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0				

Fuente: INTRAPERU SAC

Volumen vehicular hora punta tarde de la Intersección Av. Petit Thouars con Jr. Emilio Fernández

Horas de Control	APROXIMACION (Sur Norte)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23				
13:15-13:30			24	1			1			4	214	8							3				6				5				20				2		288	288	334	334
13:30-13:45		2	27	3						3	228	4							4				4				2			1	15	3			3		299	587	331	664
13:45-14:00		3	22	2			1			4	234	6							6				3				2			1	14				1		299	886	323	987
14:00-14:15			20	3						5	236	8							3				7				1			3	12						298	1184	325	1311
Tarde	0	5	93	9	0	0	2	0	0	16	912	26	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	20	0	0	0	10	0	0	5	61	3	0	0	6	0				

Horas de Control	APROXIMACION (Este - Oeste)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33				
13:15-13:30				3							35	8																			1	1					48	48	49	49
13:30-13:45			2	4							38	10																				2					56	104	55	104
13:45-14:00			2	2							41	9																			2						56	160	56	160
14:00-14:15				3							39	14																			1	2					59	219	61	222
Tarde	0	0	4	12	0	0	0	0	0	0	153	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	0	0	0	0				

Horas de Control	(Oeste - Este)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43				
13:15-13:30		7	2							8	34																			1	2						54	54	52	52
13:30-13:45		5	1							10	29																			3	4						52	106	58	111
13:45-14:00		6	2							8	41																			2	5						64	170	69	180
14:00-14:15		4	1							9	45																				2						61	231	61	241
Tarde	0	22	6	0	0	0	0	0	0	35	149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	13	0	0	0	0	0				

Fuente: INTRAPERU SAC

Volumen vehicular hora punta tarde de la Intersección Av. Petit Thouars con Av. Alejandro Tirado

Horas de Control	APROXIMACION (Sur Norte)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23				
13:15-13:30		5	17				1			12	202	12							4				4				2			4	15	2						280	280	314	314
13:30-13:45		2	19				2			15	222	14							5				6				4			3	10	2				1		305	585	342	656
13:45-14:00		1	20							10	235	11							6				2				3			3	14	3				2		310	895	348	1004
14:00-14:15		1	15				1			8	242	16							2				4				4			2	13	4				1		313	1208	353	1357
Tarde	0	9	71	0	0	0	4	0	0	45	901	53	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	16	0	0	0	13	0	0	12	52	11	0	0	4	0				

Horas de Control	APROXIMACION (Este - Oeste)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33	30	31	32	33				
13:15-13:30			2	5							84	5							4				2								2	2					106	106	115	115
13:30-13:45			1	8							71	7							2				3								5	1					98	204	109	224
13:45-14:00			2	6							72	10							3				1								3	3					100	304	109	333
14:00-14:15			1	5							74	4							4												3	3					94	398	103	436
Tarde	0	0	6	24	0	0	0	0	0	0	301	26	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	13	9	0	0	0	0				

Horas de Control	(Oeste - Este)																																				Total x 1/4 Hora	Suma Horaria	(UCP) 1/4 Hora	(UCP) Suma Horaria
	Transporte Menor								Transporte Privado				Transporte Publico																Transporte Pesado											
	Moto Lineal				Mototaxi				Autos				C.Rural				Microbus				Omnibus				Bus Interprovincial				Camión Ligero				Camión Pesado							
	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43	40	41	42	43				
13:15-13:30		2	4							8	74								4											4	2							98	98	107	107
13:30-13:45		1	2							5	69								2				1							1	2							83	181	89	196
13:45-14:00		6	1							6	74								4				2							2	4							99	280	111	308
14:00-14:15		1	1	1						8	80								8											3	3							105	385	120	428
Tarde	0	10	8	1	0	0	0	0	0	27	297	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	10	11	0	0	0	0	0				

Fuente: INTRAPERU SAC

Anexo 4: Evidencia de similitud digital

Telemática aplicada al transporte urbano. Caso. Sistema de gestión automatizado de la red semafórica de la ciudad de Lima

por Fernando Mauricio Tarquino Torres

Fecha de entrega: 23-nov-2020 12:30a.m. (UTC-0600)
Identificador de la entrega: 1454801154
Nombre del archivo: Upci_-_Tesis_Cuantitativa_-_FERNANDO_TARQUINO.final.v7.docx (39.45M)
Total de palabras: 41416
Total de caracteres: 224552

Telemática aplicada al transporte urbano. Caso. Sistema de gestión automatizado de la red semafórica de la ciudad de Lima

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%	8%	1%	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
2	es.wikipedia.org Fuente de Internet	1%
3	pt.scribd.com Fuente de Internet	1%
4	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	ppp.vialidad.gob.ar Fuente de Internet	<1%
6	www.intraperu.com Fuente de Internet	<1%
7	informaticacobaed106.blogspot.com Fuente de Internet	<1%
8	www.aiu.edu Fuente de Internet	<1%

9	www.aimsun.com Fuente de Internet	<1 %
10	blogsistemas2016.blogspot.com Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
12	dspace.uazuay.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
13	prezi.com Fuente de Internet	<1 %
14	dag.un.org Fuente de Internet	<1 %
15	www.naturalezainterior.org.pe Fuente de Internet	<1 %
16	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
17	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	hdjaramillodianamatematicasdiscretas.blogspot.com Fuente de Internet	<1 %
19	ledisvalerio.simplesite.com Fuente de Internet	<1 %
20	es.qwe.wiki Fuente de Internet	

		<1 %
21	moam.info Fuente de Internet	<1 %
22	archive.org Fuente de Internet	<1 %
23	www.jurisprudencia.pe Fuente de Internet	<1 %
24	www.contratacionvisible.com Fuente de Internet	<1 %
25	www.wni.mx Fuente de Internet	<1 %
26	www.marketingandweb.es Fuente de Internet	<1 %
27	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
28	www.ncbi.nlm.nih.gov Fuente de Internet	<1 %
29	cursoespecializacionupes.blogspot.com Fuente de Internet	<1 %
30	context.reverso.net Fuente de Internet	<1 %
31	repositorio.unican.es Fuente de Internet	<1 %

32	doaj.org Fuente de Internet	<1 %
33	inba.info Fuente de Internet	<1 %
34	globallynx.com.mx Fuente de Internet	<1 %
35	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
36	www.segob.gob.mx Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
38	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
39	fr.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
40	www.trg.soton.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
41	losunicornios.es Fuente de Internet	<1 %
42	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
43	feelbe.uno	

	Fuente de Internet	<1 %
44	www.goconqr.com Fuente de Internet	<1 %
45	oms-vienne.info Fuente de Internet	<1 %
46	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
47	documents.mx Fuente de Internet	<1 %
48	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
49	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
50	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
51	www.cnc.chukyo-u.ac.jp Fuente de Internet	<1 %
52	doepke.de Fuente de Internet	<1 %
53	Silvia Marzal Romeu. "Concepción e integración de arquitecturas y protocolos de comunicación dentro de sistemas de supervisión y control de microrredes inteligentes", Universitat Politecnica	<1 %

de Valencia, 2019
Publicación

54	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
55	www.abengoa.es Fuente de Internet	<1 %
56	rmib.mx Fuente de Internet	<1 %
57	www.usabilidad.org Fuente de Internet	<1 %
58	Daniel Vizcardo Otazo. "Estudio de los principales bienes culturales inmaterials del Centro Histórico de Lima", Investigaciones Sociales, 2014 Publicación	<1 %
59	www.clubensayos.com Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 15 words
Excluir bibliografía	Activo		

Anexo 5: Autorización de publicación en repositorio

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS E INFORMÁTICA

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN O TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UPCI

1.- DATOS DEL AUTOR

Apellidos y Nombres: TARQUINO TORRES FERNANDO MAURICIO

DNI: 09394042 Correo electrónico: FTARQUINO72@YAHOO.COM

Domicilio: JR. FRANCISCO DE ZELA 1869 DPTO 1705 - LINCE - LIMA

Teléfono fijo: — Teléfono celular: 997205160

2.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO Ó TESIS

Facultad/Escuela: CIENCIAS E INGENIERIA / INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES

Tipo: Trabajo de Investigación Bachiller ( ) Tesis (X)

Título del Trabajo de Investigación / Tesis:

TELEMÁTICA APLICADA AL TRANSPORTE URBANO, CASO. SISTEMA DE GESTIÓN AUTOMATIZADO DE LA RED SEMAFÓRICA DE LA CIUDAD DE LIMA

3.- OBTENER:

Bachiller ( ) Título (X) Mg. ( ) Dr. ( ) PhD. ( )

4. AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN VERSIÓN ELECTRÓNICA

Por la presente declaro que el documento indicado en el ítem 2 es de mi autoría y exclusiva titularidad, ante tal razón autorizo a la Universidad Peruana Ciencias e Informática para publicar la versión electrónica en su Repositorio Institucional (http://repositorio.upci.edu.pe), según lo estipulado en el Decreto Legislativo 822, Ley sobre Derecho de Autor, Art23 y Art.33.

Autorizo la publicación de mi tesis (marque con una X):
(X) Si, autorizo el depósito y publicación total.
( ) No, autorizo el depósito ni su publicación.

Como constancia firmo el presente documento en la ciudad de Lima, a los 16 días del mes de OCTUBRE de 2020.

Firma

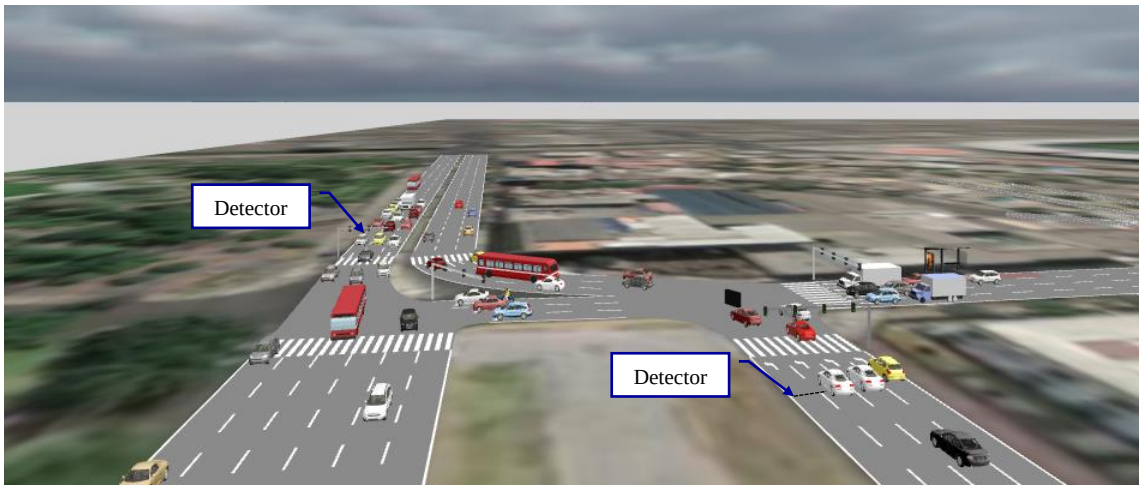
Anexo 6: Vistas en 3D de los escenarios modelados

INTERSECCIÓN AV. PETIT THOUARS – AV. 28 DE JULIO

Escenario Actual

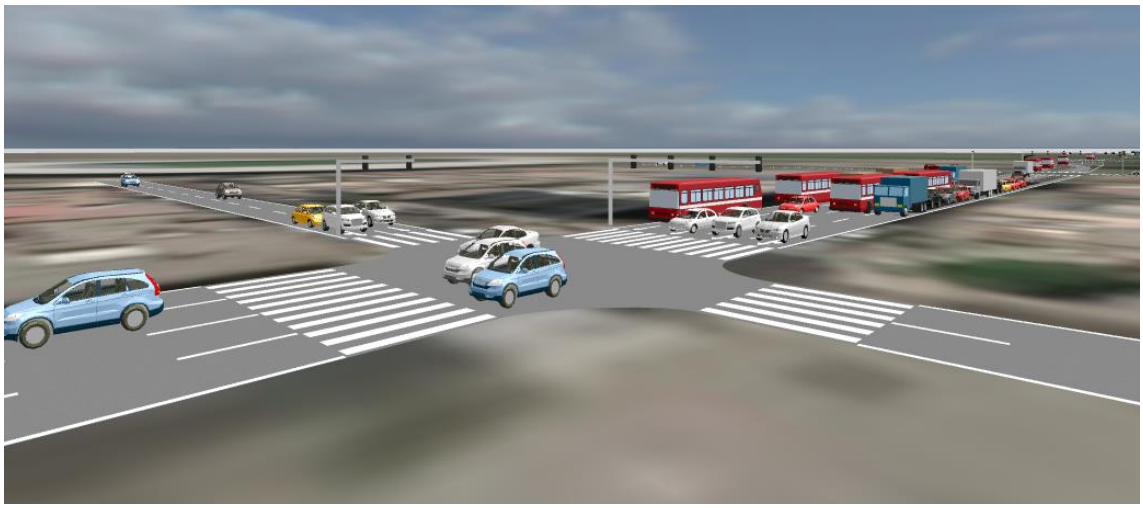
Escenario Propuesto 1

Escenario Propuesto 2



INTERSECCIÓN AV. PETIT THOUARS – JR. MANUEL CORPANCHO

Escenario Actual



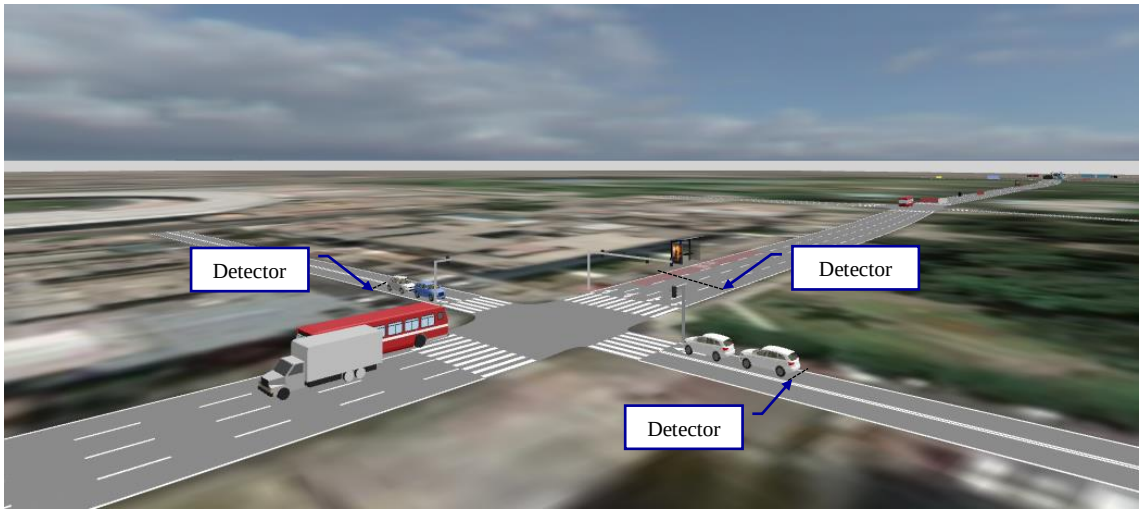
Escenario Propuesto 1

Escenario Propuesto 2

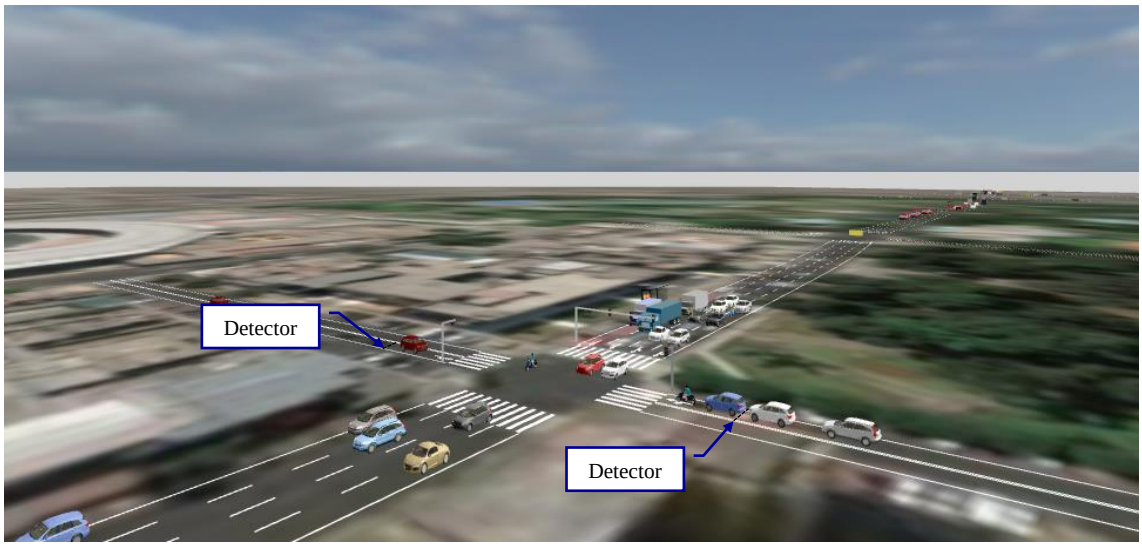
INTERSECCIÓN AV. PETIT THOUARS – JR. SACO OLIVEROS

Escenario Actual

Escenario Propuesto 1



Escenario Propuesto 2



INTERSECCIÓN AV. PETIT THOUARS – JR. EMILIO FERNÁNDEZ

Escenario Actual

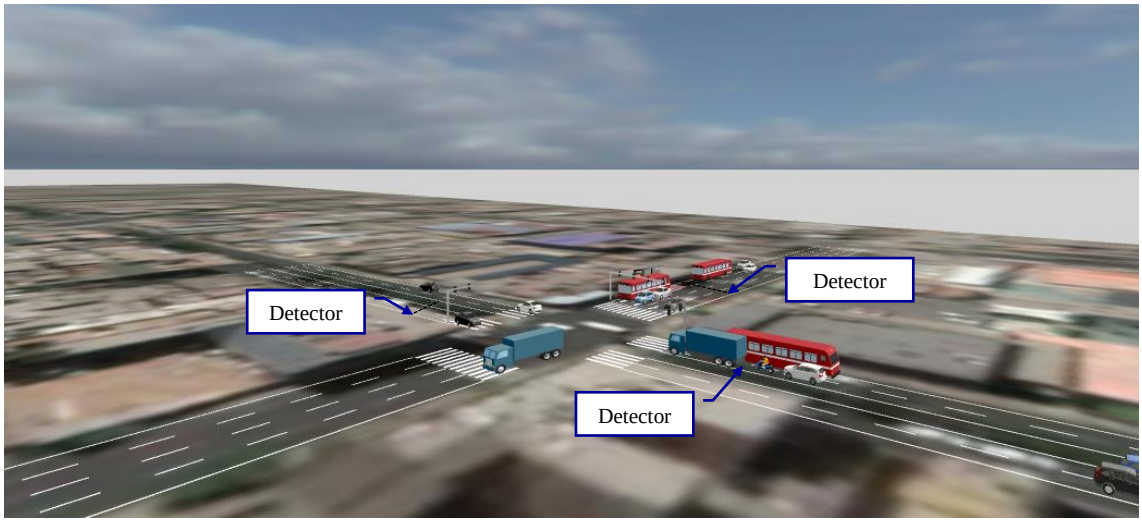
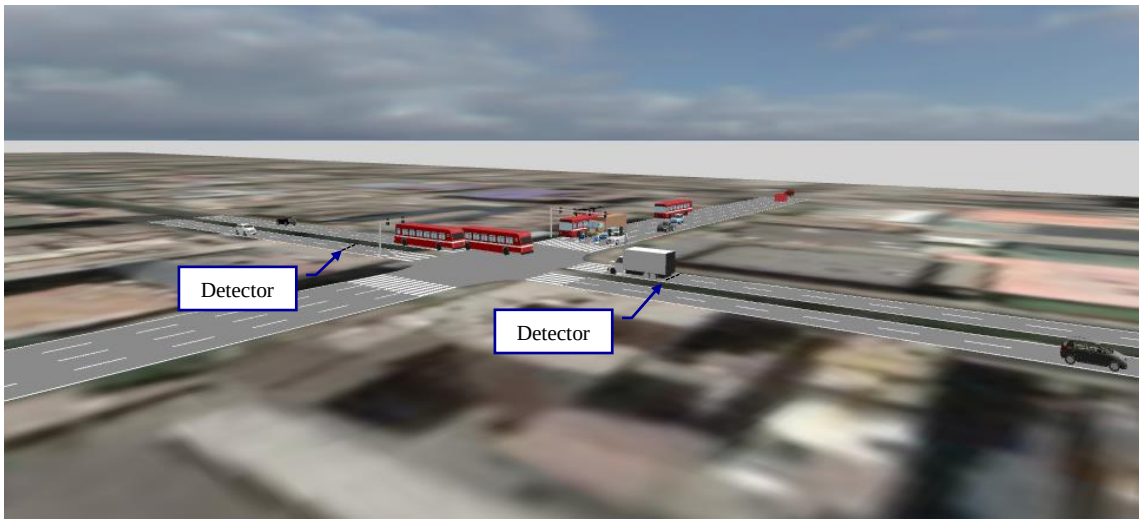
Escenario Propuesto 1

Escenario Propuesto 2

INTERSECCIÓN AV. PETIT THOUARS – AV. ALEJANDRO TIRADO

Escenario Actual

Escenario Propuesto 1



Escenario Propuesto 2