

# THE ART OF THE URBAN INTERSECTION SIGNALLED

Tarquino Torres, Fernando Mauricio. PhD

1: CIP Lima, Perú

## Resumen

La intersección con semáforo, es el área geográfica más compleja del análisis de ingeniería de tránsito. Es en éste sector de la ciudad, donde se detienen todos los flujos de tráfico (motorizados o no) que desean atravesar dicha intersección al mismo tiempo, cosa que es imposible sin ocasionar accidentes y otros impactos colaterales. Los primeros semáforos de tres luces aparecieron en 1920 en las calles de Detroit. Estamos a casi 100 años de este acontecimiento y existe un gran desconocimiento conceptual en la materia en toda la región. Las autoridades municipales se han concentrado solamente en la instalación del equipamiento semafórico y no en lo importante que es la operación. En ese sentido, se desarrolla el presente esfuerzo académico, que pretende complementar los criterios técnicos no contenidos en los Manuales de Dispositivos de Control de Tránsito para Calles y Carreteras del Perú y América Latina. Asimismo, elevar el contexto operacional de la simple implementación de intersecciones con semáforo de tiempo fijo, hasta el conocimiento, diseño, implementación y mantenimiento de Sistemas de Control de Tráfico Actuado o Accionado por la Movilidad (“vehículo con mayor cantidad de pasajeros cruza primero”)

Palabras clave: Semáforo, ingeniería de tráfico, tiempo fijo, actuado o accionado, optimización, prioridad, sistema de control de tráfico.

## Astract

The intersection signalized is the most complex geographical area of traffic engineering analysis. It is in this sector of the city, where all traffic flows (motorized or not) that want to cross the intersection at the same time, which is impossible without causing accidents and other collateral impacts. The first three-light traffic signal appeared in 1920 on the streets of Detroit. We are almost 100 years after this event and there is a great conceptual lack of knowledge on the subject throughout the region. The municipal authorities have focused only on the installation of traffic signal equipment and not on how important the operation is. In this sense, the present academic effort is developed, which aims to complement the technical criteria not contained in the Manuals of Traffic Control Devices for Streets and Roads of Peru and Latin America. Likewise, to raise the operational context of the simple implementation of intersections with a pretimed signal, to the knowledge, design, implementation and maintenance of Traffic Control System Actuated or Mobilized (“vehicle with the largest number of passengers crosses first”).

*Keywords: Signal, traffic engineering, pretimed, actuated, optimization, priority, traffic control system.*

## 1. Introducción

El mantenimiento del tiempo de la señal del semáforo seguro y eficiente es una parte importante del sistema de transporte urbano; la responsabilidad de la agencia de transporte del gobierno local (municipios en general para América Latina) es importante para los automovilistas, especialmente ya que el precio del combustible es una variable incierta que cuando aumenta, atenta contra la economía del usuario, y cuando disminuye, alienta a la adquisición de más vehículos automotores; con lo que, el valor de tiempo de viaje aumenta, además de la contaminación del aire por exceso de emisiones al ambiente, que también tiene un costo monetario. Las mejoras en la sincronización del tiempo de la señal del semáforo han demostrado de forma consistente hasta \$ 40 de beneficio de usuarios de la vía por cada \$ 1 invertido por la agencia de transporte. Las mejoras en el tiempo de la señal del semáforo en las grandes áreas metropolitanas son clave para las actividades de mitigación de la congestión y el logro de los niveles de emisión aceptables. Se ha demostrado que los tiempos de semáforos mal programados, aumentan la frecuencia y gravedad de los accidentes de tránsito por impaciencia de los motoristas y el descuido o desorientación de los peatones al cruzar la intersección.

El diseño de la intersección tiene una influencia directa sobre su seguridad y el funcionamiento operacional desde la perspectiva del usuario. Los elementos de diseño que son particularmente relevantes incluyen: el número de carriles proporcionan en cada aproximación y para cada movimiento, si los carriles son o no compartidos para vueltas a la izquierda, la longitud de las bahías de giro, los radios de giro (especialmente importante para los peatones), la presencia de carriles adicionales para movimientos de frente en la zona de la intersección (p.j. carriles auxiliares en intersecciones de gran tamaño, muy usados en zonas periféricas de la ciudad), el tamaño y la ubicación de los detectores, y presencia o ausencia de fase exclusiva del semáforo para giro a la izquierda. El otro aspecto del diseño de intersecciones es la percepción y la reacción de los usuarios. Al aproximarse a la intersección, el usuario necesita tomar varias decisiones, lo que hace importante simplificar el proceso de toma de decisiones.

## 2. Revisión de la literatura

La propuesta es una antesala de un libro de “compilación e interpretación de la técnica” que estamos desarrollando sobre el tema, sobre la base de los criterios conceptuales y experiencia desarrollada por la Federal Highway Administration – FHWA de los Estados Unidos; y que están basados en los criterios de: diseño operacional, seguridad, optimización, sincronización, prioridad, control y comunicaciones. La literatura se ha tomado de los trabajos de siete documentos, muy amplios y complejos, que citamos en las referencias.

## 3. Metodología y procedimientos

Desarrollo conceptual de cada uno de los pasos, en secuencia lógica y ordenada para una adecuada aplicación del arte de la semaforización urbana: POLITICAS DE ACTUACIÓN – PLANES DE TIEMPOS Y MANTENIMIENTO – CRITERIOS DE DISEÑO OPERACIONAL – SEGURIDAD – OPTIMIZACION – COORDINACION – PRIORIDAD – CONTROL – COMUNICACION – PROTOCOLO.

### 3.1. Políticas de actuación

Cuestiones de política relacionadas con la temporización de la señal del semáforo incluyen la determinación de:

- ¿Si todos los tipos de usuarios (de transporte público, de carga, de emergencia, peatones, vehículos, bicicletas, etc.), serán tratados con equidad o existirá alguna prioridad en la intersección semaforizada?;
- ¿Con qué frecuencia serán revisados y actualizados los planes de tiempos del semáforo?;
- ¿Cómo deben ser tratadas las aproximaciones con diferente jerarquía vial?;
- ¿Si habrá tratamiento preferencial para determinados movimientos más allá de la definición de la fase coordinada (será el plan de fases preciso para limpiar todas las colas durante cada ciclo a través de movimientos de volteo a la izquierda y la calle lateral)?;
- ¿Cómo serán tratadas las intersecciones con capacidad deficiente?; y
- ¿Qué medidas se utilizarán para determinar si el plan de sincronización es efectivo (detenciones vehiculares, demoras en la red, la velocidad promedio de recorrido arterial, retraso estimado

persona, consumo de combustible estimado, velocidad del transporte público, etc.) y cómo se van a obtener estos datos?

La **Tabla 1** muestra algunas estrategias generalizadas de temporización de la semaforización y ejemplos de políticas de sincronización aplicables que se podrían implementar evaluando caso por caso.

**Tabla 1. Estrategias de Temporización de la Señal del Semáforo, Ajustes y Ejemplo de Políticas**

Políticas de Transporte	Escenario	Estrategia de tiempos del semáforo
<b>Enfoque: Peatón/Ciclista</b>	Área central, colegios, universidades, desarrollos multipropósitos de alta densidad, parques o cualquier lugar con alto tráfico de peatones/ciclistas	Tiempos de ciclo cortos para reducir tiempos de espera Extender el tiempo para el cruce de peatones Colocar detectores de presencia de peatones/ciclistas Utilizar fase exclusiva para peatones Intervalo peatonal líder
<b>Enfoque: Transporte público</b>	Corredores de transporte público, rutas de transporte público, estaciones, paraderos y cruceos peatonales	Preferencia de semáforo para modos de transporte público masivo (p.j. trenes) Prioridad semafórica para modos y rutas de transporte público Coordinación semafórica basada en velocidad comercial del transporte público Extender el tiempo para el cruce de peatones Utilizar fase exclusiva para peatones Intervalo peatonal líder
<b>Enfoque: Vehículos de emergencia</b>	Caminos clave y rutas a y desde hospitales, estaciones de bomberos y estaciones de policías	Preferencia de semáforo para vehículos de mayor importancia
<b>Enfoque: Vehículos privados/vehículos de carga</b>	Ubicaciones con alto tráfico de vehículos de carga, corredores de carga, puertos, zonas intermodales	Evitar fallas en el ciclo semafórico (p.j. vehículos en cola que no logran desalojar la intersección en un tiempo de verde) Mantener la progresión o coordinación del sistema lo mejor posible, para evitar paradas y demoras innecesarias Asegurar el tiempo apropiado para cruce de peatones, que permita la seguridad multimodal de la red vial
<b>Enfoque: Zonas de bajo tráfico o periodos de tiempo</b>	Locaciones con bajo tráfico vehicular o durante periodos fuera de punta	Asegurar el tiempo eficiente del semáforo para evitar paradas y demoras innecesarias Considerar operaciones de “destellos o flashing” (amarillo-rojo o rojo-rojo) Permitir saltar movimientos innecesarios cuando no hay demanda Utilizar coordinaciones con otras intersecciones relacionadas de mitad, tercera o cuarta parte del ciclo Permitir semaforización peatonal actuada en condiciones de bajo volumen

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Publication Number: FHWA-HOP-08-024. Table 2-1.

### 3.2. Planes de tiempos y mantenimiento

El proceso de planes de tiempos tiene 5 pasos distintos que se pueden adaptar dependiendo de si el esfuerzo es un pequeño ajuste de la temporización o si se trata de un esfuerzo de reajuste de toda el área o corredor. Los pasos incluyen:

1. Alcance del Proyecto;
  - Revisar políticas, determinar objetivos e identificar problemas;
  - Confirmar estándares y procedimientos;
  - Identificar el área de estudio, el corredor o las intersecciones;
  - Divide el área en secciones;
  - Seleccionar medidas de rendimiento;
  - Identificar el número de planes de tiempo;
2. Recolección de Datos;
3. Desarrollo del Modelo;
  - Ingreso de datos;
  - Análisis;
  - Borrador de planes de tiempos;
4. Implementación en Campo y Ajustes;
5. Evaluación de los Tiempos;
  - Medición del rendimiento;
  - Políticas de confirmación; y
  - Reportes.

El tiempo del semáforo –en ciudades Latinoamericanas- debe revisarse cada uno a dos años y con mayor frecuencia si hay cambios significativos en los volúmenes de tráfico o en las condiciones de las vías. Esta frecuencia de revisión, es particularmente importante para las jurisdicciones o áreas localizadas dentro de una jurisdicción, en la que los cambios en el uso del suelo conducen a cambios rápidos en los patrones de tráfico. Típico de la falta de planificación urbana.

### 3.3. Criterios de diseño operacional

Existen varias características que afectan en la naturaleza dinámica de la implementación del tiempo del semáforo, entre las que se destacan:

- Localización; los ambientes urbanos se caracterizan por velocidades bajas y altos niveles de congestión. Además, se deben considerar, la presencia de altos volúmenes peatonales, ciclistas y el transporte público, que a menudo, requiere consideraciones de prioridad de paso.
- Características de la red de transporte; la facilidad vial dentro de un sistema de transporte mayor, puede influir en las expectativas del usuario; lo que a su vez, puede afectar en la forma en que se debe programar su ruta.
- Geometría de la intersección; las características geométricas de una intersección determinan su capacidad para servir a la demanda de tráfico de manera segura y eficiente.
- Características de los usuarios; Las características de los usuarios influyen claramente en la eficiencia del tiempo del semáforo y deberían ser considerados al inicio del proceso de análisis y planeación.

### 3.4. Seguridad

Las Agencias de Gobierno se enfrentan al reto de ofrecer un servicio al cliente excepcional con bajos recursos. Como estudiamos ampliamente en el capítulo anterior, las medidas de desempeño permiten a los especialistas evaluar la eficiencia de una intersección con semáforo o de un corredor. Estas medidas pueden ayudar a las Agencias a enfocar los recursos más eficientemente. Además de los criterios de desempeño estudiados en el análisis operacional (tiempos de viaje, demoras, colas y arribos o llegadas a la red), los criterios de seguridad que se complementan la correcta evaluación del desempeño son: frecuencia de accidentes, tipos de accidentes y severidad. Los calendarios para la gestión y mantenimiento de las intersecciones con semáforo se pueden organizar de acuerdo a los tipos de reparación. Esta es una práctica muy poco común en ciudades latinoamericanas. Los especialistas deberían revisar esta información para evaluar las áreas problemáticas a corregir. Asimismo, la información adicional que debería incluir la opinión de los especialistas son: el Plan Anual de Tiempos de Semáforo y el Programa Anual de Mantenimiento Preventivo. La aplicación de estos instrumentos de gestión, debería ser una práctica común en ciudades latinoamericanas. Los especialistas se deberían plantear, sin ser limitantes, las siguientes preguntas:

- ¿Qué intersecciones se requieren visitar mensualmente para mejorar?
- ¿Qué tipo de reparaciones son repetitivas en la mayoría de las intersecciones?
- ¿Son necesarios cambios en las fases u otro tipo de medida para reducir los accidentes?

### 3.5. Optimización

Se han desarrollado diversos programas de simulación y técnicas de optimización que ayudan al ingeniero de tránsito en el proceso de optimización. A inicios de la década del 2000, Kamarajugadda sostuvo que ninguno de los programas de optimización considera la variabilidad estocástica cotidiana en la demora, durante el proceso de optimización. En ese sentido, desarrolló una metodología para estimar la variabilidad en la demora en las intersecciones semaforizadas e incorporarla en el proceso de optimización. Primero, la varianza de la demora se calcula para una intersección aislada, utilizando el método de la función de expectativa para condiciones no saturadas y el método de integración para condiciones sobresaturadas. El resultado del cálculo, se expande a las intersecciones arteriales utilizando el método de integración y el modelo de dispersión del pelotón, analíticamente aproximado. Con estas aproximaciones, se utiliza la varianza de la demora para la optimización del tiempo del ciclo, la distribución de los verdes efectivos y los desfases, para las fases del sistema de semaforización.

### 3.6. Coordinación

La coordinación es una herramienta que brinda la capacidad de sincronizar múltiples intersecciones para mejorar la operación de uno o más movimientos direccionales en un sistema. Los ejemplos incluyen calles arteriales, redes del centro de la ciudad e intersecciones muy espaciadas, como intercambios de diamantes. Aquí, se identifican conceptos de coordinación, utilizando ejemplos de investigación y práctica. Contiene cuatro secciones. La primera proporciona una visión general de la coordinación que incluye un resumen de los objetivos, los conceptos fundamentales y las expectativas de coordinación del tiempo. La segunda describe los conceptos de coordinación, su efecto en la asignación de tiempo, problemas de implementación y diagramas de tiempo-espacio. La tercera proporciona pautas para desarrollar planes de coordinación de tiempo, y la cuarta describe las complejidades asociadas con las operaciones coordinadas. La intención de este capítulo es proporcionar los antecedentes necesarios para el desarrollo de estrategias de tiempo.

### 3.7. Prioridad

El tratamiento preferencial es una aplicación que se puede usar en intersecciones semaforizadas, para ajustar las operaciones a favor de un usuario en particular. Este capítulo proporciona una descripción general de los tratamientos de tiempos, que se pueden aplicar para priorizar el movimiento de: el ferrocarril (tren ligero o cualquier tipo de transporte ferroviario a nivel), los vehículos de emergencia y los vehículos de transporte público. Si la agencia de transporte lo necesita, podrían incluirse también tratamientos preferenciales para camiones.

### 3.8. Control

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.

### 3.9. Comunicación

El sistema de comunicaciones, generalmente, es el elemento más crítico y costoso de un sistema de control de tráfico. 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. En Capítulo ayudará al usuario a comprender los principios de comunicación y servirá como guía para los procesos de toma de decisiones para seleccionar el sistema de comunicación. Este Capítulo contiene cuatro grupos principales de materias:

- Fundamentos de la comunicación.

- Requisitos de comunicaciones de control de tráfico.
- Tecnología de comunicaciones de sistemas de control de tráfico.
- Consideraciones de selección y metodología de selección.

### 3.10. 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.

## 4. Resultados y discusión

El mantenimiento del tiempo de la señal del semáforo seguro y eficiente es una parte importante del sistema de transporte urbano; la responsabilidad de la agencia de transporte del gobierno local (municipios en general para América Latina) es importante para los automovilistas, especialmente ya que el precio del combustible es una variable incierta que cuando aumenta, atenta contra la economía del usuario, y cuando disminuye, alienta a la adquisición de más vehículos automotores; con lo que, el valor de tiempo de viaje aumenta, además de la contaminación del aire por exceso de emisiones al ambiente, que también tiene un costo monetario. Las mejoras en la sincronización del tiempo de la señal del semáforo han demostrado de forma consistente hasta \$ 40 de beneficio de usuarios de la vía por cada \$ 1 invertido por la agencia de transporte. Las mejoras en el tiempo de la señal del semáforo en las grandes áreas metropolitanas son clave para las actividades de mitigación de la congestión y el logro de los niveles de emisión aceptables. Se ha demostrado que los tiempos de semáforos mal programados, aumentan la frecuencia y gravedad de los accidentes de tránsito por impaciencia de los motoristas y el descuido o desorientación de los peatones al cruzar la intersección.

## 5. Conclusiones e investigación futura

El desarrollo de este esfuerzo académico, ofrece una introducción al proceso del Arte de la Semaforización Urbana. El proceso implica una serie de pasos que producen un plan de tiempos de ciclo y distribución de fases eficaz, para una intersección semaforizada o grupo de ellas; para terminar en una implementación adecuada de una Central de Control de Tránsito, como centro de gestión permanente de la ciudad. El futuro de la investigación en transporte urbano aplicado a sistemas de semáforo está evolucionando constantemente; en la implementación de sistemas de anticipación y respuesta a la congestión, cada vez avanzados en la gestión de los datos y la utilización de inteligencia artificial.

## Referencias

1. TRB (2012). *NCHRP Report 812. Signal Timing Manual, Second Edition*. AASHTO-FHWA. Washington, D.C. 2015. National Academy of Sciences. ISBN 978-0-309-30888-5
2. FHWA (2008). *Traffic Signal Timing Manual*. U.S. Department of Transportation. Report No. FHWA-HOP-08-024.
3. FHWA (2013). *Signalized Intersections Informational Guide. Second Edition*. U.S. Department of Transportation. Safety Program. Publication No. FHWA-SA-13-027.
4. Anil, K. Byungkyu, P (2003). *Stochastic Traffic Signal Timing Optimization*. U.S. DOT University Transportation Center. University of Virginia. Research Report No. UVACTS-15-0-44.
5. FHWA (2005). *Traffic Control Systems Handbook*. Report No. FHWA-HOP-06-006.
6. FHWA (1993). *Communications Handbook for Traffic Control Systems*. Report No. FHWA-SA-93-052.
7. AASHTO-ITE-NEMA (2009). *The NTCIP Guide. National Transportation Communications for ITS Protocol. NTCIP 9001 version v04*. U.S. DOT / Research and Innovative Technology Administration