

Sistema de gestión y operación de la red semafórica de la ciudad de Lima

FERNANDO MAURICIO TARQUINO TORRES ¹

RECIBIDO: 17/11/2022 ACEPTADO: 13/04/2023 PUBLICADO: 20/12/2023

RESUMEN

El problema de investigación surgió de la necesidad de implementar un sistema que permita manejar a distancia las operaciones de tráfico de la red de semáforos para reducir la congestión vehicular. El procedimiento consistió en el diseño computacional de la ubicación de sensores electrónicos que se encargan de llevar la cuenta vehicular en el campo, con la finalidad de evaluar diferentes estrategias operacionales de modificación de tiempos de las señales del semáforo propuestas, mediante un modelo de simulación. El área de estudio está compuesta por las siete intersecciones ubicadas el tramo de la Av. Petit Thouars (entre las avenidas Alejandro Tirado y 28 de Julio, en la ciudad de Lima). Se instalaron sensores en los accesos de las calles secundarias a la vía principal, la Av. Petit Thouars, los cuales arrojaron resultados acumulados positivos. Las alternativas 1 y 2 produjeron una reducción de colas del 59%, con lo que se demostró que la hipótesis general es válida.

Palabras clave: semaforización adaptativa, estimación de la congestión, sistemas inteligentes.

INTRODUCCIÓN

El presente artículo representa un esfuerzo académico que pretende complementar criterios técnicos sobre la gestión de sistemas de semáforos que no están incluidos en los Manuales de Dispositivos de Control de Tránsito para Calles y Carreteras del Perú ni en sus homólogos de América Latina, en los cuales se basan importantes conceptos relacionados con la Ingeniería de Tránsito Urbano.

La operación de un sistema de control de tráfico debe reflejar fielmente las metas y objetivos de la política de una ciudad. La gestión de los semáforos es importante porque impactan directamente en la calidad del sistema de transporte, virtualmente a todos, todos los días. Los conductores perciben que la operación de la intersección semaforizada funciona si las luces se encienden en los colores rojo, amarillo y verde. Sin embargo, no son conscientes de que optimizar los tiempos de la intersección puede reducir indicadores como retrasos, paradas, consumo de combustible, emisiones a la atmósfera y siniestros viales (Federal Highway Administration [FHWA], 2020). Así, un semáforo que no proporcione tiempo suficiente para cruzar la calle, por ejemplo, puede crear una experiencia desagradable y desanimar por completo el desplazamiento a pie. Del mismo modo, los retrasos significativos pueden provocar que los usuarios ignoren el semáforo o corran demasiados riesgos al llegar a las intersecciones (National Association of City Transportation Officials [NACTO], 2013, p. 126).

Day et al. (2014) sostienen que, de acuerdo con la teoría económica aplicada al análisis de los sistemas de transporte, se espera que los cambios en el nivel de servicio de una infraestructura induzcan cambios en el nivel de demanda. Es sabido que la reprogramación de los sistemas de semáforos tiene beneficios directos para las operaciones en redes viales urbanas. Sin embar-

¹ Doctor. Máster en Ingeniería de Transporte. Ingeniero de Transportes (CIP 71380). Actualmente, es director en Ingeniería de Transportes del Perú SAC y docente universitario contratado de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Federico Villarreal (Lima, Perú).
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6635-8406>
E-mail: ftarquino@unfv.edu.pe

go, a menudo es difícil cuantificar estos beneficios en términos de reducciones de costos para el usuario y beneficios ambientales (Day et al., 2010). Por ejemplo, el proyecto de mejoras en los tiempos del semáforo de 60 intersecciones en el barrio de Back Bay, en Boston encontró mejoras en la relación costo-beneficio de 61:1 (\$1,205,400 y \$1,718,000 dólares americanos por año en implementación de las Fases 1 y 2 respectivamente) (Boston Transportation Department y Howard/Stein-Hudson Associates, Inc., 2010). En ese sentido, las mejoras en las operaciones del sistema de semáforos son un esfuerzo especial que forma parte de la gestión del tráfico, pero requiere un conjunto particular de especialización, experiencia y recursos. Los impactos de las operaciones de las intersecciones con semáforo a menudo se subestiman en la elaboración de presupuestos y niveles de personal en muchas agencias de transporte, incluso en Estados Unidos.

El recálculo y la actualización permanente de las fases y repartos de verdes de los semáforos es una actividad fundamental y permanente de la gestión del sistema de control de tráfico (National Operations Center of Excellence, 2019; National Cooperative Highway Research Program [NCHRP], 2010). Los algoritmos matemáticos que se encuentran incorporados en los modelos de optimización de tiempos de sistemas de análisis de tráfico urbano (en softwares diseñados específicamente para este fin) tienen la capacidad de recibir los datos proporcionados por los sensores de tráfico y adaptar los tiempos de los semáforos a las condiciones actuales. Además de garantizar una gestión más eficiente del desplazamiento del caudal del tráfico sobre la red, la aplicación correcta de la ingeniería en la semaforización activada también compromete el uso de menos recursos humanos² y financieros para actualizar la base de datos de tráfico del sistema (Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2015).

El objetivo de esta investigación fue desarrollar una propuesta técnica basada en los conceptos internacionalmente aceptados y adoptados para la puesta en marcha de un sistema de gestión operacional de intersecciones semaforizadas en la ciudad de Lima, que ayude a aligerar la muy elevada congestión vehicular: 16/7 horas del día de una semana típica. Para ello, se partió de la hipótesis que plantea que la implementación del sistema propuesto contribuiría a descongestionar el tráfico vehicular hasta en un 30% durante todas las horas del año.

² Empleo de un número reducido de efectivos policiales que operan cruces congestionados en horas punta.

En 2016, se creó el Proyecto Especial para la Gestión de Tránsito en Lima Metropolitana - Protránsito, adscrito a la Gerencia Municipal de Lima Metropolitana, que administra y planifica integralmente la gestión del tránsito a través de la Red Semafórica Centralizada y todos sus componentes (Protránsito, s.f.). Exactamente el último día útil del año 2017, la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML), suscribió un contrato por casi 120 millones de soles para el Proyecto de Adquisición e Implementación y Puesta en Marcha de los Proyectos de Semaforización de la Provincia de Lima - Licitación Pública N.º 015-2017-CS/MML. El estudio justifica su esencia con base en que el proyecto tiene más de cuatro años sin entregar ningún éxito probado en la reducción de tiempos de viaje para la ciudad de Lima. Finalmente, el estudio no presenta limitaciones en cuanto a que las opciones de evaluación y contrastación de la hipótesis son atendibles con los recursos de levantamiento de información y herramientas de simulación de tráfico vehicular con los que cuenta el autor.

Tipos de control semafórico

Según el Manual de Capacidad Vial de Estados Unidos (Transportation Research Board [TRB], 2022), utilizado como documento fuente en todo lo relacionado a la Ingeniería de Transporte y Tránsito en el Perú y América Latina, hoy en día se utilizan dos tipos de controladores de semáforos que se clasifican en controladores de tiempo fijo (*pre-timed*) y controladores actuados (*actuated*) según el tipo de control que brindan.

El controlador preprogramado o de tiempo fijo emplea una secuencia fija de fases o etapas de operación, que generan un orden repetitivo de la sesión del movimiento. La duración de cada fase es fija. La combinación entre secuencia de fase y tiempos fijos proporciona una longitud del ciclo constante en segundos.

El controlador actuado, activado o accionado suele tener una secuencia de fases o etapas de operación predefinidas, en la que el inicio y cierre de cada una de ellas depende de si la fase está en recuperación o si el movimiento de tráfico asociado ha presentado una llamada de servicio a través de un detector. El tiempo en verde está determinado por la información vehicular obtenida del detector, sujeta a límites mínimos y máximos preestablecidos. Para que una fase activa culmine, se requiere de una llamada de servicio de un movimiento vehicular en conflicto. La operación de una fase puede omitirse si no se detecta ninguna demanda de usuarios.

Consideraciones iniciales para determinar el tiempo del semáforo

La Tabla 1 resume la información básica que un profesional podría analizar como parte de los tres primeros pasos del proceso basado en resultados (TRB, 2015).

Detección

La Figura 1 ilustra el flujo de entradas y salidas hacia y desde las diversas piezas del equipo tecnológico en una intersección semaforizada individual. Hay tres categorías principales de equipos de semaforización en una intersección: (1) detección, (2) equipo de gabinete y (3) luces. Los sensores detectan a los usuarios y comunican al equipo computacional del gabinete su presencia en una intersección. El equipo del gabinete (el controlador en particular) interpreta las entradas de los sensores y las traduce en salidas en función del plan de tiempos. Luego, la información de salida se envía a las luces para que los usuarios puedan circular por la intersección (TRB, 2015).

Las zonas de detección pueden variar en función de la ubicación, el tipo de tecnología de detección

utilizada y la velocidad de aproximación. La Figura 2 ilustra un enfoque básico para la ubicación de la zona de detección en la intersección de una calle principal de alta velocidad (se muestra a la izquierda/derecha) y una calle secundaria de baja velocidad (se muestra arriba/abajo) (TRB, 2015).

La Tabla 2 resume los objetivos principales para diferentes tipos de detección.

Generalidades sobre fases

Las fases (Φ_s) representan el método fundamental por el que una señal del semáforo acomoda a los diversos usuarios en una intersección de manera segura y eficiente. A lo largo de los años, la descripción de los *movimientos individuales* en el controlador con una configuración de barreras y anillos, con 8 movimientos como *fases* o *etapas* se ha convertido en una terminología común conocida como *número del movimiento*, sinónimo de *número de fase*. Esto es un error. La mayoría de los diseños de tiempos y todos los controladores vendidos en la actualidad proporcionan ocho fases estándar dentro del controlador. Sin embargo, en la literatura se hace referencia comúnmente a una intersección de cuatro fases para representar una intersección

Tabla 1. Consideraciones iniciales de sincronización.³

Proceso basado en resultados		Consideraciones iniciales del tiempo del semáforo	
PASO 1 Definir el ambiente operativo	Impactos multijurisdiccionales	¿El sistema de semaforización está ubicado en múltiples jurisdicciones?	
		Si es así, ¿es el desempeño del sistema consistente a través de ellas?	
		¿Existe algún acuerdo que defina ciertos parámetros para establecer un sistema consistente?	
	Clasificación vial	¿Cómo está clasificada la red vial (calles principales y secundarias)?	
		¿Existen necesidades específicas para peatones, ciclistas, red de carga o rutas de transporte público?	
		Red de transporte	¿Qué tan cerca se encuentran espaciadas las intersecciones?
			¿Existe una razón para considerar un sistema de red?
¿Está la calle secundaria coordinada?			
	¿Existe cerca un tren (carga y/o pasajeros) que requiera preferencia?		
PASO 2 Identificar a los usuarios	¿Cuál es la combinación de usuarios existente (p. ej. peatones, bicicletas, vehículos ligeros, vehículos pesados incluyendo camiones y autobuses, vehículos de prioridad y trenes de carga y/o pasajeros)?		
	¿La combinación de usuarios cambia a lo largo del día?		
PASO 3 Establecer prioridades de usuarios y movimientos	¿Cuáles son los usuarios críticos en la(s) intersección (intersecciones)?		
	¿Cambia el usuario crítico durante el día?		
	¿La jurisdicción tiene alguna política relacionada con prioridades de usuarios?		
	¿Cuáles son los movimientos críticos?		

Fuente: Elaboración propia, adaptado del TRB (2015), NCHRP Report 812, Exhibit 3-5.

³ Sincronizar una intersección consiste simplemente asignar tiempos a las señales del semáforo, sean o no los más apropiados. Optimizar dichos tiempos, es una técnica avanzada de sincronización basada en algoritmos matemáticos que eligen los mejores tiempos de acuerdo a la demanda. Coordinación es el término correcto para describir una secuencia de tiempos y fases entre dos o más intersecciones sincronizadas que garantizan la fluidez del tráfico en el sentido coordinado.

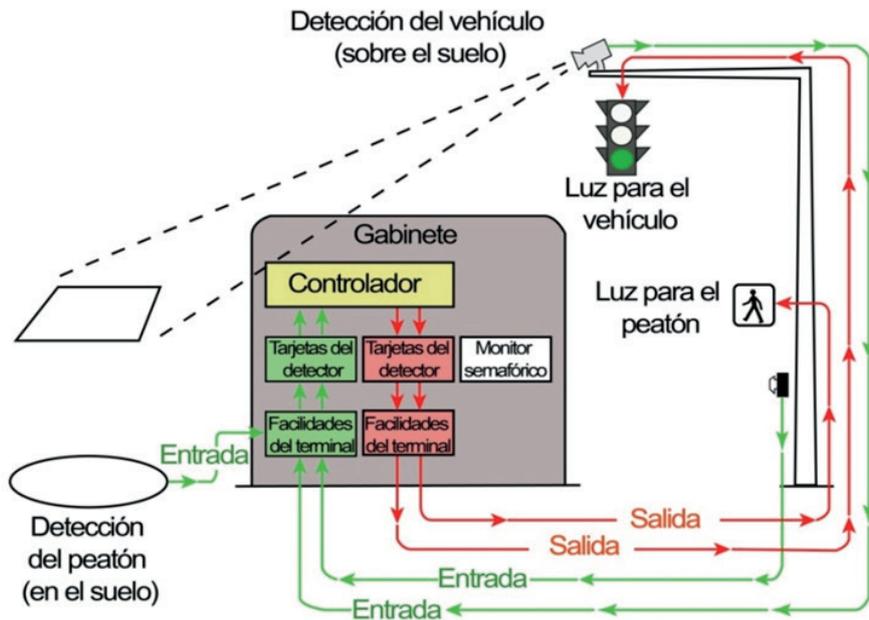


Figura 1. Flujo de entradas y salidas de sensores, equipo de control y luces.

Fuente: Elaboración propia, adaptado del TRB (2015), NCHRP Report 812, Exhibit 4-1.

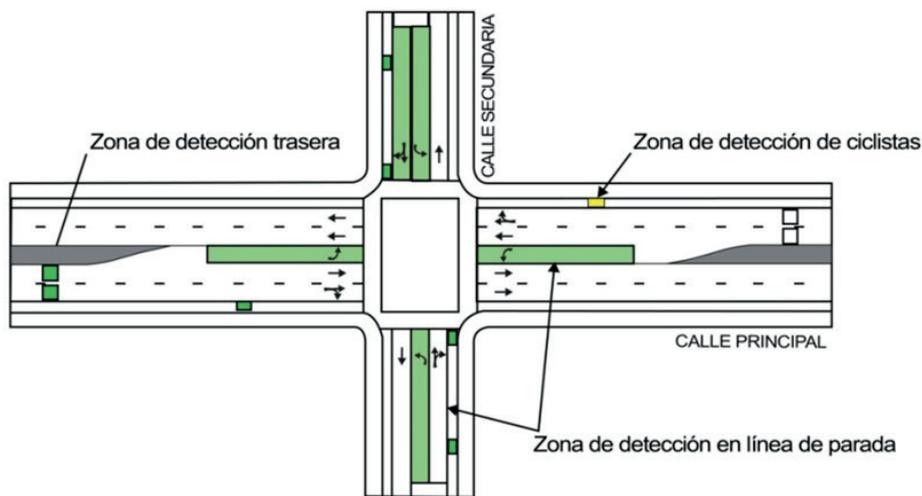


Figura 2. Diseño básico de detección.

Fuente: Elaboración propia, adaptado del TRB (2015), NCHRP Report 812, Exhibit 4-4.

de cuatro accesos estándar con giros a la izquierda permitidos en todos los accesos. Una fase se define como una unidad de tiempo del controlador asociada con el control de uno o más movimientos simultáneos (FHWA, 2008, p. 93).

Dos términos adicionales importantes para mejorar el uso de la terminología relacionada son movimiento e intervalo. Un movimiento refleja la perspectiva

del usuario y se define por el tipo de usuario y la acción que se realiza (movimiento de giro para un vehículo o cruce de peatones). Un ejemplo sencillo del concepto de movimientos es la intersección de calles de un solo sentido que se muestra en la Figura 3. En este ejemplo, la intersección es operada por dos fases (2 y 4) y los peatones se acomodan como movimientos concurrentes al tráfico. La fase 2 incluirá un movimiento de paso y otro de giro a

Tabla 2. Objetivos de la detección.

Tipo de detección	Objetivo(s) principal(es)
Detección de vehículos en aproximaciones de alta velocidad	Servir a la cola al inicio del verde
	Terminación segura de la fase cuando existe un llamado en conflicto
Detección de vehículos en aproximaciones de baja velocidad	Llamar a fases en aproximaciones de baja velocidad
	Servir a la cola al inicio del verde
	Minimizar la demora reduciendo los llamados a movimientos permitidos
Detección de vehículos en el carril de volteo a la izquierda	Llamar a fases de volteo a la izquierda
	Servir a la cola al inicio del verde
	Minimizar la demora reduciendo transiciones ineficientes
	Prevenir a vehículos que se quedan atorados en medio de la intersección
Detección de vehículos en el carril de volteo a la derecha	Minimizar demoras reduciendo llamados por vehículos que voltean a la derecha en rojo
	Llamar a fases de volteo a la derecha (si se usan)
Detección peatonal	Llamado de fases peatonales
Detección de ciclistas	Llamado de fases independientes a carriles motorizados o carriles bici
	Prevenir atropellamientos a ciclistas si se usan fases independientes
	Eliminar la necesidad para ciclistas de usar fases para peatones
Detección de vehículos de emergencia	Permitir las opciones de tratamiento preferencial para vehículos de emergencia
Detección de autobuses	Permitir las opciones de tratamiento preferencial para vehículos de transporte público
Detección de trenes	Garantizar la seguridad y eficiencia de la secuencia semafórica antes, durante y después del paso de trenes.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de TRB (2015), NCHRP Report 812, Exhibit 4-5.

la derecha, mientras que la fase 4 tendrá un movimiento de paso y un giro a la izquierda (los movimientos de giro apropiados se omiten en el diagrama). El giro a la derecha en la fase 2 debe ceder el paso a los peatones que cruzan el tramo oeste de la intersección. Un intervalo es una duración de tiempo durante el cual las indicaciones de la señal del semáforo no cambian. Por ejemplo, una fase de peatones contiene tres intervalos: Caminar, Intermitente «no caminar» y No caminar; dentro de los intervalos Caminar e Intermitente «no caminar», el movimiento de paso correspondiente permanecerá en verde (FHWA, 2008, p. 93).

Coordinación de redes de semáforos

La coordinación, o denominada más apropiadamente progresión, se refiere al momento en el que las señales del semáforo permiten que un pelotón de automóviles (u otros usuarios de la red, también existe progresión para ciclovías, por ejemplo) que circula por una calle llegue a una sucesión de semáforos en verde y avance a través de múltiples intersecciones sin detenerse. Un sistema de señales semafóricas bien coordinado puede mejorar el flujo de tráfico, reducir las demoras y minimizar la contaminación. Las calles arteriales y redes del centro de la ciudad son ejemplos de ello. Diversos facto-

res influyen la decisión de utilizar la coordinación de redes de semáforos, pero lo más importante que debe tener en cuenta un profesional es el entorno operativo, los usuarios y las prioridades apropiadas de estos.

La coordinación debe ser utilizada para cumplir objetivos específicos, pues no es apropiada en todas las situaciones. Si bien la coordinación puede reducir el tiempo de viaje, las paradas, las demoras y las colas para los movimientos coordinados, lo que reduce el consumo de combustible y mejora la calidad del aire, puede haber consecuencias para los movimientos no coordinados (FHWA, 2008).

Se pueden usar procedimientos simples y complejos para identificar qué intersecciones coordinar (FHWA, 2005). En general, cuando las intersecciones están próximas entre sí (es decir, a unos 800 metros), resulta ventajoso coordinarlas, especialmente si los volúmenes entre las intersecciones son significativos. A distancias mayores (es decir, a más de 800 metros), los volúmenes de tráfico y el potencial para los pelotones se deben revisar más para determinar si la coordinación beneficiaría a las operaciones del sistema.

La Figura 4 ilustra el concepto de vehículos en movimiento a través de un sistema de semáforos, uti-

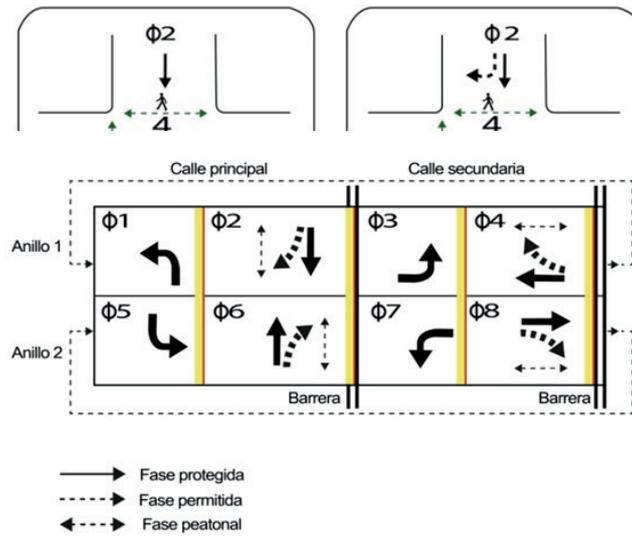


Figura 3. Diagrama de fases, movimientos y barrera-anillo estándar, para una intersección de dos calles de un solo sentido.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de FHWA (2008), Figuras 4-2 y 4-4.

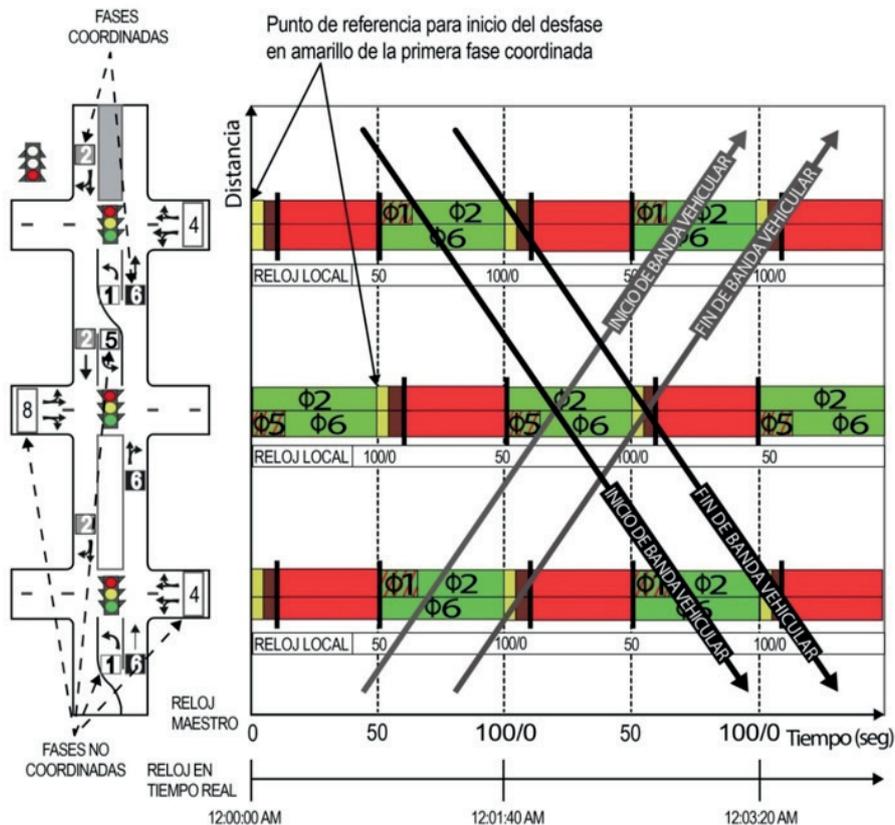


Figura 4. Diagrama tiempo-espacio de un plan coordinado.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de TRB (2015), NCHRP Report 812, Exhibit 7-1.

lizando una representación gráfica conocida como un diagrama de tiempo-espacio. En este gráfico se trazan las trayectorias ideales del vehículo a través de una serie de intersecciones semaforizadas. Las ubicaciones de las intersecciones se muestran en el eje de la distancia y los vehículos viajan en ambas direcciones en una vía de doble sentido. La secuencia de tiempo del semáforo y los repartos para cada intersección semaforizada se trazan a lo largo del eje del tiempo. El eje del tiempo ilustra lo que experimentarán los motoristas en la arteria mientras viajan por ella. Los giros a la izquierda se muestran como líneas en ángulo que operan con un verde concurrente en la misma dirección o no (TRB, 2015).

METODOLOGÍA

La perspectiva del proyecto consiste en la base teórica y el modelado de simulación, que incluye la propuesta de ubicación de sensores para las estrategias de control semaforico de campo. Se puso especial énfasis en la respuesta que el control adaptativo generó sobre la longitud de la cola de la situación actual de la semaforización de tiempo fijo, es decir, sin la implementación de dicho control. Los beneficios se miden evaluando y comparando 1) el sistema de operación semaforica de tiempo fijo con planes de control existente y 2) el sistema de control adaptativo con nueva tecnología de hardware y software para optimización de los planes existentes. La Figura 5 ilustra la metodología propuesta.

Modelado de simulación

Existen una amplia gama de herramientas computacionales disponibles para modelar condiciones

operacionales de sistemas semaforicos. Sin embargo, solo muy pocas permiten evaluar la reacción a los datos proporcionados por los sensores de control de sistemas adaptativos. En ese sentido, se seleccionó Aimsun Next como el software para simular las estrategias de control, dado que posibilita la visualización de las mejoras en el plan de control de tiempos y la evaluación del desempeño de control adaptativo.

Calibrando las condiciones de línea base

Calibrar un modelo de simulación de tráfico es un paso fundamental para asegurar que dicha herramienta refleje el comportamiento real del área de estudio. En ese sentido, es necesario recopilar información fidedigna de la red vial, los patrones de tráfico y los algoritmos de tráfico multimodal.

En lo que respecta a la red vial, es necesario recopilar información sobre la geometría idéntica a la vialidad en estudio (perfiles, alturas, radios, movimientos de giro y secciones) y gráficos de control de la velocidad multimodal, movimientos de giro y semáforos (fases, tiempos, desfases).

En lo que respecta a los patrones de tráfico, es necesario recopilar información sobre el flujo de entrada al modelo del área de estudio y porcentajes de movimientos los cruces, la elección de modelos de asignación de tráfico dinámico (si es que el software lo permite) para modelar el recorrido y la calibración y reparto del tráfico para balanceo y equilibrio de la red vial.

En lo que respecta a los algoritmos de tráfico multimodal, es necesario recopilar información sobre los

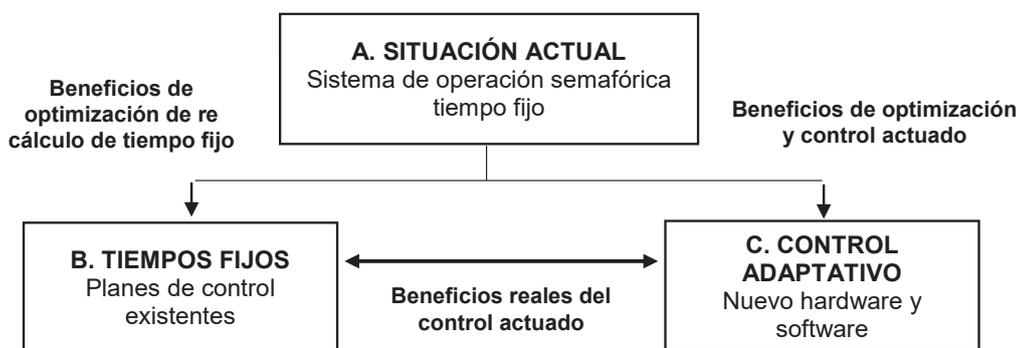


Figura 5. Medición de los beneficios del control operacional adaptativo en intersecciones con semáforo.

La comparación de B versus C proporciona los verdaderos beneficios del control adaptativo del Centro de Gestión de Tráfico (TMC, por sus siglas en inglés).

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Skabardonis (1996).

modos, cambios de carril, aceptación de brechas, etc., si es que el software permite calibrar estos comportamientos (p. ej. conductor agresivo, relajado, situación de lluvia, etc.).

Estadístico de calibración GEH

El estadístico GEH (Ec. 01) se utiliza en Ingeniería de Tráfico para comparar dos conjuntos de datos de tráfico. Beeston et al. (2021) sostiene que es una fórmula empírica que ha demostrado ser bastante definida. Fue denominada en honor a Geoffrey E. Havers, quien la determinó en la década de 1970 cuando trabajaba como planificador de transporte en Londres, Inglaterra. 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. Ambos son consistentes con los parámetros descritos en la Tabla 3.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(E - V)^2}{E + V}} \quad \text{Ec. 01}$$

Donde:

GEH = Indicador estadístico; E = Volumen estimado del modelo; y V = Volumen medido en campo

Elección del área de estudio

La elección del tramo la Av. Petit Thouars (entre la Av. Alejandro Tirado y la Av. 28 de Julio) se justifica porque en esa vía se desarrolló un proyecto de coordinación de semáforos en el año 2010 a cargo de la MML, el cual no consideró la calibración de los flujos de las calles transversales. Además, no fue desarrollado con base en un modelo de simulación como el propuesto, ni tampoco cuenta con una actualización de los tiempos conforme al aumento de la tasa de motorización propia de cualquier ciudad capital (es del orden de 2.5% anual para Lima). Todas estas consideraciones otorgan relevancia al estudio de esta propuesta. En ese sentido, se modelaron cinco (05) cruces controlados con semáforos y dos (02) cruces viales de prioridad o sin semáforo (ver Figura 6 y Tabla 4).

Propuesta de escenarios de análisis para la modelación

Actualmente, los cruces evaluados cuentan con semáforos de tiempo fijo, excepto los dos que tienen señal de PARE. La primera propuesta contempla colocar sensores en todos los accesos de los cinco

Tabla 3. Descripción de los parámetros del indicador estadístico GEH.

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

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Beeston et al. (2021), Tabla 12. Ecuación de Geoffrey E. Havers, 1970.

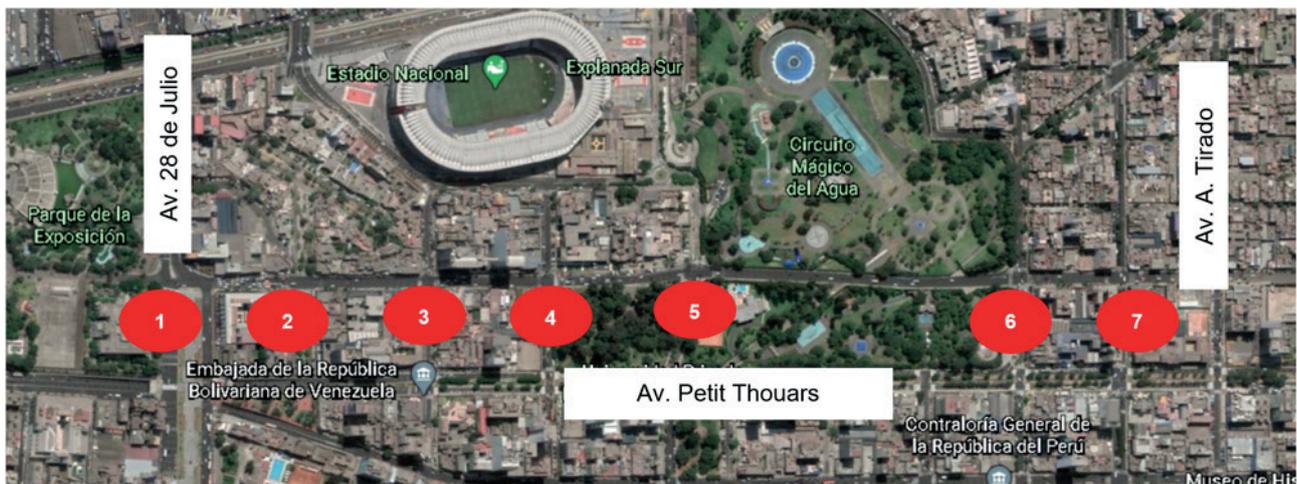


Figura 6. Selección del área del proyecto.

Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth.

cruces semaforizados evaluados. Cada sensor de detección registra y transmite la cantidad de vehículos que circulan en un período de tiempo. El siguiente escenario contempla colocar sensores para el control solo en las calles transversales o secundarias a la Av. Petit Thouars, con el fin de mantener la coordinación semaforizada actual de los movimientos directos de dicha avenida. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la ubicación de los sensores para ambos escenarios, que se repiten para toda la red.

RESULTADOS

Validación del modelo

Los resultados mostrados en la Tabla 5 respaldan la validez de los modelos de simulación de tránsito en todos los escenarios, dado que los indicadores GEH son menores que 5 (ver Tabla 3) en todos los accesos analizados.

Comparación de escenarios

Para continuar con el mismo ejemplo donde se toma la intersección de las avenidas Petit Thouars y 28 de Julio, en la Figura 8 se muestran las variaciones de los retrasos (segundos), para periodos de 15 minutos evaluados en el modelado, comparando cada uno de los escenarios con la situación actual.

De manera similar, en la Tabla 6, se muestran los resultados de las medidas de eficacia típicas para el análisis de congestión vehicular (MOE, por sus siglas en inglés), tanto para la situación actual como para los dos escenarios propuestos.

En la Tabla 7, se muestra la diferencia entre los resultados de los indicadores MOE obtenidos en el modelo. Se observan beneficios en ambos escenarios, con un aumento de la velocidad del escenario 1

Tabla 4. Cruces de la red vial analizados.

Cruce: Av. Petit Thouars con	Tipo de control
Av. 28 de Julio	Semáforo
Jr. Hernán Velarde	Señal de PARE
Jr. Manuel Corpancho	Semáforo
Jr. Saco Oliveros	Semáforo
Jr. Madre de Dios	Señal de PARE
Jr. Emilio Fernández	Semáforo
Av. Alejandro Tirado	Semáforo

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Ubicación de sensores cruce Av. Petit Thouars y Av. 28 de Julio, para ambos escenarios.

Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth y modelo de simulación Aimsun Next.

Tabla 5. Resultados de calibración del estadístico GEH del modelo en Aimsun Next.

APROXIMACIÓN	Situación actual			Escenario 1				Escenario 2				
	Flujo de entrada (veh/hr)		GEH	Flujo de entrada (veh/hr)		GEH	Flujo de entrada (veh/hr)		GEH	Flujo de entrada (veh/hr)		GEH
	Simulado	Real		Simulado	Real		Simulado	Real		Simulado	Real	
Av. 28 de Julio (O)	1223	1135	2.55	1200	1136	1.87	1152	1136	1.87	1136	0.47	
Av. 28 de Julio (E)	1457	1357	2.60	1444	1358	2.30	1328	1358	2.30	1358	0.82	
Jr. Hernán Valverde (O)	16	16	0.00	16	16	0.00	12	16	0.00	16	1.07	
Jr. Hernán Valverde (E)	52.1	53.1	0.14	52	53	0.14	52	53	0.14	53	0.14	
Jr. Manuel Corpancho	522	538	0.74	564	537	1.15	504	537	1.15	537	1.45	
Jr. Saco Oliveros (O)	425	374	2.54	420	373	2.36	396	373	2.36	373	1.17	
Jr. Saco Oliveros (E)	261	314	3.14	268	313	2.64	276	313	2.64	313	2.16	
Jr. Madre de Dios (O)	285	220	4.09	284	219	4.10	256	219	4.10	219	2.40	
Jr. Madre de Dios (E)	190	184	0.45	188	182	0.44	196	182	0.44	182	1.02	
Jr. Emilio Fernández (O)	209	230	1.56	200	231	2.11	248	231	2.11	231	1.10	
Jr. Emilio Fernández (E)	205	220	1.04	204	219	1.03	260	219	1.03	219	2.65	
Av. Alejandro Tirado (O)	417	385	1.58	412	384	1.40	408	384	1.40	384	1.21	
Av. Alejandro Tirado (E)	445	396	2.22	428	398	1.48	380	398	1.48	398	0.91	
Av. Petit Thouars	1195	1207	0.33	1216	1208	0.23	1252	1208	0.23	1208	1.25	
GEH Promedio			1.64			1.52			1.52		1.27	

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo de simulación Aimsun Next.

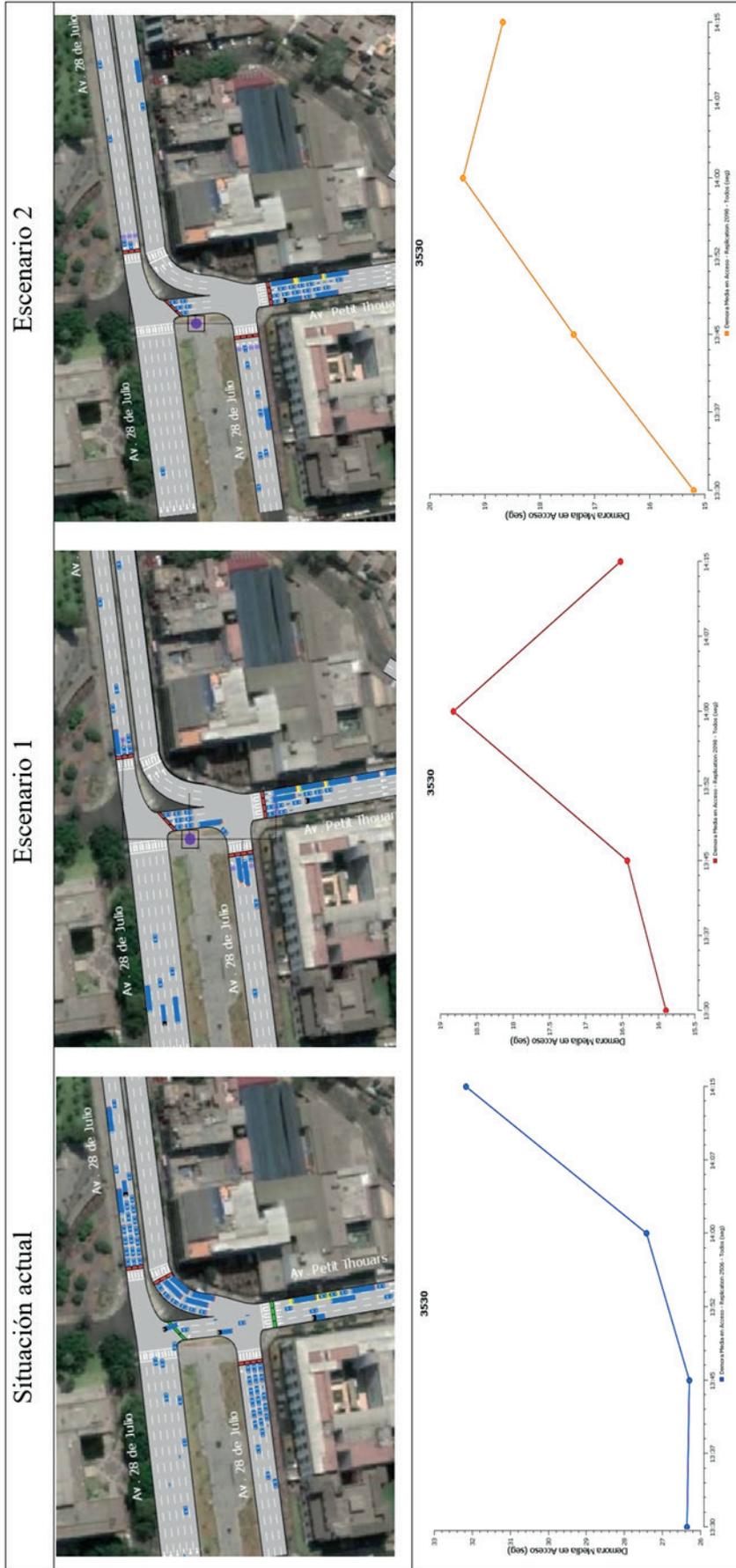


Figura 8. Comparación de la demora media vehicular (segundos) en el cruce de las avenidas Petit Thouars y 28 de Julio.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo de simulación Aimsun Next.

Tabla 6. Resultados operacionales de la red vial modelada por escenarios en las medidas de eficacia (MOE).

MOE	Situación actual		Escenario 1		Escenario 2	
	Valor	σ^*	Valor	σ^*	Valor	σ^*
Largo de cola promedio (veh)	74.00	SC**	43.00	SC**	52.00	SC**
Detenciones (veh/km)	0.10	SC**	0.10	SC**	0.10	SC**
Demoras (s/km)	99.00	95.00	64.00	60.00	66.00	51.00
Tiempo de viaje (s/km)	165.00	95.00	130.00	58.00	133.00	52.00
Velocidad (km/h)	29.00	16.00	32.00	12.00	31.00	12.00

* Desviación estándar

** Sin cálculo

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo de simulación Aimsun Next.

Tabla 7. Diferencia del MOE entre escenarios modelados.

MOE	Situación actual vs. Escenario 1	Situación actual vs. Escenario 2
Largo de cola promedio (veh)	-31.00	-22.00
Detenciones (veh/km)	0.00	0.00
Demoras (s/km)	-33.00	-31.00
Tiempo de viaje (s/km)	-35.00	-32.00
Velocidad (km/h)	3.00	2.00

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo de simulación Aimsun Next.

versus el escenario 2, debido a la progresión del pelotón del flujo vehicular en la vía principal de la Av. Petit Thouars.

DISCUSIÓN

El modelo arroja mejores resultados globales en los indicadores MOE del escenario 1, en donde se observa: disminución de colas medias (aproximadamente 31 vehículos en la red), número de paradas totales del vehículo (cero), disminución de demoras en la red vial (aprox. 34 s/km/veh en la red), disminución de tiempos de viaje (aprox. 35 s/km/veh en la red), aumento de más de 2 km/h por cada vehículo que circula en la red. Sin embargo, se pierde la coordinación semafórica implementada sobre la vía principal de la Av. Petit Thouars que solo favorece a los motoristas que circulan sobre esta vía. Esto genera actualmente más demoras (segundos) y colas (vehículos) en las vías secundarias, especialmente en horas de máxima demanda.

Con los resultados expuestos anteriormente, se sugiere desarrollar una propuesta de coordinación semafórica diferente a la actual, que abarque un área amplia en red de cruces, grilla o malla y no en eje, como lo es actualmente la Av. Petit Thouars, que equilibre los beneficios a los usuarios de las calles secundarias.

Los resultados numéricos de la modelación corresponden a los encontrados en una hora de simulación, en la hora más congestionada del día. En ese sentido, los beneficios y el desempeño sobre toda la red de la ciudad podrían ser fácilmente identificados utilizando la metodología para realizar una evaluación económica sobre la inversión de la implementación de un sistema como el propuesto, cuyos beneficios para la sociedad podrían ser muy elevados, incluso superiores a los observados en ciudades norteamericanas, que superan los US\$ 40:1 de inversión (FHWA, 2005).

CONCLUSIONES

El diseño de los tiempos y el reparto de fases de los semáforos en una intersección son parámetros clave en la implementación de proyectos de control semafórico, que deben ser realizados por profesionales altamente calificados en sistemas de control semafórico de tránsito urbano. Este tema ha sido ampliamente descuidado en los Términos de Referencia (TdR) de proyectos de semaforización urbana en las municipalidades del país, principalmente por la falta de capacitación de los ingenieros encargados de promover estos proyectos desde el Estado. Dicho de otra manera, los proyectos de semaforización urbana no consisten simplemente en la adquisición de equipos y en la ejecución de obras

civiles en una intersección y no deben ser desarrollados como tales.

Las estrategias de control actuado o adaptativo deben contener un modelado de línea de base calibrado a la situación actual, que permita analizar con precisión y un alto nivel de detalle la disposición del flujo de tráfico que discurre a través de un eje vial y su relación con las condiciones del sistema semafórico: tiempo de ciclo, repartos de verde (*splits*) y los desfases de coordinación con las intersecciones cercanas (*offsets*). Los cambios de tiempo derivados del control adaptativo se implementan en función de la variabilidad del tráfico dinámico en el área de estudio.

Pretender predecir el comportamiento de la movilidad urbana es siempre complicado, especialmente cuando se propone implementar sistemas y servicios intensivos en tecnología, como las telecomunicaciones aplicadas a sistemas de control operacional del tráfico urbano. Sin embargo, una serie de nuevas tecnologías están siendo probadas continuamente en este campo por los Departamentos de Transporte de países que cuentan desde hace años con sistemas de tecnología de punta en semaforización, como comunicaciones inalámbricas de banda ancha y sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID), tanto para usuarios con movilidad normal como para personas con movilidad reducida, estos últimos son los más vulnerables al intentar atravesar intersecciones con semáforo.

REFERENCIAS

- [1] Beeston, L., Blewitt, R., Bulmer, S., y Wilson, J. (Eds.). (2021). *Traffic Modelling Guidelines. Version 4.0*. Transport for London.
- [2] Boston Transportation Department, y Howard/Stein-Hudson Associates, Inc. (2010). *The Benefits of Retiming/Rephasing Traffic Signals in the Back Bay*.
- [3] Day, C. M., Brennan, T. M., Jr., Premachandra, H., Hainen, A. M., Remias, S. M., Sturdevant, J. R., Richards, G., Wasson, J. S., y Bullock, D. M. (2010). *Quantifying Benefits of Traffic Signal Retiming*. (Report No.: FHWA/IN/JTRP-2010/22). Indiana Department of Transportation.
- [4] Day, C. M., Bullock, D. M., Li, H., Remias, S. M., Hainen, A. M., Freije, R. S., Stevens, A. L., Sturdevant, J. R., y Brennan, T. M. (2014). *Performance Measures for Traffic Signal Systems: An Outcome-Oriented Approach*. West Lafayette, IN, EE. UU.: Purdue University. <https://doi.org/10.5703/1288284315333>
- [5] Federal Highway Administration. (2005). *Signal timing on a shoestring* (Publication number: FHWA-HOP-07-006).
- [6] Federal Highway Administration. (2008). *Traffic Signal Timing Manual* (Publication number: FHWA-HOP-08-024).
- [7] Federal Highway Administration. (2020). *A Methodology and Case Study: Evaluating the Benefits and Costs of Implementing Automated Traffic Signal Performance* (Publication number: FHWA-HOP-20-003).
- [8] National Association of City Transportation Officials. (2013). *Urban Street Design Guide*. NY, EE. UU.: Island Press.
- [9] National Operations Center of Excellence. (2019). *Traffic Signal Benchmarking and State of the Practice Report* (December 2019).
- [10] National Cooperative Highway Research Program. (2010). *Traffic Signal Retiming Practices in the United States. A Synthesis of Highway Practice*. (NCHRP Synthesis 409). Transportation Research Board of the National Academies.
- [11] Protránsito. (s.f.). *Proyecto Especial para la Gestión de Tránsito en Lima Metropolitana*. <http://protransito.munlima.gob.pe/index.php/es-es/protransito/objetivos>
- [12] Skabardonis, A. (1996). Determination of Timings in Signal Systems with Traffic-Actuated Controllers. *Transportation Research Record*, 1554(1), 18-26. <https://doi.org/10.1177/0361198196155400103>
- [13] Transportation Research Board. (2015). *Signal Timing Manual. Second Edition*. (NCHRP Report 812). https://transops.s3.amazonaws.com/uploaded_files/Signal%20Timing%20Manual%20812.pdf
- [14] Transportation Research Board. (2022). *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility*. Washington D. C., EE. UU.: National Academies Press.
- [15] Virginia Center for Transportation Innovation and Research. (2015). *Evaluation of the Virginia Department of Transportation Adaptive Signal Control Technology Pilot Project* (Report No. VCTIR 15-R24).