

# **CAPÍTULO 4**

## **SEMÁFOROS**



4	SEMÁFOROS .....	4—5
4.1	GENERALIDADES .....	4—5
4.1.1	Objetivos.....	4—5
4.1.2	Contexto del problema .....	4—5
4.2	JUSTIFICACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE UN SEMÁFORO.....	4—7
4.2.1	Ventajas y desventajas de la semaforización de una intersección .....	4—7
4.2.2	Justificación en función de flujos vehiculares.....	4—11
4.2.3	Justificación en función de flujos peatonales .....	4—12
4.2.4	Justificación en función del nivel de accidentabilidad.....	4—13
4.2.5	Toma de datos y uso de datos estimados .....	4—13
4.2.6	Verificación del cumplimiento de los criterios de justificación.....	4—15
4.2.7	Análisis de casos especiales.....	4—15
4.2.8	Reporte del análisis de justificación de semáforo .....	4—17
4.3	CAPACIDAD DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS.....	4—17
4.3.1	Modelo binario de descarga.....	4—18
4.3.2	Casos en que el flujo de saturación depende de la programación del semáforo.....	4—20
4.3.3	Efecto de la interferencia peatonal.....	4—26
4.4	ASPECTOS GENERALES DE LA PROGRAMACIÓN DE SEMÁFOROS .....	4—26
4.4.1	Variables de programación .....	4—26
4.4.2	Tipos de control.....	4—26
4.4.3	Contexto espacio-tiempo.....	4—27
4.4.4	Etapas de la programación .....	4—28
4.4.5	Programas computacionales recomendados .....	4—28
4.5	DISEÑO BÁSICO DE UN PLAN.....	4—29
4.5.1	Introducción .....	4—29
4.5.2	Movimientos.....	4—29
4.5.3	Fases .....	4—30
4.5.4	Entreverdes.....	4—35
4.5.5	Restricciones de la programación.....	4—37
4.6	INDICADORES DE RENDIMIENTO.....	4—38
4.6.1	Generalidades .....	4—38
4.6.2	Longitud de cola .....	4—38
4.6.3	Demoras.....	4—40
4.6.4	Detenciones .....	4—41
4.6.5	Indicador a nivel de movimiento .....	4—41
4.6.6	Indicador a nivel de intersección y de red.....	4—42
4.6.7	Capacidad de reserva .....	4—42
4.7	PLANES PREFIJADOS PARA SEMÁFOROS AISLADOS.....	4—42
4.7.1	Modelación y periodización.....	4—43
4.7.2	Simulación de la situación actual.....	4—43
4.7.3	Optimización de la programación .....	4—44
4.7.4	Reporte del proceso de optimización de programación de un semáforo aislado.....	4—50
4.7.5	Ejemplo de aplicación .....	4—50

4.8	PLANES PREFIJADOS PARA REDES DE SEMÁFOROS .....	4—55
4.8.1	Introducción .....	4—55
4.8.2	Modelación y conformación de redes de semáforos .....	4—55
4.8.3	Simulación de la situación actual.....	4—57
4.8.4	Optimización de la programación .....	4—57
4.8.5	Reporte del proceso de optimización de las programaciones de redes de semáforos.....	4—59
4.9	CONTROL DINÁMICO DE TRÁNSITO .....	4—60
4.9.1	Introducción .....	4—60
4.9.2	El sistema SCOOT.....	4—61
4.9.3	El sistema SCATS .....	4—62
4.9.4	Programación con sistemas de control dinámico.....	4—63
4.10	DISEÑO SEGURO PARA TODOS LOS USUARIOS .....	4—63
4.10.1	Diseño operativo de la intersección .....	4—64
4.10.2	Facilidades explícitas para peatones y ciclistas .....	4—64
4.10.3	Otras consideraciones.....	4—66
4.10.4	Ubicación de postes de semáforos .....	4—66
4.10.5	Configuración de postes y cabezales.....	4—76
4.11	IMPLEMENTACIÓN Y SINTONÍA FINA .....	4—77
4.11.1	Instalación de programaciones.....	4—78
4.11.2	Recopilación y análisis de información existente.....	4—78
4.11.3	Inspección general de terreno .....	4—79
4.11.4	Diagnóstico operacional y formulación de acciones.....	4—79
4.11.5	Ajustes a las programaciones en redes de semáforos .....	4—79
4.11.6	Ajustes de programaciones en intersecciones aisladas .....	4—81
4.11.7	Validación de ajustes de programaciones .....	4—81
4.11.8	Verificación de extensión y asimilación de períodos .....	4—81
4.11.9	Implementación de programaciones a nivel de controlador .....	4—82
4.11.10	Reporte de la implementación y sintonía fina de las programaciones.....	4—82
4.12	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS SEMAFÓRICOS .....	4—82

## 4 SEMÁFOROS

### 4.1 Generalidades

#### 4.1.1 Objetivos

Este capítulo del Manual de Señalización de Tránsito trata sobre la regulación de tránsito en vías públicas mediante semáforos. El propósito fundamental de este documento técnico es lograr, a través del fiel cumplimiento de las normas que contiene, una completa uniformidad de la regulación de tránsito con semáforos en todo el territorio nacional. Para ello, además de entregar las especificaciones de los elementos semaforicos, se consignan los criterios técnicos que permiten conocer cuándo, dónde y cómo estos deben ser instalados y cómo deben funcionar.

El uso de semáforos en recintos privados de uso público puede considerarse lo indicado en este manual como una recomendación cuyo cumplimiento es deseable para mantener la consistencia y uniformidad con la regulación de las vías públicas.

Este documento contiene una serie de aspectos de carácter obligatorio para el proceso de análisis de justificación de instalación, definición de características funcionales y requisitos técnicos de los dispositivos semaforicos. Entrega también pautas para la disposición en terreno de esos dispositivos y los requisitos metodológicos para determinar la programación de semáforos aislados y aquellos que operan coordinados en una red. Por último, entrega requerimientos mínimos para las tareas de mantenimiento de los dispositivos y las programaciones.

En términos generales la semaforización de una intersección o cruce peatonal es la conclusión de un proceso de análisis de conflictos de tránsito y medidas alternativas a la semaforización, que permita concluir que la instalación de ese dispositivo es la solución más eficiente desde el punto de vista económico-social. Es fundamental la realización de un cuidadoso estudio de las causas de los conflictos y la aplicación de la experiencia del analista al momento de proponer opciones de solución y decidir si es conveniente la instalación.

A partir del análisis realizado debe generarse un informe de justificación de semáforo que debe ser presentado a la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) para su análisis y aprobación cuando corresponda. No se puede instalar un semáforo en una vía pública sin contar con el correspondiente estudio de justificación aprobado.

La instalación de un semáforo, previamente justificado, se debe realizar de acuerdo con un proyecto de semaforización aprobado por la UOCT. La aprobación tendrá una vigencia de 1 año y debe considerarse los requisitos y características indicadas en este manual y en Especificaciones Técnicas para la Instalación de Semáforos, Especificaciones Técnicas de Controladores de Tráfico, Especificaciones Técnicas de Módulos de Señales de Leds, Manual de Programación y Modelación de Semáforos y Manual de Mantenimiento de Semáforos y Actualización de Programaciones, todos ellos publicadas en [www.uoct.cl](http://www.uoct.cl). Si transcurrido ese plazo no se ha instalado el semáforo, se requerirá presentar nuevamente el proyecto para que sea visado por la UOCT. De la misma forma no se podrá instalar un semáforo provisorio, intervenir los elementos o las programaciones de un semáforo realizar tareas de mantenimiento, sin la autorización previa de la UOCT.

En cada uno de los casos mencionados previamente se deberá requerir la aprobación de la UOCT regional correspondiente al sitio analizado o bien de la UOCT de Santiago en caso de no existir dicha unidad regional o que se trate de una iniciativa localizada en la región Metropolitana.

#### 4.1.2 Contexto del problema

La existencia de usuarios que circulan en distintas direcciones en las intersecciones o cruces peatonales genera conflictos entre ellos que deben ser regulados para mantener niveles aceptables de servicio y seguridad de tránsito.

En las intersecciones y cruces peatonales no semaforizados es posible identificar corrientes prioritarias y secundarias, donde las primeras tienen derecho preferente de paso sobre las segundas. De esta manera los usuarios de la corriente secundaria deben esperar que se produzca un intervalo de tiempo, o brecha, de extensión suficiente en la corriente prioritaria para poder cruzarla. Este valor se denomina brecha crítica y su magnitud depende de las características del usuario y de la longitud que debe cruzar. Por ejemplo, en el caso de los peatones, a medida que aumenta la edad de la persona la brecha crítica se incrementa, lo mismo ocurre si la vía que debe cruzar es más ancha.

El intervalo entre vehículos en la corriente prioritaria está sujeto a fluctuaciones aleatorias y sistemáticas y, por lo mismo, el proceso de cruce también tiene esas características. Las fluctuaciones aleatorias son las más

relevantes cuando el flujo prioritario es bajo en comparación con la capacidad de la vía, mientras que las sistemáticas son las relevantes para flujos cercanos a la capacidad.

La extensión promedio de los intervalos o brechas en una corriente está dada por el inverso del flujo, por ejemplo, una pista con un flujo de 360 veh/h tiene una brecha promedio de 10 segundos entre vehículos.

La espera de una brecha adecuada en la corriente prioritaria genera demoras a los usuarios de la vía secundaria. Si esa demora es excesiva los usuarios tienden a cruzar aunque las brechas no sean adecuadas, aceptando brechas menores a las que tienen al inicio del proceso de espera. Esto puede generar accidentes de tránsito que tienen un alto costo social y que por lo tanto deben evitarse tanto como sea posible.

A partir de lo anterior se pueden identificar distintas opciones para mejorar el funcionamiento de un cruce no semaforizado. Alternativas en este sentido son, por ejemplo, disminuir la velocidad en la vía prioritaria, acortar la distancia de cruce mediante angostamientos de la calzada o habilitar una isla peatonal que separe el cruce de peatones en dos etapas, cada una enfrentando a un flujo vehicular prioritario con distinto sentido en lugar de hacerlo simultáneamente con ambos sentidos. También es posible ajustar la programación de semáforos cercanos para inducir brechas adecuadas para los usuarios del acceso secundario.

Si no hay alternativas eficaces para mejorar la operación de un cruce de prioridad entonces la instalación de un semáforo puede ser una opción adecuada. Además de las mejoras en la seguridad de tránsito que generan, los semáforos, con un adecuado diseño físico-operativo de la intersección, son útiles para realizar distintas acciones de gestión de tránsito. Entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

- reforzar la jerarquía vial de una calle, definida en el respectivo instrumento de planificación territorial;
- entregar prioridad al transporte público, mediante el uso de pistas y cabezales especiales;
- generar facilidades de cruce para peatones y ciclistas;
- maximizar o limitar el flujo vehicular que sale de la intersección;
- administrar las colas vehiculares de manera que se reduzcan los efectos de bloqueos que ellas generan; y
- mejorar la capacidad de rotondas congestionadas.

No obstante la utilidad que puede tener la instalación de un semáforo, su funcionamiento producirá demoras a todos los usuarios del cruce producto de la alternancia del derecho preferente de paso de cada movimiento. En períodos de baja congestión y con flujos equilibrados por acceso la demora media vehicular en un cruce semaforizado puede aproximarse por un valor mayor a 30% y menor a 40% del tiempo de rojo. Por ejemplo, asumiendo un tiempo de ciclo de 60 segundos y repartos iguales entre dos fases la demora media tendrá un valor entre 9 y 11 segundos aproximadamente. Demoras de esa magnitud corresponden a valores bajos que se pueden incrementar significativamente si aumenta el nivel de congestión o simplemente si una de las fases recibe una menor proporción de tiempo de verde.

Por lo tanto, desde el punto de vista económico-social, el análisis de justificación de la semaforización sólo tiene sentido cuando la demora de los usuarios en la situación sin semáforo es superior a la demora mínima que producirá el semáforo. La pregunta es entonces qué magnitud de la demora por sobre el valor mínimo indicado previamente justifica económicamente la semaforización, teniendo en cuenta la inversión y el costo de mantenimiento del semáforo.

Los análisis indican que solamente en casos muy excepcionales se justificaría la instalación al realizar el balance entre el costo social de la variación de las demoras y el costo social de la semaforización. No obstante, y ésta es una de las claves del análisis, antes de alcanzar un estado de operación que justifique la instalación con el criterio económico-social señalado, algunos usuarios experimentarán demoras excesivas que podrían fomentar la ocurrencia de accidentes cuyos costos sociales son significativos.

Se establece de esta manera la necesidad de definir un estándar mínimo de servicio asociado a demoras, a partir del cual es conveniente la semaforización para así evitar la ocurrencia de accidentes, pero siempre que otras opciones de menor costo hayan resultado ineficaces.

Es fundamental también considerar aquellos casos en que existan demoras razonables pero niveles de accidentabilidad elevados. Ante esas situaciones, y comprobada la ineficacia de otros mejoramientos, la semaforización también es una opción adecuada dado que los semáforos reducen los accidentes más graves y costosos.

Los criterios para estudiar la conveniencia de instalar un semáforo que se presentan en este capítulo del Manual de Señalización de Tránsito se basan, por lo tanto, en el análisis de demoras y accidentabilidad.

## 4.2 Justificación de la instalación de un semáforo

### 4.2.1 Ventajas y desventajas de la semaforización de una intersección

#### 4.2.1.1 Aspectos generales

La semaforización de una intersección o cruce peatonal es habitualmente vista como la única o más efectiva alternativa para enfrentar problemas de congestión o seguridad de tránsito y, por lo mismo, su uso ha sido indiscriminado, aplicándola a casos donde los conflictos podrían haberse resuelto con otro tipo de medidas de menor costo pero igualmente eficaces. Es importante entonces conocer las ventajas y desventajas que tienen las intersecciones de prioridad en comparación con las semaforizadas.

Las ventajas del uso de un semáforo en comparación con la regulación con señal de prioridad son las siguientes:

- aumento de la seguridad de tránsito producto de la disminución de accidentes entre vehículos con distinta dirección de circulación, que generalmente son los de mayor gravedad;
- disminución de conflictos entre usuarios de las vías prioritaria y secundaria al entregar derecho preferente de paso a todos ellos de forma alternada, incluyendo la entrega de facilidades especiales a peatones y ciclistas;
- disminución de demoras de los conductores y pasajeros de la vía secundaria a partir de ciertos niveles de flujo prioritario;
- disminución de demoras para peatones que enfrentan flujos vehiculares elevados;
- posibilidad de coordinar la operación del semáforo con otros cercanos para influir en la velocidad y progresión del tráfico vehicular; y
- menor uso de espacio vial en comparación con la regulación mediante rotonda.

Las desventajas de la semaforización en comparación con la regulación con señal de prioridad pueden resumirse en:

- incremento de colisiones de vehículos en la misma dirección de circulación;
- incremento de demoras y detenciones de los usuarios de la vía prioritaria, independiente de los niveles de flujo existentes en la vía secundaria o prioritaria;
- incremento, en la mayoría de los casos, de las demoras totales de conductores, pasajeros y peatones, este incremento es mayor en la medida en que la programación del semáforo no es la óptima y los niveles de demanda son bajos; y
- existencia de costos de mantenimiento periódico de los equipos semafóricos y sistemas adicionales y de actualización de programaciones, mientras la intersección permanezca semaforizada.

Lo anterior da pie a la necesidad de estudiar soluciones alternativas que siendo eficaces en resolver los conflictos tengan menos efectos negativos o sean de menor costo, como se describe a continuación.

#### 4.2.1.2 Soluciones alternativas a la semaforización

El objetivo de esta sección es entregar pautas y criterios para que durante el estudio de los conflictos de tránsito y sus posibles soluciones se analicen las opciones disponibles y se comparen sus efectos con los de la semaforización. Este análisis es obligatorio como etapa inicial del estudio de justificación del semáforo requerido por la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) para autorizar su instalación.

En general, los conflictos entre los usuarios de la vialidad se pueden regular mediante distintos dispositivos:

- regulación con señal de prioridad;
- regulación con semáforo; y
- regulación a través de eliminación de conflictos, por ejemplo, con pasos a distinto nivel.

Es admisible también la ausencia de regulación explícita, en cuyo caso aplican reglas generales de prioridad, como por ejemplo, la prioridad del vehículo que se aproxima por la derecha.

Junto con establecer alguna de las regulaciones mencionadas es necesario que se verifiquen una serie de condiciones para que la regulación sea efectiva. En ciertos casos, cuando se dispone la regulación con señal de prioridad, esas condiciones no se cumplen y por esa razón, entre otras, se observan situaciones conflictivas que motivan el estudio de una regulación con semáforo; por ejemplo, la instalación de un paso de cebra en una vía que tiene una velocidad de operación elevada. En la medida que se realicen mejoras que generen las condiciones operativas y de seguridad de tránsito adecuadas, la necesidad de semaforizar podría eliminarse o postergarse.

Cuando una intersección está regulada por una señal de prioridad o cuando se habilita un cruce peatonal es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- a) Adecuada visibilidad: los conductores deben advertir la existencia de la señal de prioridad o el cruce peatonal a una distancia igual o superior a la distancia de parada correspondiente a la velocidad de aproximación, estado del pavimento y otras características que determinen dicha distancia. Los peatones deben tener una visibilidad adecuada en todas las direcciones por las que se aproximen los vehículos. La visibilidad adecuada debe verificarse durante el día y la noche.
- b) Efectivo control de la velocidad de los vehículos: si los vehículos se desplazan a velocidades demasiado altas para reaccionar a tiempo ante una señal de prioridad o cruce peatonal se incrementa significativamente la posibilidad de accidentes. La instalación de señales de velocidad máxima permitida es una medida que no es suficiente para evitar esa situación y es necesario entonces implementar otras medidas que aquieten el tránsito.
- c) Diseño que incluya facilidades para los usuarios más vulnerables: el diseño físico-operativo de la intersección o cruce peatonal debe incorporar características que tengan en cuenta las necesidades operativas y de seguridad de peatones, ciclistas y personas con movilidad reducida. El diseño, la señalización y otros dispositivos ad-hoc (rebajes de solera, vallas peatonales, sendas táctiles para personas con discapacidad visual) debe inducir a estos usuarios a circular por los lugares más seguros.
- d) Diseño acorde con los requerimientos de capacidad de cada movimiento vehicular y con mínimos conflictos entre ellos y con los peatones: en función de la magnitud del flujo vehicular y los movimientos existentes en el cruce se debe, por ejemplo, canalizar movimientos, generar pistas exclusivas de viraje, desplazar cruces peatonales, prohibir algunos movimientos (disponiendo una alternativa razonable de recorrido para vehículos y peatones) u otras medidas que permitan un uso más adecuado de la capacidad y disminuyan los conflictos entre usuarios.

A partir de las condiciones anteriores y como resultado del cuidadoso estudio de la problemática existente en la intersección de prioridad o cruce peatonal, se debe establecer si existen deficiencias operativas o de seguridad de tránsito que requieren ser superadas antes de realizar el análisis de semaforización.

Existen una serie de recomendaciones de medidas para analizar y tratar situaciones problemáticas, además de algunas disposiciones reglamentarias que deben cumplirse obligatoriamente.

En el ámbito de las recomendaciones se pueden mencionar los siguientes documentos:

- a) Manual de Vialidad Urbana Capítulo 3: Recomendaciones para el Diseño de Elementos de Infraestructura Vial Urbana (Redevu). Ministerio de Vivienda y Urbanismo, División de Desarrollo Urbano.
- b) Tratamiento de Puntos Negros con Medidas Correctivas de Bajo Costo. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (Conaset).
- c) Manual de Diseño y Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana (Mespivu). Secretaría de Planificación de Transporte (Sectra).

En el caso de las disposiciones reglamentarias se pueden mencionar las siguientes:

- a) Manual de Señalización de Tránsito, Capítulo 2: Señales Verticales. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.
- b) Manual de Señalización de Tránsito, Capítulo 3: Demarcaciones. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.
- c) Manual de Señalización de Tránsito, Capítulo 6: Facilidades Explícitas para Peatones y Ciclistas. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.
- d) Manual de Señalización de Tránsito, Capítulo 7: Elementos de apoyo permanente. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.

e) Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

En todos los casos se deben utilizar las últimas versiones de cada documento o aquel que lo reemplace. Las recomendaciones y normas incluidas en estos documentos son una fuente de valiosa información para abordar los conflictos operativos y de seguridad de tránsito y, por lo tanto, siempre deben ser consultados al momento de proponer soluciones.

Es parte del estudio de justificación de semáforo el reporte del análisis de conflictos y los resultados obtenidos con la implementación de las soluciones alternativas, de manera que se demuestre que la semaforización es la solución que corresponde analizar frente a la insuficiencia de las alternativas probadas.

El análisis de conflictos de tránsito y su solución mediante señales de tránsito, pistas exclusivas, semáforos, etc., es parte del proceso de diseño operativo de las vías y cruces, y es un aspecto fundamental del desarrollo de un proyecto de inversión en transporte. Este tema se trata con mayor detalle en la sección 4.10 de este documento.

En el proceso de diseño operativo debe considerarse que la semaforización tiene un costo de inversión y mantenimiento considerables y que, por lo mismo, las soluciones alternativas pueden implicar inversiones relativamente elevadas y aun así ser más eficientes en el mediano plazo que la semaforización.

Algunos ejemplos de formas alternativas para regular algunos conflictos son las siguientes:

- Mediante el ajuste de la programación de los semáforos cercanos a la intersección o cruce peatonal de interés es posible inducir un patrón de llegada de los vehículos que produzca brechas más adecuadas para las maniobras de los usuarios que no tienen derecho preferente de paso en ese lugar. Opciones en este sentido son el uso de ciclo doble, tiempos de ciclo más cortos y ajustes en los desfases, siempre que no se generen efectos negativos significativos en la operación de la red de semáforos en la que estén insertos esos dispositivos. En la sección 4.2.7.1 se trata en detalle este caso.
- Movimientos vehiculares de viraje con una magnitud importante y que enfrentan movimientos prioritarios elevados pueden ser tratados con la implementación de pistas exclusivas de viraje con longitudes suficientes para las demandas existentes y reguladas con señal de prioridad.
- La provisión de una isla peatonal (o bien una mediana o bandejón) o el angostamiento de la calzada pueden ser medidas muy efectivas para disminuir la demora de los peatones o disminuir el número de atropellos.
- Una intersección de prioridad donde existe un alto porcentaje de virajes a la izquierda, muchos movimientos permitidos, accidentabilidad elevada o donde se quiere permitir los virajes en “U”, puede ser controlada de manera eficiente y segura a través de la implementación de una rotonda o mini-rotonda, adecuadamente diseñada desde el punto de vista geométrico y de su capacidad y, particularmente, teniendo en cuenta los efectos en la seguridad y el recorrido de los peatones.

Hasta ahora la experiencia en Chile en el uso de rotondas no ha sido buena porque salvo excepciones han sido mal diseñadas, generando en la práctica un grupo compacto de intersecciones en “T” en vez de una rotonda. La experiencia internacional muestra, por el contrario, un creciente interés en su uso porque los estudios indican que al reemplazar una intersección de prioridad por una rotonda, bien diseñada, disminuye en un 30% el total de accidentes y en un 80% los accidentes con lesionados y fallecidos; con igual o mejor capacidad vehicular<sup>1</sup>.

Un aspecto relevante para estudiar la factibilidad del uso de rotondas como alternativa a la semaforización es el espacio requerido para habilitarlas. Las rotondas en general requieren mayor espacio que una intersección típica de prioridad o semaforizada, sin embargo esa diferencia disminuye considerablemente en el caso de las mini-rotondas o las rotondas con accesos de una pista. El cuadro siguiente muestra valores típicos del diámetro de distintos tipos de rotonda en función de la longitud de los vehículos que pueden circular por ellas, se indica además la velocidad de diseño máxima recomendada.

---

<sup>1</sup>Existen guías de diseño que tratan sobre rotondas en aspectos de diseño, seguridad de tránsito, capacidad, etc., una de ellas es “Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition” National Cooperative Highway Research, NCHRP Report 672, disponible en internet. Lo que se reporta en este punto se extrajo principalmente de ese documento.

**Cuadro 4-1 Características de diferentes tipos de rotonda**

Configuración-nº pistas en accesos	Diámetro típico (m)*	Longitud máxima de vehículos que pueden circular (m)	Velocidad de diseño máxima (km/h)
Mini rotonda-1 pista	14 a 27	9 (camión simple)	30
Rotonda-1 pista	27 a 55	12 (bus) a 22,4 (camión articulado)	40
Rotonda-2 pistas	46 a 67	17 a 22,4 (camiones articulados)	40 a 50
Rotonda-3 pistas	61 a 91	17 a 22,4 (camiones articulados)	40 a 50

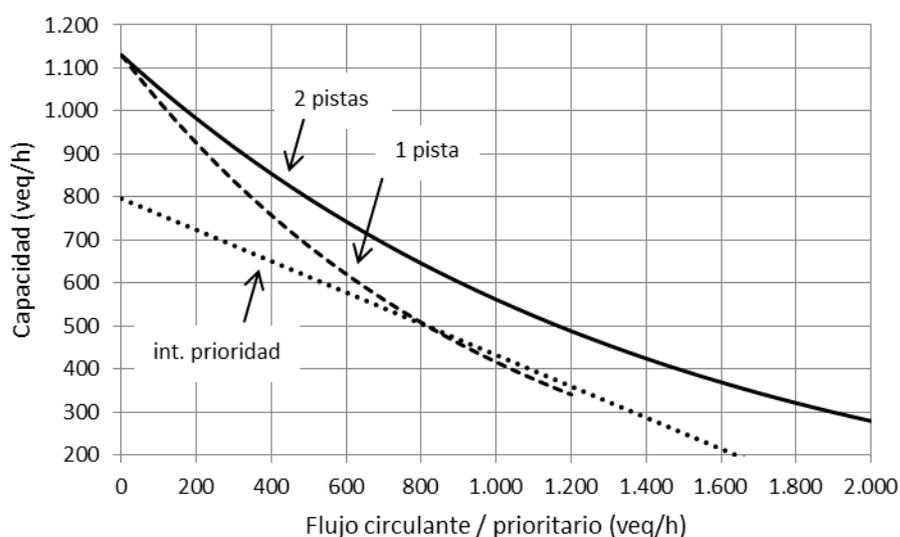
(\*) considera hasta 4 accesos a la rotonda

Las velocidades de diseño indicadas en el Cuadro 4-1 son compatibles con aquellas definidas en la OGUC para vías clasificadas como troncal, colector, de servicio o local y, por lo tanto, desde ese punto de vista las rotondas son una alternativa factible para regular las intersecciones en la mayoría de las vías urbanas.

La capacidad vehicular es otro factor determinante en el análisis de las rotondas como alternativa a la semaforización. En una rotonda bien diseñada cada movimiento de ingreso a ella tiene más capacidad que el viraje a la derecha en una intersección de prioridad tradicional (ese es el movimiento con más capacidad). La Figura 4-1 muestra la capacidad de ingreso a la rotonda en función del flujo vehicular prioritario frente al respectivo acceso (flujo circulante) y su comparación con la capacidad del viraje a la derecha para el mismo flujo prioritario en una intersección de prioridad. Tanto la capacidad como el flujo prioritario se expresan en vehículos equivalentes por hora.

Cuando se quiere analizar la conversión de una intersección de prioridad en rotonda, el flujo circulante se obtiene a partir de flujos medidos por tipo de vehículo y movimiento que luego se suman convenientemente para determinar su magnitud frente a cada acceso de la futura rotonda.

**Figura 4-1 Capacidad de los accesos de una rotonda y del viraje a la derecha en una intersección de prioridad (veq/h)**



En la Figura 4-1 las líneas segmentada y sólida corresponden a la capacidad de cada movimiento (pista) de ingreso a la rotonda cuando ésta dispone de 1 o 2 pistas de circulación (giro), respectivamente.

La presencia de pasos peatonales en los accesos a una rotonda disminuye su capacidad hasta en 20% cuando el flujo circulante es bajo; por el contrario, si el flujo circulante se incrementa entonces esa reducción disminuye hasta llegar a cero pues en ese caso los peatones pueden cruzar mientras los vehículos esperan que se produzca una brecha adecuada en el flujo vehicular circulante. Lo mismo ocurre en una intersección de prioridad. La rotonda debe diseñarse de modo que el grado de saturación máximo de los distintos accesos sea menor a 85%.

Cuando se demuestre que las medidas alternativas a la semaforización no resuelven adecuadamente los conflictos operativos o de seguridad de tránsito existentes se puede iniciar el estudio de justificación mediante el cual se determinará si se cumplen las condiciones mínimas para establecer si la semaforización es una opción adecuada.

La adecuación tiene relación con los niveles de actividad (flujos) y accidentabilidad en el sitio analizado pues en determinadas circunstancias la semaforización podría generar una operación con un mayor consumo de recursos sociales en comparación con la regulación sin semáforo. En términos generales, la semaforización genera más beneficios mientras mayores sean los niveles de tránsito y/o accidentabilidad. En caso contrario es preferible una regulación sin semáforo pero adecuadamente diseñada.

## 4.2.2 Justificación en función de flujos vehiculares

De acuerdo con lo señalado previamente, es necesario establecer procedimientos para determinar a priori si la semaforización tiene sentido desde el punto de vista operativo y de seguridad de tránsito. El procedimiento incluido en este capítulo del Manual de Señalización de Tránsito se basa en un conjunto de criterios de justificación de semáforo que están referidos a las siguientes variables:

- a) flujos vehiculares y peatonales en las horas de mayor demanda;
- b) nivel de accidentabilidad;
- c) magnitud de las demoras de los usuarios; y
- d) otras consideraciones que aplican a casos especiales.

La instalación de un semáforo está justificada si cualquiera de los criterios definidos se cumple según los procedimientos de verificación que se indican más adelante.

No obstante lo anterior, el cumplimiento de uno o varios criterios de justificación no significa que sea obligatoria la instalación del semáforo. La instalación se concretará cuando, además, el análisis de opciones indique que no hay una mejor alternativa para manejar los conflictos de tránsito, que sea efectiva y de menor costo. En este sentido, siempre se debe aplicar la experiencia y criterio del especialista para tener en cuenta particularidades de cada situación que sean relevantes, las cuales deben reportarse como antecedentes adicionales en el estudio de justificación de semáforo.

El funcionamiento de un semáforo produce detenciones obligadas a todos los usuarios durante determinados lapsos de tiempo, pues cuando una intersección de prioridad se convierte en una semaforizada los usuarios de la vía prioritaria necesariamente verán empeorada su situación, mientras que los de la vía secundaria posiblemente la verán mejorada. Para lograr que a nivel global se alcance con el semáforo una situación operativa mejor que la de la situación sin semáforo, se requiere, generalmente, que la vía secundaria presente inicialmente niveles inadmisibles de congestión.

Por lo anterior, la justificación de semáforos en función de flujos vehiculares se basa en identificar umbrales que garanticen una operación lo más eficiente posible, en el sentido de que el consumo global de recursos no se incremente en demasía, pero sujeta a que todos los usuarios experimenten demoras razonables.

Se distinguen dos alternativas de justificación según el número de horas analizadas de un día representativo, como se explica a continuación.

### 4.2.2.1 Justificación con flujos de 8 horas

Se justifica la instalación de un semáforo cuando el número de vehículos por hora que llegan a la intersección a través de los accesos de las vías prioritaria y secundaria en cada una de las 8 horas con mayor tránsito, de un día representativo de una semana tipo (ver sección 4.2.5), igualen o superen los umbrales que se indican en el siguiente cuadro.

**Cuadro 4-2 Umbrales para justificación con flujos de 8 horas**

Número de pistas por calzada de ingreso a la intersección		Flujo vehicular mínimo (veh/h) que llega a la intersección	
Vía principal	Vía secundaria	Suma de ambos accesos en la vía principal	Acceso con mayor flujo en la vía secundaria
1	1	750	230
2 o más	1	760	190
2 o más	2 o más	850	280
1	2 o más	840	280

Al verificar las condiciones del cuadro anterior los flujos vehiculares de las vías principal y secundaria deben corresponder a las mismas 8 horas. En la vía secundaria el acceso con mayor flujo debe determinarse por separado para cada hora y, en consecuencia, el valor más alto puede ocurrir en distintos accesos durante las horas analizadas.

Este criterio de 8 horas es recomendable para casos donde la actividad vehicular es importante durante gran parte del día, y que generalmente corresponden a intersecciones en zonas donde se concentran los equipamientos de servicios y comercio de la ciudad o de un sector de ella.

Cuando este criterio se verifique se puede asumir que la instalación del semáforo, con una programación óptima, genera una situación en la que todos los usuarios experimentan demoras razonables.

En la sección 4.2.6 se indican pautas para aplicar este criterio y en la sección 4.2.7 se entregan recomendaciones para tratar situaciones especiales que pueden ocurrir.

#### 4.2.2.2 Justificación con flujos de 4 horas

Se justifica la instalación de un semáforo cuando el número de vehículos por hora que llegan a la intersección a través de los accesos de las vías prioritaria y secundaria en cada una de las 4 horas con mayor tránsito, de un día representativo de una semana tipo (ver sección 4.2.5), igualen o superen los umbrales que se indican en el siguiente cuadro.

**Cuadro 4-3 Umbrales para justificación con flujos de 4 horas**

Número de pistas por calzada de ingreso a la intersección		Flujo vehicular mínimo (veh/h) que llega a la intersección	
Vía principal	Vía secundaria	Suma de ambos accesos en la vía principal	Acceso con mayor flujo en la vía secundaria
1	1	850	260
2 o más	1	920	230
2 o más	2 o más	1.010	340
1	2 o más	1.000	330

Al verificar las condiciones del cuadro anterior los flujos vehiculares de las vías principal y secundaria deben corresponder a las mismas 4 horas. En la vía secundaria el acceso con mayor flujo debe determinarse por separado para cada hora y, en consecuencia, el valor más alto puede ocurrir en distintos accesos durante las horas analizadas.

Este criterio es recomendable para casos donde la actividad vehicular es importante solamente durante un número reducido de horas del día, los que típicamente corresponden a intersecciones en sectores residenciales, industriales, de expansión urbana o zonas de paso para desplazamientos hacia y desde los principales centros de atracción o generación de viajes de la ciudad o de un sector de ella.

Cuando este criterio se verifique se puede asumir que la instalación del semáforo, con una programación óptima, genera una situación en la que todos los usuarios experimentarán demoras razonables.

Cuando la justificación ocurra sólo por este criterio, el semáforo que se instale debe ser actuado por los flujos vehiculares del acceso secundario y por los peatones que cruzan la vía principal.

En la sección 4.2.6 se indican pautas para aplicar este criterio y en la sección 4.2.7 se entregan recomendaciones para tratar situaciones especiales que pueden ocurrir.

Es necesario aplicar la experiencia del analista para tener en cuenta particularidades de cada situación, las cuales deben reportarse como antecedentes adicionales en el estudio de justificación de semáforo.

#### 4.2.3 Justificación en función de flujos peatonales

Se justifica la instalación de un semáforo en una intersección o en un cruce peatonal en un tramo de vía cuando el indicador  $PV^2$ , que mezcla el nivel de actividad peatonal ( $P$ ) con el flujo vehicular ( $V$ ) que enfrentan los peatones por unidad de tiempo, cumpla las condiciones establecidas en el siguiente cuadro, como promedio en las 4 horas de mayor actividad de un día representativo de la semana tipo (ver sección 4.2.5).

**Cuadro 4-4 Umbrales para el indicador PV<sup>2</sup>**

PV <sup>2</sup>	P (peat/h)	V(veh/h)	Recomendación preliminar
Sobre 10 <sup>8</sup> y si no es posible la provisión de una zona de protección peatonal en la calzada	50 a 1.100	300 a 500	Paso de Cebra
	50 a 1.100	sobre 500	Semáforo peatonal
	sobre 1.100	sobre 300	Semáforo peatonal
Sobre 2x10 <sup>8</sup> y existe o es necesaria la provisión de una zona de protección peatonal en la calzada	50 a 1.100	400 a 750	Paso de Cebra con isla o refugio peatonal
	50 a 1.100	sobre 750	Doble semáforo peatonal con refugio peatonal (semáforo desfasado)
	sobre 1.100	sobre 400	Doble semáforo peatonal con refugio peatonal (semáforo desfasado)

En la sección 4.2.6 se indican pautas para aplicar este criterio y en la sección 4.2.7 se entregan recomendaciones para tratar situaciones especiales que pueden ocurrir.

Este criterio de justificación no puede aplicarse si la distancia del sitio analizado a la intersección semaforizada, cruce peatonal u otra facilidad peatonal más cercana es menor a 80 m.

Si se justifica la instalación de un semáforo en una intersección únicamente por este criterio entonces se debe analizar el lugar, los conflictos que se producen y los tiempos de espera resultantes para determinar si es necesario que el semáforo opere actuado o no. En el primer caso es necesario establecer la configuración más adecuada de espiras detectoras de vehículos y botoneras peatonales, de manera que se logren demoras aceptables y condiciones seguras de cruce para todos los usuarios. Por ejemplo, podrían instalarse espiras en la vía menor flujo vehicular y botoneras para el cruce de la vía con mayor flujo vehicular, que activen la respectiva fase del semáforo.

Si se justifica la instalación en un tramo de vía el semáforo necesariamente debe ser actuado e incluir la instalación, por defecto, de botoneras o algún otro elemento que active la fase peatonal.

#### 4.2.4 Justificación en función del nivel de accidentabilidad

Se justifica la instalación de un semáforo cuando en la intersección o cruce peatonal analizado se haya producido al menos una de las siguientes condiciones:

- a) 2 o más personas fallecidas en los últimos 5 años; o
- b) 5 o más accidentes con lesionados, cualquiera sea su gravedad, como promedio anual durante los últimos 5 años.

En ambos casos deben considerarse solamente los accidentes de tránsito que puedan ser reducidos con la instalación de un semáforo<sup>2</sup> y que hayan ocurrido en condiciones de circulación normales. En la sección 4.2.5 se indican las fuentes de información de accidentes de tránsito que deben utilizarse para estudiar el cumplimiento de este criterio.

Cuando se verifique este criterio se puede asumir que la instalación del semáforo genera una disminución de los accidentes, típicamente los de mayor gravedad, cuyo valor social iguala o supera el costo social de inversión y mantenimiento del semáforo en un período de 10 años.

#### 4.2.5 Toma de datos y uso de datos estimados

En función del criterio de justificación que se analice deben recogerse distintos antecedentes de flujos o accidentabilidad, ya sea de mediciones propias del estudio de justificación, información oficial existente, o bien tomados de estimaciones de estudios de transporte previamente realizados.

<sup>2</sup> Utilizando información reportada en la literatura especializada, se consideró que un semáforo reduce en un 31% el número de accidentes.

Para analizar el criterio de la sección 4.2.4 la información de accidentabilidad debe ser aquella registrada en la unidad de Carabineros de Chile correspondiente al sitio analizado; la que esté reportada en el sistema de registro de accidentes de tránsito que maneja dicha institución y al cual tiene acceso la Secretaría Ejecutiva de la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (CONASET); o bien otra fuente de información oficial a falta de las anteriores.

Los accidentes que deben utilizarse para el análisis de justificación son los que pueden reducirse con la instalación del semáforo. En general, esos accidentes corresponden a colisiones entre vehículos con distinta dirección y atropellos en cruces peatonales. No pueden incluirse accidentes donde estén involucradas personas en estado de ebriedad o bajo el efecto de drogas. En caso de dudas se debe acordar con la UOCT cuáles son los accidentes que pueden incluirse en el análisis.

Para el análisis de los criterios de las secciones 4.2.2 y 4.2.3 los datos de flujos se expresan siempre en vehículos o peatones (incluyendo ciclistas<sup>3</sup>) por hora, sin aplicar factores de equivalencia por tipo de vehículo ni movimiento u otra circunstancia.

Por otro lado, y dado que los flujos vehiculares y peatonales (o las demoras, para el tratamiento de los casos señalados en la sección 4.2.7) están sujetos a fluctuaciones aleatorias y sistemáticas, puede ocurrir que con mediciones de un cierto día se cumpla un criterio de justificación y eso no ocurra con mediciones de otro día. Por esta razón la toma de datos para los criterios de las secciones 4.2.2 y 4.2.3 debe seguir el siguiente procedimiento.

1. En función del criterio de justificación que se analice deben identificarse las variables a medir a partir de lo indicado en las secciones 4.2.2 y 4.2.3. Las mediciones deben realizarse en una semana tipo, según la definición del MESPIVU, durante 2 días laborales entre martes y jueves que no estén afectados por días feriados o eventos especiales. Se recomienda medir en días que no sean consecutivos o que sean de distintas semanas. Los valores de flujos (o demoras) que se obtengan deben ser promediados en intervalos de 15 minutos para generar un único conjunto de datos por cada movimiento. Esos valores deben ser agregados por acceso según lo indique el criterio analizado.

Para los criterios de la sección 4.2.2 las mediciones de flujos se deben realizar durante al menos 10 horas/día para el criterio de 8 horas o 6 horas/día para el criterio de 4 horas, y en función de los datos seleccionar las horas (4 lapsos consecutivos de 15 minutos) de mayor flujo vehicular. Para el criterio de la sección 4.2.3 las mediciones se deben realizar durante al menos 6 horas/día y luego seleccionar las horas de mayor actividad vehicular-peatonal como se explica en la sección 4.2.6.

Los días de medición no deben estar afectados por situaciones climáticas poco habituales en el sitio de estudio. Por ejemplo, durante el invierno una lluvia moderada es un evento poco habitual en la zona centro-norte del país, pero es común en la zona sur: en el primer caso no sería correcto realizar la medición, pero sí lo es en el segundo. De acuerdo con lo anterior, la forma de proceder frente a determinadas condiciones climáticas debe ser consultada y acordada previamente con la UOCT.

2. Con los antecedentes recopilados se procede a revisar el cumplimiento del(los) criterio(s) en estudio y determinar la necesidad de llevar a cabo mediciones adicionales frente a dudas sobre el cumplimiento de todos o alguno de ellos, tal como se indica a continuación:
  - a) Si el análisis de verificación de un criterio de justificación muestra que éste se cumple por un margen de más de 15% de los umbrales definidos entonces se dirá que se verifica con certeza y, por lo tanto, no se requieren mediciones adicionales.
  - b) Si el criterio se cumple o no se cumple por un margen en valor absoluto menor a 15% de los umbrales correspondientes entonces se debe concluir que existen dudas sobre su cumplimiento y es necesario realizar una nueva medición en otro día entre martes y jueves representativo de la semana tipo, que se promedia en intervalos de 15 minutos con los datos de los otros 2 días. Si con los valores promedio resultantes se cumple la condición señalada en a) entonces se concluye que el criterio se verifica, en caso contrario se deben analizar las condiciones del caso c) siguiente.
  - c) Cuando se realice la medición adicional señalada en b) y aún persistan las dudas sobre el cumplimiento del criterio analizado (15% de tolerancia), la UOCT decidirá fundadamente el resultado del cumplimiento del criterio teniendo a la vista los antecedentes del estudio de justificación y otros que sean relevantes. En este sentido una opción es el requerimiento de una cuarta medición.

---

<sup>3</sup> Para fines de justificación de semáforos los ciclistas se consideran como peatones.

- d) En ciudades donde ocurren incrementos significativos del tráfico en determinadas épocas del año, las mediciones se deben realizar en días representativos de cada temporada definida de acuerdo con el MESPIVU. La verificación del cumplimiento en cada temporada se debe realizar como se indica en los puntos a), b) y c) previos. Entonces un criterio se cumple cuando se verifique en al menos una temporada. Tal como se indica en el punto c), será la UOCT quien decida ante dudas en el cumplimiento del criterio luego de realizar tres mediciones por temporada. No obstante lo anterior, si la justificación solamente se verifica en la temporada de verano, el semáforo debe ser de tipo actuado para minimizar su efecto en las demoras durante la temporada normal.
3. En lugar de flujos observados se pueden utilizar valores estimados como parte de un estudio de transporte que la UOCT valide como fuente de información suficientemente confiable para el análisis de justificación de semáforos. Las estimaciones deben corresponder a un horizonte temporal de 3 años como máximo en relación con la fecha de inicio del estudio de justificación. En este caso solamente se deben analizar el criterio de 4 horas (sección 4.2.2.2) o el de flujos peatonales (sección 4.2.3) y no incluir el tratamiento de las tolerancias señalado en el punto 2) previo. Se requiere además que los flujos estimados tengan una representatividad horaria igual o superior a la requerida por cada criterio analizado. Para esto se debe utilizar una periodización que esté validada por la UOCT. Dada la mayor incerteza de la información de flujos, en este caso siempre debe considerarse un semáforo que opere con un sistema de actuación de fases.

#### 4.2.6 Verificación del cumplimiento de los criterios de justificación

Una vez recopilada la información necesaria se procede a verificar el cumplimiento de los criterios de justificación descritos previamente.

En el caso de los criterios de las secciones 4.2.2 y 4.2.3 la verificación se realiza comparando los valores observados (o estimados) de flujos vehiculares y peatonales de cada hora analizada con los umbrales indicados en los respectivos cuadros.

En cada estudio de justificación se puede analizar el cumplimiento de uno o varios de los criterios pues no son excluyentes. En particular, puede estudiarse simultáneamente el cumplimiento de los criterios de 8 y 4 horas o solamente el que sea más apropiado a los horarios en que la actividad vehicular es más intensa. Es parte del estudio de justificación establecer el procedimiento más adecuado.

Para verificar el cumplimiento del criterio de la sección 4.2.3 es necesario además el siguiente procesamiento de los datos de flujos vehiculares y peatonales:

- Calcular los valores del indicador  $PV^2$  utilizando los valores horarios de las 6 horas medición y seleccionar los 4 valores más altos de ese indicador en cada día de medición.
- Con todos los datos de flujos máximos seleccionados se deben calcular flujos promedio tanto de vehículos como de peatones por hora. Con los valores promedio resultantes de flujo vehicular y peatonal se calcula un nuevo indicador  $PV^2$ . Finalmente, los valores promedio resultantes de flujos y el correspondiente indicador  $PV^2$  se comparan con los umbrales definidos en el Cuadro 4-4, estableciendo la opción de regulación que corresponde.

Para el criterio descrito en la sección 4.2.4 la verificación se realiza comparando la accidentabilidad observada durante al menos 5 años con los respectivos umbrales, teniendo en cuenta las restricciones señaladas sobre el tipo de accidentes que pueden ser incluidos en el análisis.

El análisis de los casos indicados en la sección 4.2.7 siguiente es obligatorio como parte del estudio de justificación de semáforo para así tener en cuenta un conjunto de situaciones excepcionales que pueden alterar el proceso o el resultado de la justificación.

Si ninguno de los criterios de justificación se verifica y no cabe la aplicación de alguna de las situaciones indicadas en la sección 4.2.7 entonces la solución de los conflictos de tránsito debe realizarse mediante otro tipo de medida de gestión o seguridad de tránsito, para lo cual se deben consultar los documentos indicados en la sección 4.2.1.2 u otros similares.

Si al menos uno de los criterios se cumple entonces estará justificada la instalación del semáforo.

#### 4.2.7 Análisis de casos especiales

En determinadas circunstancias se puede justificar la instalación de semáforos por consideraciones distintas a las indicadas en las secciones 4.2.2 a 4.2.4 o, por el contrario, puede ocurrir que incluso cumpliéndose alguno de los criterios de justificación otros factores hagan que no resulte conveniente la instalación de esos dispositivos.

A continuación se describen los casos especiales en los cuales se pueden hacer excepciones a los criterios de justificación de semáforos definidos en este manual. Estos casos especiales, si corresponde, deben ser analizados como parte del correspondiente estudio de justificación de semáforo.

En caso de justificarse un semáforo de acuerdo con el análisis de estos casos especiales se debe acordar con la UOCT la necesidad de que ciertas fases operen actuadas por los peatones o vehículos.

#### **4.2.7.1 Presencia de intersecciones semaforizadas cercanas**

Cuando se verifique cualesquiera de los criterios señalados en las secciones 4.2.2 y 4.2.3 y existan intersecciones semaforizadas a menos de 400 metros aguas arriba del sitio analizado, es necesario estudiar con mayor detalle el funcionamiento de la intersección o cruce peatonal de interés para estudiar si el funcionamiento de los semáforos adyacentes permite a los conductores y peatones incorporarse o cruzar las corrientes prioritarias en condiciones seguras y sin experimentar demoras excesivas. Si esas condiciones se verifican entonces no se justificará la instalación del semáforo a pesar de que se cumpla alguno de los criterios de justificación descritos en las secciones 4.2.2 y 4.2.3.

Para realizar el análisis de estos casos se debe medir o estimar la demora media de los usuarios (vehículos y/o peatones) en cada acceso secundario o lugar de cruce de los peatones durante las 4 horas de mayor demanda, incluyendo aquellas en las que se hayan detectado los problemas operativos más severos.

Para realizar la medición o estimación de la demora media se deben seguir los procedimientos descritos en el Manual de "Mantenimiento de semáforos y actualización de programaciones" ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)). El analista debe observar también las condiciones de seguridad de tránsito en las que se realizan las maniobras de los usuarios durante esas mismas horas, ya que, por ejemplo, maniobras riesgosas tales como aceleraciones y detenciones bruscas son un indicador de la ausencia de brechas de extensión adecuada.

Si la demora media por vehículo o peatón calculada en intervalos de 15 minutos durante las horas analizadas es superior a 45 segundos durante a lo más 3 intervalos, no necesariamente consecutivos, y las maniobras de los conductores de la vía secundaria y los peatones se realizan en condiciones adecuadas de seguridad durante los intervalos más conflictivos, entonces no se justificará la instalación, a pesar de que se cumpla alguno de los criterios señalados en las secciones 4.2.2 y 4.2.3.

Si no se cumple alguna de las dos condiciones previas y no hay otras alternativas de solución entonces finalmente se validará el cumplimiento del respectivo criterio de justificación.

#### **4.2.7.2 Existencia de problemas operativos en movimientos vehiculares**

Puede justificarse la instalación de un semáforo a pesar de que no se verifiquen los criterios indicados en la sección 4.2.2 si en la intersección analizada algunos movimientos vehiculares de viraje que no tienen derecho preferente de paso, experimentan dificultades significativas para cruzar o incorporarse a una corriente prioritaria. Esos movimientos pueden corresponder a los que se realicen desde un acceso secundario o prioritario de la intersección.

Para analizar esos casos se requiere medir o estimar la demora media de los vehículos en cada movimiento de interés en las 4 horas de mayor demanda, incluyendo aquellas en las que se hayan detectado los problemas operativos más severos, siguiendo los procedimientos descritos en el Manual de "Mantenimiento de semáforos y actualización de programaciones" ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

El analista debe observar también las condiciones de seguridad de tránsito en las que se realizan las maniobras de los usuarios durante esas mismas horas, ya que, por ejemplo, maniobras riesgosas tales como aceleraciones y detenciones bruscas son un indicador de la ausencia de brechas de extensión adecuada.

La justificación con este criterio de excepción se da cuando se verifican simultáneamente las dos condiciones que se indican a continuación:

- a) los movimientos de viraje analizados cuentan con pistas exclusivas reguladas con señal de prioridad y, si corresponde, se han realizado los ajustes señalados en la sección 4.2.1.2 a la programación de los semáforos ubicados a menos de 400 m del sitio analizado; y
- b) la demora media por vehículo calculada en intervalos de 15 minutos durante las horas analizadas es superior a 45 segundos durante al menos 4 intervalos, no necesariamente consecutivos o, alternativamente, existen notorios indicios de la insuficiencia de la extensión de las brechas en la corriente prioritaria.

En los casos donde sea infactible la provisión de pistas exclusivas de viraje para los movimientos de interés, debido a los elevados costos que pueda requerir ese tipo de obras u otras causas, se puede obviar el cumplimiento de este requisito para la aplicación de la condición a) anterior.

#### **4.2.7.3 Cruce peatonal no semaforizado con alta demanda**

Cuando un cruce peatonal no semaforizado con alta demanda peatonal produce demoras excesivas al flujo vehicular, como ocurre por ejemplo en algunos cruces de paseos peatonales, se puede analizar la justificación de un semáforo para regular ese cruce aun si no se cumplen otros criterios de justificación de semáforo.

Para realizar el análisis de estos casos se debe medir o estimar la demora media de los vehículos en el cruce peatonal durante las 4 horas de mayor demanda, incluyendo aquellas en las que se hayan detectado los problemas operativos más severos, siguiendo los procedimientos descritos en el Manual de “Mantenimiento de semáforos y actualización de programaciones” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

La justificación con este criterio de excepción se da cuando la demora media por vehículo calculada en intervalos de 15 minutos durante las horas analizadas es superior a 45 segundos durante al menos 4 intervalos, no necesariamente consecutivos.

#### **4.2.7.4 Justificación con datos de días de fin de semana, lunes o viernes**

En casos excepcionales y cuando los problemas operativos se concentren en días de fin de semana, o en días lunes o viernes, se puede analizar la justificación de un semáforo con datos de esos días, pero verificando solamente el cumplimiento de los criterios de 4 horas y/o de flujos peatonales descritos en las secciones 4.2.2.2 y 4.2.3, respectivamente. En estos casos excepcionales se deben cumplir también los procedimientos y requerimientos señalados en las secciones 4.2.5 y 4.2.6.

#### **4.2.7.5 Justificación asociada a un cruce ferroviario a nivel**

En ciertos casos la existencia de un cruce ferroviario a nivel puede requerir la instalación de semáforos en las intersecciones viales adyacentes a dicho cruce, de forma que se logre una operación coordinada entre esas intersecciones y el sistema de regulación del cruce ferroviario (barreras automáticas). La UOCT, en acuerdo con otras instituciones competentes en la materia, y bajo determinadas condiciones de tráfico vehicular y ferroviario<sup>4</sup> puede proponer y justificar la instalación de esos semáforos y el equipamiento complementario que garanticen los niveles de seguridad necesarios.

#### **4.2.7.6 Proyectos públicos de inversión**

La UOCT puede proponer y justificar fundadamente la instalación de semáforos como parte de un proyecto de inversión pública que, por ejemplo, busque favorecer la circulación de buses, vehículos de emergencia o usuarios no motorizados, aunque no se cumpla alguno de los criterios señalados en este manual.

#### **4.2.7.7 Justificación con umbrales reducidos**

En casos excepcionales la UOCT puede autorizar la justificación de un semáforo si en la intersección analizada los flujos vehiculares observados son mayores o iguales a un 75% de los valores señalados en el Cuadro 4-2, en cuyo caso el semáforo que se instale debe operar con un esquema de actuación de fases de manera que se logren demoras aceptables y condiciones seguras de cruce para todos los usuarios. En esos casos la toma de datos debe cumplir los requerimientos indicados en la sección 4.2.5 pero sin considerar las tolerancias señaladas en ella.

### **4.2.8 Reporte del análisis de justificación de semáforo**

El análisis de justificación de semáforo debe reportarse en un informe que se presentará a la UOCT para su revisión y aprobación cuando proceda. El informe debe elaborarse según los requisitos definidos en el Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

## **4.3 Capacidad de intersecciones semaforizadas**

Para que un semáforo funcione correctamente debe estar justificado técnicamente y tener una programación adecuada.

---

<sup>4</sup> A modo de referencia pueden utilizarse las recomendaciones del documento “Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways” (MUTCD). FHWA U.S. Department of Transportation de EE.UU., disponible en internet.

La programación de un semáforo depende de una serie de factores. Los más relevantes son las características de la demanda de usuarios y de la oferta de transporte en la intersección. La demanda se expresa a través de la cantidad y tipo de vehículos o peatones (ciclistas) por unidad de tiempo que llegan a ella. La oferta a su vez se representa mediante la capacidad de la intersección.

La capacidad de la intersección corresponde a la que existe en sus accesos y se representa por el número máximo de vehículos de una cierta corriente vehicular que puede atravesar una sección de vía por unidad de tiempo, en las condiciones prevalecientes de circulación.

En rigor, la estimación de capacidad debe realizarse para cada pista que accede a la intersección. Teniendo esto en cuenta, las condiciones de circulación que determinan la capacidad son las siguientes:

- tipo de vehículos que utilizan la pista;
- maniobras que realizan los vehículos;
- características de la vía: pendiente, ancho de pista;
- proporción de vehículos pesados en la pista;
- posición relativa de la pista en el acceso; y
- período del día.

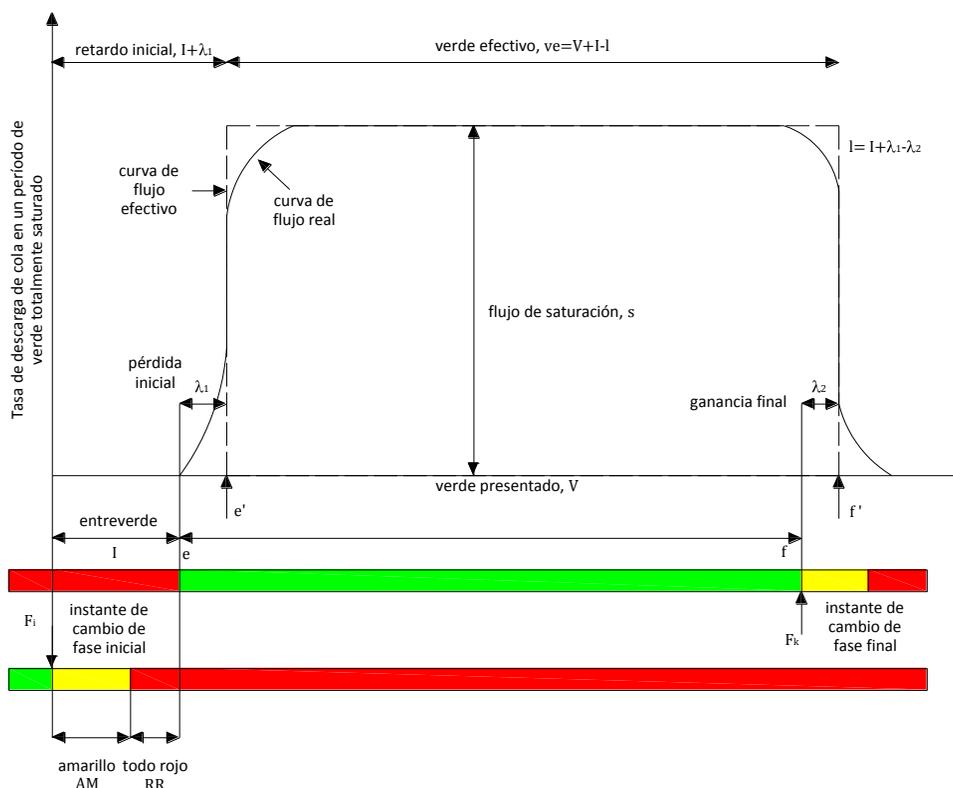
Como se explica a continuación, la capacidad de una intersección semaforizada se alcanza cuando los vehículos salen de una cola cuya longitud es suficiente como para que la descarga se realice durante todo el período de verde.

### 4.3.1 Modelo binario de descarga

En una intersección semaforizada el proceso de descarga de una cola en una pista es el fenómeno básico que debe ser analizado para estimar su capacidad.

Una vez iniciado el período de verde, y transcurrido un cierto lapso de tiempo, la salida de los vehículos se produce a una tasa máxima denominada flujo de saturación ( $s$ ). Esta tasa se mantiene aproximadamente constante hasta el final del tiempo de verde. Durante el período de amarillo la descarga disminuye hasta anularse al final de ese período o poco después. La Figura 4-2 muestra la representación de este fenómeno.

Figura 4-2 Modelo binario de descarga



Las transiciones inicial ( $\lambda_1 = e' - e$ ) y final ( $\lambda_2 = f' - f$ ) corresponden, respectivamente, al proceso de puesta en movimiento de la cola tras la aparición de la luz verde y a la detención gradual de los vehículos una vez que aparece la luz amarilla.

La capacidad es, por lo tanto, el área bajo la curva que representa la descarga por unidad de tiempo durante un ciclo; bajo el supuesto que la longitud de cola es tal que permite una descarga durante todo el período de verde, lo cual se denomina período de verde totalmente saturado. Si la cola no es lo suficientemente larga la descarga ocurrirá durante una fracción del tiempo de verde, disminuyendo así el número de vehículos que atraviesa la sección de vía durante el ciclo.

Para obtener un modelo más simple de la descarga de vehículos es necesario hacer abstracción de las transiciones mencionadas. Para esto, y suponiendo que existe una cola suficientemente larga, se adopta un proceso binario con dos etapas:

- $ve$ : verde efectivo, durante el cual la tasa de salida es  $s$ ; y
- $re$ : rojo efectivo, en el cual la tasa de salida es 0.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo binario se construye manteniendo la capacidad real del movimiento (máximo número de vehículos que se descargan durante un ciclo) y utilizando los parámetros  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , que permiten relacionar el período de verde efectivo con el período de verde del semáforo.

Sea  $c$  el tiempo de ciclo,  $V$  el período de verde en el semáforo,  $\lambda_1$  la pérdida en la partida y  $\lambda_2$  la ganancia final. Entonces se tiene que,

$$ve = V + \lambda_2 - \lambda_1 \quad (4-1)$$

$$re = c - ve \quad (4-2)$$

La capacidad del movimiento queda dada entonces por

$$Q = \frac{s \cdot ve + 0 \cdot re}{c} = \frac{ve}{c} s = \mu s \quad (4-3)$$

donde  $\mu = ve/c$  es la razón de verde efectivo.

En consecuencia, la capacidad depende del flujo de saturación ( $s$ ), que es un parámetro propio del acceso o pista, y de la programación del semáforo a través de la razón de verde efectivo ( $\mu$ ). Como la programación está en función de las demandas de las diversas corrientes que llegan a la intersección, la capacidad de una pista para una determinada corriente vehicular depende indirectamente de todas las demás.

El flujo de saturación es función de características físico-ambientales de la pista y también del comportamiento de los conductores. Como esas características varían entre un lugar y otro o entre distintos momentos en un mismo lugar, el flujo de saturación varía también según esos factores. Para estudiar esta dependencia el enfoque utilizado consiste en establecer condiciones básicas o referenciales en los aspectos físico-ambientales y de comportamiento, y referir a ellas las condiciones observadas en cada caso, mediante, por ejemplo, factores de equivalencia. Este proceso se conoce como tratamiento de la heterogeneidad del tránsito. El flujo de saturación en esas condiciones de referencia se denomina flujo de saturación básico ( $s_b$ ).

#### 4.3.1.1 Tratamiento de la heterogeneidad del tránsito

Según el trabajo de Gibson et al. (1997)<sup>5</sup> la heterogeneidad del tránsito proviene no sólo de la diversidad de tipos de vehículos, características geométricas de la pista y movimientos existentes, como usualmente se ha considerado, sino que se genera también por otros factores como la proporción de vehículos pesados en la pista, su ubicación relativa en el acceso (pistas izquierda, central o derecha) y el período del día. Como resultado de ese trabajo se desarrollaron nuevas fórmulas para estimar el flujo de saturación básico y los correspondientes factores de equivalencia.

La aplicación de este nuevo procedimiento incluye como variable adicional la proporción de vehículos pesados en la pista. Una consecuencia de esto es que la estimación del flujo de saturación requiere conocer los flujos vehiculares desagregados por pista. Como una medición por pista habitualmente implica un costo demasiado elevado, se ha desarrollado un método simplificado que se basa en asumir que los usuarios de vehículos particulares eligen pista entre las que tienen disponibles de manera que los grados de saturación de ellas se igualen. Este principio no es válido para los buses, taxis colectivos y taxis, que tienen manifiesta preferencia a circular por la pista derecha para captar pasajeros. Teniendo en cuenta que no ha sido posible

---

<sup>5</sup>Gibson, J., Bartel, G. y Coeymans, J.E. (1997) "Redefinición de los parámetros de capacidad de una intersección semaforizada bajo condiciones de tráfico mixto". Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago.

establecer una regla cuantitativa al respecto, es necesario obtener en terreno la distribución del flujo de esos vehículos entre pistas en cada caso.

#### 4.3.1.2 Heterogeneidad por tipo de vehículo, tráfico mixto y ubicación de la pista

El supuesto de salidas a tasa constante en el modelo binario sólo es válido si los vehículos son homogéneos, esto no ocurre en la práctica pues la red vial urbana es utilizada por una gama de vehículos que difieren en sus características físicas y operacionales. Las categorías que se utilicen para distinguir los tipos de vehículos deben ser consistentes con el procedimiento de estimación del flujo de saturación que se adopte, particularmente con la desagregación de los factores de equivalencia que se tenga.

##### 4.3.1.2.1 Unidades de referencia

Toda variable de flujo, definida espacial y temporalmente y por categoría, debe expresarse en unidades físicas/unidad de tiempo. La unidad física a emplear presenta limitaciones desde el punto de vista de la agrupación de los valores observados. Si simplemente se suman los flujos vehiculares por hora de diversas categorías, que, por ejemplo, realizan el mismo movimiento, se obtiene una cantidad expresada en vehículos/hora. La unidad "vehículo" es heterogénea pues depende de la composición del tráfico. Por ello se definen unidades de referencia a las que son convertidos todos los flujos aplicándoles factores de equivalencia. Tres unidades son importantes:

- VEQ: vehículo equivalente, que representa a un automóvil particular típico;
- ADE: automóvil directo equivalente, que es un VEQ que sigue directo en una intersección, en una pista en la que sólo hay autos directos; y
- ADM: automóvil directo equivalente en pistas con tráfico mixto, que corresponde a un ADE afectado por la presencia de vehículos pesados tales como buses o camiones.

El ADM fue introducido por Gibson *et al.* (1997) luego de comprobar que el intervalo de descarga del ADE varía con la proporción de vehículos pesados en la pista. Obviamente, también fue necesario ajustar la definición de ADE para considerar solamente el caso de pistas con automóviles que siguen directo. El ADM es entonces una nueva unidad de vehículos, con su propio factor de equivalencia.

##### 4.3.1.2.2 Conversión de unidades

La conversión de variables de flujos heterogéneos a unidades homogéneas se lleva a cabo mediante factores de equivalencia. Estos factores dependen del fenómeno para el cual se establece la equivalencia. Sin embargo, en el tráfico urbano las intersecciones suelen tener un rol decisivo y generalmente se aplican sólo factores de equivalencia referidos a la capacidad de ellas. Estos factores pueden incorporar tres aspectos: categorías de vehículos, cantidad de vehículos pesados en la pista y movimientos, los cuales se tratan normalmente por separado y como valores multiplicativos. El objetivo es que las variables de interés queden expresadas en las mismas unidades.

Sea  $s_b$  (ADE/h) el flujo de saturación para una corriente compuesta sólo por ADES, y que denominaremos flujo de saturación básico,  $q_i$  (veh/h) el flujo del movimiento  $i$  y  $s$  (veh/h) el flujo de saturación para la corriente real. Entonces, se tiene

$$s = f_a f_p \frac{s_b}{\frac{\sum_i f_i q_i}{\sum_i q_i}} \quad (4-4)$$

donde  $f_i$  (ADE/veh) es el factor de equivalencia de la clase  $i$  correspondiente a un cierto tipo de vehículo y movimiento, y  $f_a$  y  $f_p$  son los factores de corrección por ancho y pendiente de la pista, respectivamente.

En Manual de "Programación y modelación de semáforos" ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)) se presentan los valores recomendados del flujo de saturación básico y los factores de equivalencia.

#### 4.3.2 Casos en que el flujo de saturación depende de la programación del semáforo

Hay casos en que el flujo de saturación depende de la programación del semáforo, en los cuales no es posible corregir su valor a través de factores como los indicados previamente. Ejemplos de esta situación son los virajes con oposición y las pistas cortas. La estimación del flujo de saturación en estos casos es más compleja. El programa computacional SIDRA modela adecuadamente estas situaciones modificando el flujo de saturación según corresponda. El programa TRANSYT, en general, no tiene esa capacidad pues el flujo de saturación es un dato de entrada definido exógenamente.

Debido a lo anterior, al estudiar redes de semáforos con TRANSYT 8S se requiere un procedimiento especial para estimar el flujo de saturación en esos casos especiales. Una alternativa es el uso de SIDRA para proveer datos ajustados de capacidad a TRANSYT, otra opción es el uso de relaciones simplificadas que permiten

considerar el efecto de la programación en la capacidad. El Manual de “Programación y modelación de semáforos” (www.uoct.cl) contiene una serie de recomendaciones adicionales para tratar estos casos, incluyendo el uso de una planilla de cálculo para estimar el flujo de saturación con el método de Gibson *et al.*

#### 4.3.2.1 Virajes con oposición

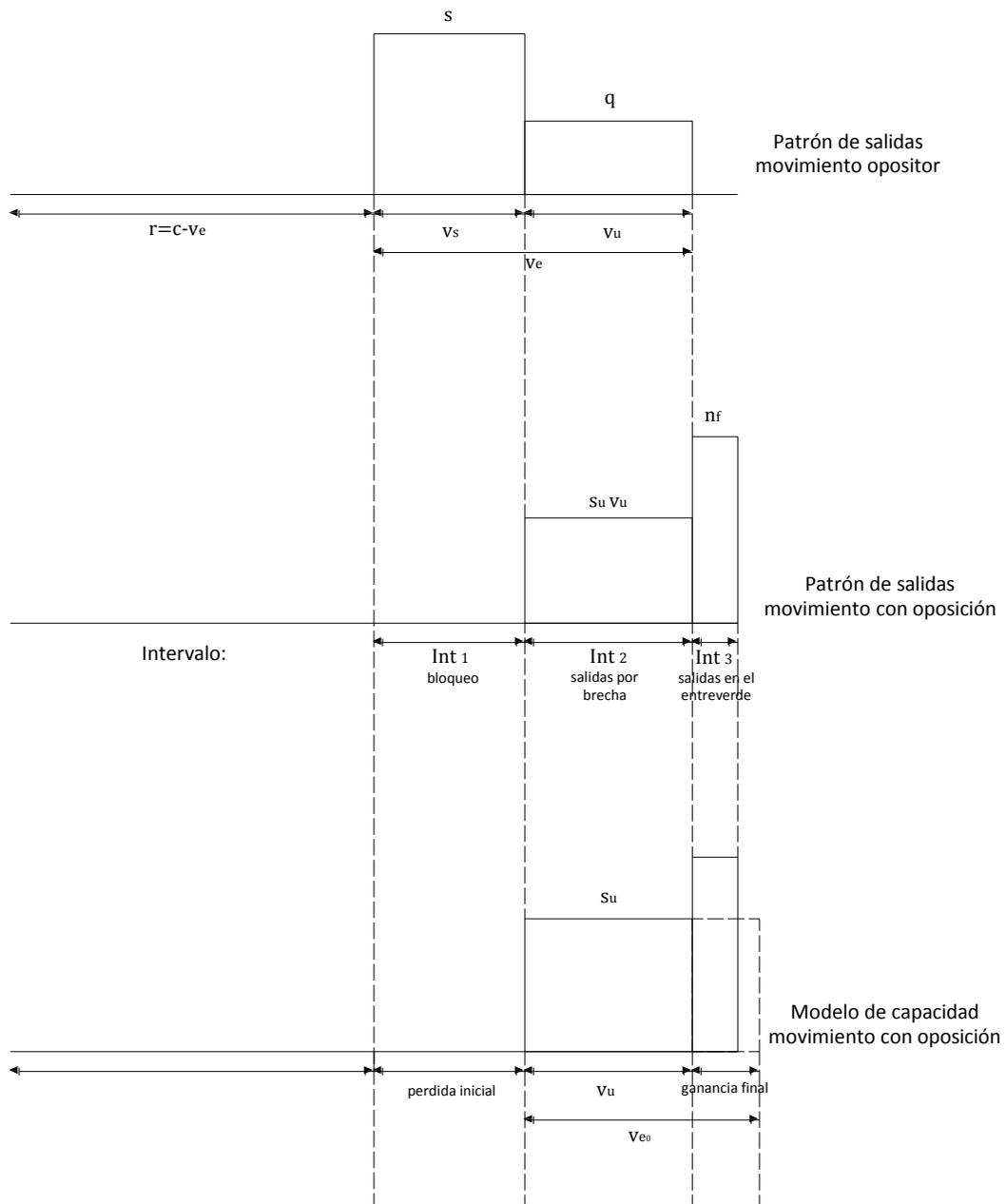
Uno de los casos en que el flujo de saturación depende de la programación del semáforo es cuando un movimiento enfrenta la oposición de otro, que es prioritario durante todo o parte del período de verde. Esto ocurre por ejemplo en virajes a la izquierda que enfrentan a movimientos vehiculares o virajes a la derecha que enfrentan a peatones.

Para analizar estos casos es necesario distinguir tres etapas asociadas al movimiento con oposición:

- Etapa de verde efectivo saturado, se produce al inicio del verde efectivo y en ella se descarga la cola del movimiento opositor formada en el período de rojo. Esa cola se descarga a intervalo mínimo y en consecuencia el movimiento con oposición no puede pasar ya que las brechas en la corriente prioritaria no tienen la extensión suficiente.
- Etapa de verde efectivo no saturado, en ella se produce cruce por aceptación de brechas, en el que la capacidad del movimiento es la correspondiente a un movimiento secundario ( $s_u$ ) que cede el paso a una corriente prioritaria. Este período se extiende hasta el final del verde efectivo.
- Etapa final de descarga, es frecuente que se produzca una acumulación de vehículos, pasada la línea de detención, que cruzan al final del entreverde aprovechando la existencia de períodos de rojo-rojo y los retrasos en la partida de los vehículos que ganan derecho de paso. El número de vehículos que pasa en este período se designa por  $n_f$  y típicamente varía entre 0 y 2 vehículos por ciclo-pista.

En la siguiente figura se muestran las tres etapas descritas y la representación del modelo de capacidad del movimiento con oposición.

**Figura 4-3 Modelo de descarga de virajes con oposición**



Para determinar el flujo de saturación correspondiente al movimiento con oposición se plantea la siguiente relación, que busca determinar tiempo de verde efectivo  $ve_o$  que produce el mismo número total de descargas de las tres etapas antes descritas asumiendo un flujo de saturación  $s_u$ :

$$s_u ve_o = 0 + s_u v_u + n_f \quad (4-5)$$

o equivalentemente,

$$ve_o = v_u + n_f/s_u \quad (4-6)$$

con

$$v_u = \frac{v_g - yC}{1 - y} \quad (4-7)$$

y donde

$s_u$ : es el flujo de saturación del movimiento con oposición cuando se descarga mediante un proceso de aceptación de brechas (veh/s)

$v_u$ : es la parte del verde efectivo en que el movimiento con oposición se descarga mediante un proceso de aceptación de brechas (s)

- $n_f$ : número de vehículos por ciclo que pueden descargarse al final del entreverde por pista y ciclo (veh)
- $ve$ : verde efectivo del movimiento opositor (s)
- $y$ : factor de carga del movimiento opositor
- $c$ : tiempo de ciclo (s)

De acuerdo con este modelo, la capacidad del movimiento con oposición está dada por

$$Q_o = s_u ve_o / c \quad (4-8)$$

y el tiempo perdido por

$$l_o = V + I - ve_o \quad (4-9)$$

donde  $V$  e  $I$  son los tiempos de verde y entreverde en el semáforo para el movimiento con oposición.

Para determinar el valor de  $s_u$  se puede utilizar un modelo de aceptación de brechas o un modelo de capacidad lineal. En el primer caso, Akçelik (1993)<sup>6</sup> propone utilizar el siguiente modelo:

$$s_u = \frac{\lambda \theta \exp(-(\tau - \Delta)\lambda)}{1 - \exp(-\beta\lambda)} \quad (4-10)$$

donde:

- $\tau$ : es la brecha crítica (s)
- $\beta$ : intervalo mínimo de descarga de la cola del movimiento con oposición (s), corresponde al inverso de  $s_u$  cuando  $q_p \rightarrow 0$
- $\Delta$ : intervalo mínimo de la corriente opositora,  $\Delta = 1/s$  (s)

Las expresiones para los parámetros  $\lambda$  y  $\theta$  son:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_i q_i}{1 - \Delta q_i} \quad (4-11)$$

$$\theta = \prod_{i=1}^N (1 - \Delta q_i) \quad (4-12)$$

donde

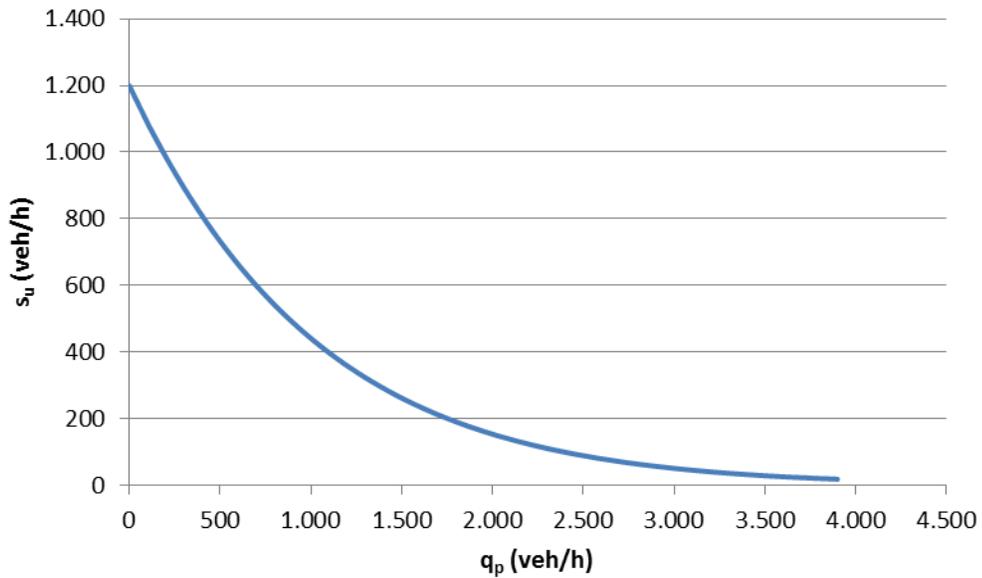
- $i$ : =1 ...N, es el número de pistas opositoras al movimiento secundario
- $\phi_i$ : factor de pelotón en la  $i$ -ésima pista opositora: proporción de vehículos que se desplaza en pelotón. Se puede aproximar por el grado de saturación
- $q_i$ : flujo vehicular en la  $i$ -ésima pista opositora

Asumiendo la oposición de solamente una corriente opositora y  $\tau = 5$  y  $\beta = 3$ , la siguiente figura muestra los valores resultantes de  $s_u$ .

---

<sup>6</sup>Akcelik, R. (1993) Traffic signals: capacity and timing analysis. Australian Road Research Board Ltd. Research Report ARR 123, fifth reprint

Figura 4-4 Flujo de saturación según modelo de aceptación de brechas



Cuando el período de verde del movimiento con oposición termina antes que el período de verde del movimiento opositor es necesario ajustar el valor de  $v_u$  según la siguiente relación:

$$\tilde{v}_u = \begin{cases} v_u - \gamma & \text{si } \gamma < v_u \\ 0 & \text{si } \gamma \geq v_u \end{cases} \quad (4-13)$$

donde  $\tilde{v}_u$  es el valor corregido e  $\gamma = I_B + V_B$ , B es la fase que sigue una vez que pierde derecho de paso el movimiento con oposición.

#### 4.3.2.2 Pistas cortas

Otro caso en el que la capacidad depende de la programación del semáforo corresponde a pistas que poseen una longitud menor a la del arco vial al que pertenecen. Esas pistas se denominan pistas cortas y pueden originarse por condiciones de diseño (bolsillos de viraje) u operacionales (existencia de estacionamiento en la calzada o paradas de buses cercanas a la intersección). Algunos ejemplos son los que se muestran en las siguientes figuras.

Figura 4-5 Pista corta exclusiva para viraje

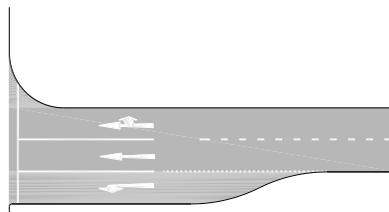
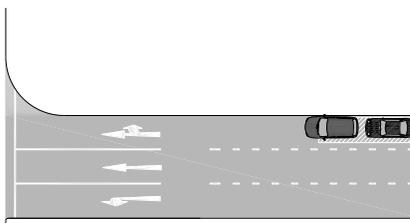


Figura 4-6 Pista corta originada por estacionamiento en la calzada



La característica principal de las pistas cortas es que contribuyen a la capacidad de la vía mientras se descarga la cola almacenada en ella durante el rojo. Terminada la descarga de esa cola la capacidad de la vía es solamente la de las pistas adyacentes.

Si la longitud de la pista corta es similar a la extensión máxima de la cola entonces la pista corta aporta a la capacidad durante todo el período de verde y, por lo tanto, para efectos de la modelación es una pista normal. En caso contrario existe efecto de pista corta y es necesario darle un tratamiento especial.

A partir de lo anterior se concluye que en este caso la capacidad es función de la programación del semáforo pues la extensión de la cola depende de la duración del tiempo de rojo. Pero como la programación varía según el valor de la capacidad se origina una circularidad que es necesario resolver. El programa SIDRA incorpora un algoritmo iterativo para tratar estas situaciones.

#### 4.3.2.3 Bloqueos

En ciertos casos los fenómenos que ocurren en una pista producen interferencias entre vehículos que circulan por ella y que realizan distintos movimientos. Estas situaciones se conocen como bloqueos de efecto local y su consideración en la programación requiere la aplicación de técnicas especiales para determinar la capacidad.

Existen también bloqueos con efecto en grupos de intersecciones y que se originan cuando las colas tienen una longitud que se aproxima o excede la longitud de la vía entre intersecciones adyacentes. En esa situación los vehículos de la intersección aguas arriba pueden experimentar dificultades para salir de esa intersección durante el período de verde pues su paso podría estar bloqueado por la cola de vehículos provenientes de la intersección aguas arriba.

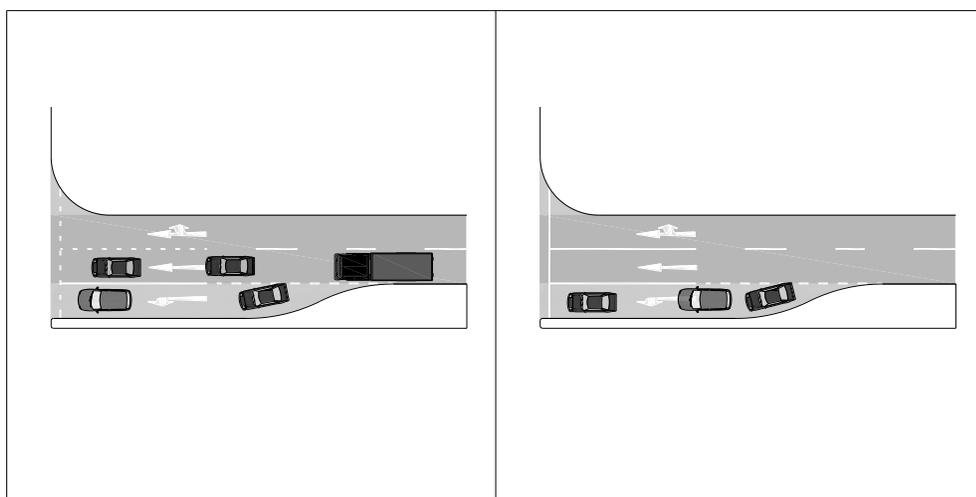
El bloqueo puede ocasionar una disminución importante del tiempo efectivo de verde, incrementando el grado de saturación y generando colas de mayor longitud en la intersección aguas arriba. De esta manera el bloqueo puede expandirse hacia otras intersecciones cercanas y provocar demoras elevadas a un número significativo de usuarios. Es por esta razón que el análisis de eventuales bloqueos es fundamental, particularmente en intersecciones con altos niveles de saturación insertas en una red. Y más aún cuando los programas de simulación de tránsito utilizados para programar semáforos no tratan adecuadamente esas situaciones.

##### 4.3.2.3.1 Bloqueo con efecto local

Cuando existen bloqueos con efecto local es posible distinguir dos situaciones:

- Bloqueo entre corrientes en una misma pista: por ejemplo, entre un viraje a la izquierda con oposición y un movimiento directo.
- Bloqueo entre pistas que divergen desde un punto común: la pista corta o ramal bloquea a la pista adyacente o viceversa. Estos casos se ilustran en la siguiente figura.

**Figura 4-7 Ejemplos de bloqueo de pistas**



Frente a fenómenos de bloqueo como los anteriores se pueden tomar medidas como las siguientes para evitar su ocurrencia o disminuir sus efectos:

- Revisar y eventualmente corregir el diseño de fases.
- Revisar la asignación de pistas a los movimientos.
- Analizar si es posible dar una partida adelantada o detención retrasada del movimiento que bloquea.
- Revisar y eventualmente modificar la longitud de la pista corta.

#### 4.3.2.3.2 Bloqueo con efecto en áreas

El bloqueo en áreas surge cuando la cola formada a partir de la línea de detención de una intersección obstaculiza la salida durante el tiempo de verde en intersecciones aguas arriba. Este es el mecanismo clave de propagación de la congestión y tiene potencialmente un efecto de red. Este problema surge si:

- La longitud de la cola aguas arriba excede un cierto valor crítico, más allá del cual el tramo despejado disponible no permite a los vehículos que salen de la línea de detención aguas arriba alcanzar la velocidad de crucero. En este caso se reducirá el flujo de saturación aguas arriba, en una magnitud que depende de cuánto se exceda el valor crítico.
- La extensión de la cola aguas abajo supera la capacidad de almacenamiento, caso en el cual el verde efectivo se verá disminuido.

De acuerdo con lo anterior, el problema comienza con una reducción del flujo de saturación y puede llegar a convertirse en reducción del verde efectivo que genere capacidad nula durante un lapso de tiempo.

El programa TRANSYT8S asume que las colas se generan de forma vertical en la línea de detención y en consecuencia no tiene capacidad para simular bloqueos asociados a la longitud de cola. Por esta razón los resultados que entrega en casos donde se producen bloqueos son erróneos. Entonces se deben aplicar en forma externa técnicas de coordinación en reversa de tal forma de ir "despejando" la red y, si fuese necesario, aplicar restricciones de acceso a áreas con capacidad insuficiente para impedir que se produzcan bloqueos generalizados. Esas restricciones pueden implementarse en intersecciones aguas arriba que cuenten con mayor capacidad de almacenamiento de colas (arcos largos) de manera de contener en esos lugares el flujo y descargarlo en forma consistente con la capacidad de la red aguas abajo.

### 4.3.3 Efecto de la interferencia peatonal

Otro efecto no incorporado en la estimación del flujo de saturación es la interferencia de los peatones en los virajes de los vehículos. Para efectos de modelación y programación una forma de incorporar esta situación es mediante un retardo inicial ( $\lambda_1$ ) mayor, cuyo valor puede ser observado en terreno como parte del proceso de simulación de la Situación Actual. Esta corrección es aplicable cuando a juicio del modelador exista un significativo efecto del cruce de peatones en la capacidad del movimiento vehicular afectado.

## 4.4 Aspectos generales de la programación de semáforos

### 4.4.1 Variables de programación

La programación de un semáforo consiste en determinar la estructura, secuencia y duración de las indicaciones luminosas que se muestran a los distintos usuarios en la intersección.

La estructura de la programación se establece con la definición de los movimientos, entreverdes y diseño de fases. La secuencia se define a partir del orden en que se presentan las fases y la duración de cada una depende del nivel de demanda que tienen asociado. La duración de una fase es igual a la suma de los correspondientes tiempos de entreverde y verde.

El tiempo de entreverde es el período que va desde que termina el tiempo de verde para el movimiento que pierde el derecho de paso hasta el inicio del verde para el movimiento que gana derecho de paso. Está compuesto por un tiempo de amarillo y un período de rojo simultáneo o rojo-rojo que puede existir o no. El tiempo de verde o reparto de tiempo de verde corresponde a la duración que tiene la etapa de verde en una determinada fase y está acotado inferiormente por el tiempo de verde mínimo, que por lo general corresponde al lapso que requieren los peatones para cruzar la calzada correspondiente. Por su parte, el tiempo de ciclo representa la duración de una secuencia completa de fases y es igual a la suma de los tiempos de entreverde y verde de todas las fases del semáforo. En el caso de redes de semáforos se utiliza además el desfase, variable que fija el inicio de una fase en relación con el inicio de esa fase en otras intersecciones de la red.

Existen semáforos que operan con programaciones predeterminadas y otros que la ajustan en línea a lo largo del día según los niveles de demanda observados. La forma de definir la programación en estos dos casos es distinta, requiriéndose la especificación de diferentes variables en cada caso.

### 4.4.2 Tipos de control

El funcionamiento de un semáforo está determinado por las capacidades del equipo controlador correspondiente. Los controladores pueden agruparse en dos categorías: aquellos que funcionan con planes predeterminados y los que operan ajustándose a la condiciones de circulación, y que se denominan dinámicos.

Las características o capacidades del controlador determinan el funcionamiento del semáforo, por ejemplo, el número de planes de programación admisibles.

En el control con planes predeterminados es posible aplicar una metodología detallada para estimar la capacidad y optimizar la programación, pero que está basada en información de demanda histórica que no corresponde exactamente a la existente en cada momento. En ese caso existe, además, la posibilidad de activar ciertas fases solamente frente a la solicitud de los peatones o la presencia de vehículos en un determinado acceso. Cuando se utiliza control dinámico los métodos de optimización son simplificados y se aplican automáticamente, pero están basados en datos reales recogidos en línea con sensores especiales.

### 4.4.3 Contexto espacio-tiempo

#### 4.4.3.1 Periodización de semáforos aislados

La programación de un semáforo debe ser consistente con los niveles de flujo existentes en la intersección, pues los tiempos de verde quedan determinados por el peso relativo de los flujos de cada movimiento: aquellos con mayor flujo deben recibir más tiempo de verde. En la medida que los flujos cambian en magnitud o estructura es necesario ajustar la programación para lograr una operación adecuada de la intersección.

La variación de los flujos tiene dos orígenes. Por una parte existen efectos de aleatoriedad provocados porque los flujos corresponden a desplazamientos de personas cuyo comportamiento no se repite exactamente cada vez. Por esta razón el flujo en un mismo lugar a la misma hora no es exactamente el mismo en días comparables. La segunda causa de la variabilidad de los flujos ocurre a lo largo del día y se produce porque gran parte de las actividades que realizan los usuarios tienen horarios predeterminados que se repiten sistemáticamente durante gran parte de los días del año. Estos horarios inducen patrones temporales a los desplazamientos similares entre días comparables y que pueden ser muy marcados. Estas variaciones se denominan sistemáticas y son las que dan origen a la necesidad de periodizar. Se asume entonces que las variaciones sistemáticas se producen al interior de un día laboral y de los días de fin de semana. De esta forma, lo que se debe hacer es dividir una semana en períodos con condiciones de flujo homogéneas. Puede haber casos en que haya cambios estacionales marcados entre semanas, por ejemplo en balnearios, donde es necesario diferenciar semanas tipo para cada temporada relevante.

Si el semáforo opera aislado de otras intersecciones semaforizadas y con programaciones predeterminadas entonces se debe establecer una periodización de la semana tipo que permita identificar los lapsos de tiempo o períodos en los cuales los efectos de utilizar la misma programación son bajos, a pesar de la variación sistemática de los flujos. De otra forma se requeriría disponer de un número inmanejable de programaciones, que se ajustaría a cada cambio de la demanda. Así entonces, al generar una periodización existen tantos planes de programación como períodos se definan. El proceso de modelación, toma de datos y optimización de las programaciones se debe realizar para cada uno de los períodos que se definan con el método que se explica en la sección 4.7.1.2.

Si el semáforo opera en control dinámico entonces la periodización es útil para definir ciertos parámetros que acotan la programación que defina automáticamente el sistema de acuerdo con los niveles de flujo existentes.

#### 4.4.3.2 Conformación de redes de semáforos

Cuando existen intersecciones semaforizadas cercanas entre sí, su funcionamiento periódico produce regularidades en la circulación que se manifiestan en la formación de pelotones de vehículos, característica que puede ser aprovechada para disminuir significativamente las demoras y detenciones (en rigor, su componente uniforme, ver sección 4.6) mediante una programación adecuada de todas ellas. Sin embargo, para lograr ese beneficio, además de la proximidad de los semáforos, las intersecciones deben tener una periodización común y un tiempo de ciclo compatible (el mismo tiempo o la mitad de su valor).

Una red de semáforos coordinados es una región del espacio-tiempo con operación común. No obstante, es frecuente que se denomine "red" a una agrupación espacial y operacional de intersecciones semaforizadas, es decir, asumiendo que la definición de las redes es invariable entre períodos. Con esa simplificación se puede forzar a ciertas intersecciones a operar con un ciclo muy alejado de su valor óptimo, generándose costos sociales adicionales evitables mediante redes cuya definición varíe durante el día.

A partir de la definición rigurosa de una red de semáforos, Baeza *et al.* (1995)<sup>7</sup> generaron un método para realizar la conformación de redes en el espacio-tiempo. El método considera un proceso de tres etapas secuenciales: a) subdivisión espacial, b) periodización, y c) programación, las que según los autores permiten

---

<sup>7</sup> Baeza, I., Zucker, M., Villaseca, A., Albornoz, M., y Gibson, J. (1995) "Conformación de redes para la programación de semáforos". Actas del VII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago, Chile.

captar la interdependencia entre las variables espaciales, temporales y operacionales del problema global. Este método es el que se debe aplicar para la conformación de redes de semáforos y se describe en el Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

#### 4.4.4 Etapas de la programación

La programación de los semáforos debe realizarse siguiendo un conjunto de pasos que tienen como objetivo final establecer la estructura, secuencia y duración de las indicaciones a los usuarios, más adecuadas a las condiciones de circulación.

En el caso de semáforos con planes predefinidos, las etapas que se deben seguir son las siguientes:

- a) Toma de datos.
- b) Determinación de estructura de la programación.
- c) Conformación de redes o periodización para intersecciones aisladas.
- d) Modelación.
- e) Simulación de la Situación Actual y calibración.
- f) Optimización de la programación.
- g) Implementación y sintonía fina.

En el caso de semáforos con control dinámico las etapas son las siguientes:

- a) Toma de datos.
- b) Determinación de estructura de la programación: verdes mínimos y máximos.
- c) Definición de otros parámetros según tipo de control utilizado.
- d) Implementación y ajuste de parámetros.

#### 4.4.5 Programas computacionales recomendados

La obtención de la programación de un semáforo puede realizarse con métodos manuales solamente en casos sencillos en los cuales, por ejemplo, hay pocos virajes y una baja proporción de buses. En la mayor parte de los casos se presentan situaciones más complejas cuyo análisis requiere el uso de programas computacionales adecuados. En este manual se recomienda el uso de los siguientes programas computacionales, pero pueden utilizarse otros, siempre que cuenten con capacidades de análisis equivalentes y su uso haya sido autorizado por la UOCT.

- **SIDRA** o **SIDRA INTERSECTION** para analizar semáforos aislados. Este modelo estima capacidades, demoras, colas y detenciones; determina la programación óptima del semáforo o simula una programación dada. Trabaja a nivel de pista, acepta demanda variable, y utiliza sofisticados modelos de capacidad que incorporan fenómenos de bloqueo entre pistas y entre movimientos que comparten pista. Además hace un tratamiento explícito de las pistas cortas, admite verdes disjuntos e incluso combinación de movimientos con oposición y sin ella en distintas fases. Estima colas, demoras y detenciones por pista y con fórmulas estocásticas dependientes del tiempo, incorpora demora geométrica, admite análisis de secuencia de fases y reconoce la subutilización de ellas. Tiene una entrada de datos amigable y está altamente parametrizado, lo que permite incorporar parámetros ajustados a las condiciones locales. Los resultados que genera son muy detallados, lo cual facilita el análisis de la programación. Por último, incluye también la posibilidad de analizar el funcionamiento de rotondas, que en ciertos casos son una buena alternativa a la semaforización.
- **TRANSYT 8S** para redes de semáforos. Este modelo trabaja con histogramas cíclicos de flujo y con modelos de dispersión de tráfico, para así predecir el comportamiento de los flujos en redes semaforizadas. Estima demoras, colas y detenciones; determina la programación óptima de la red de semáforos o simula una programación dada. Trabaja en base a nodos y arcos que pueden compartir línea de detención; no incorpora fenómenos de bloqueo en áreas. El desarrollo de la versión 8S de TRANSYT fue patrocinado por la UOCT e incorpora un modelo de dispersión de pelotones corregido (Gibson y Wityk, 1988) y un algoritmo para selección de tiempo de ciclo en redes desarrollado por Gibson y Barrientos(1988). Se encuentra disponible sin costo en la UOCT.

- **Modelos de microsimulación de tránsito**, existen distintos modelos que simulan la circulación de los usuarios a nivel de cada usuario: conductor, peatón, ciclista, etc. Estos modelos, adecuadamente calibrados<sup>8</sup>, se pueden utilizar para el análisis de intersecciones complejas o redes densas y congestionadas donde se produzcan fenómenos que SIDRA o TRANSYT8S no pueden simular adecuadamente. Los modelos de microsimulación se aplicarán entonces como una herramienta complementaria para verificar y perfeccionar la programación definida con SIDRA o TRANSYT 8S.

## 4.5 Diseño básico de un Plan

### 4.5.1 Introducción

El diseño básico de la programación o diseño operativo corresponde a la definición de la estructura y secuencia de las fases de un semáforo. La estructura tiene relación con la definición de los movimientos y la duración de entreverdes y verdes mínimos. La secuencia corresponde al orden en que se despliegan las fases en el semáforo.

El diseño operativo debe buscar maximizar la seguridad de tránsito y lograr un funcionamiento eficiente desde el punto de vista de las demoras, detenciones u otros indicadores.

En el diseño y secuencia de fases es necesario aprovechar la flexibilidad que ofrecen los controladores electrónicos modernos, haciendo uso intensivo del traslapo de movimientos y retardos o adelantos en el inicio de cada fase. Los movimientos peatonales, aunque no se cuente con información de sus flujos, siempre deben ser incorporados en el diseño de fases y verdes mínimos. La importancia de la secuencia de fases radica en que se debe elegir aquella para la cual los entreverdes y, por lo tanto, los tiempos perdidos, sean mínimos.

Es evidente entonces que la identificación de los movimientos es un proceso clave en la programación de los semáforos, este aspecto se trata a continuación.

### 4.5.2 Movimientos

En el contexto de la programación de los semáforos un movimiento está asociado a una cola de vehículos con una dirección, uso de pistas y derecho de paso característicos. La dirección del movimiento se refiere al destino de los vehículos una vez que salen de la intersección. Aparte de la dirección, el uso de pistas es la base para identificar movimientos, de tal forma que:

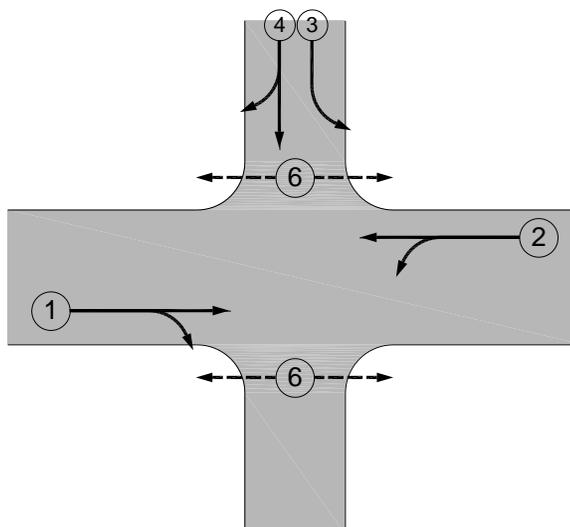
- Toda corriente que utiliza pistas exclusivas se considera como un solo movimiento.
- En pistas sistemáticamente subutilizadas (contiguas a paradas de buses, por ejemplo) el flujo por ellas se considera un movimiento separado.
- Si diversas corrientes usan una o más pistas de forma compartida, ellas conforman un solo movimiento.
- Los flujos peatonales o de ciclistas siempre deben ser considerados como movimientos, pero sin distinguir el sentido de avance de las personas.

---

<sup>8</sup> La calibración del modelo de microsimulación es un requisito ineludible para obtener resultados confiables. Como referencia en esta materia se puede utilizar el documento "Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software", FHWA-HRT-04-040, disponible en internet.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de identificación de movimientos.

**Figura 4-8 Ejemplo de definición de movimientos**



En el cálculo de los tiempos de un semáforo es importante otorgar a cada movimiento el tiempo suficiente como para que, en promedio, toda la demanda de ese movimiento pueda pasar en cada ciclo o equivalentemente que las colas excedentes sean mínimas.

En cada intersección hay ciertos movimientos que requieren mayor tiempo en las fases correspondientes. Estos movimientos se denominan críticos o representativos. Si cada movimiento crítico recibe suficiente tiempo de verde efectivo entonces todos los movimientos tienen suficiente capacidad y la intersección no estará saturada.

### 4.5.3 Fases

#### 4.5.3.1 Aspectos generales

El derecho de paso o uso de la vía está determinado por el diseño de fases del semáforo. Una fase es un estado del semáforo en el cual uno o más movimientos reciben derecho de paso. Las fases se definen de manera tal que cuando hay cambio en el derecho de paso hay un cambio de fase (un movimiento se detiene y otro(s) inicia(n) la marcha). Una fase se identifica por dar derecho de paso, al menos a un movimiento, al principio de ella y el quitar derecho de paso, al menos a un movimiento, al final de ésta.

El objetivo del diseño de fases es dar paso a todos los movimientos a lo largo del ciclo, eliminando o minimizando los conflictos entre ellos y utilizando al máximo la capacidad de la intersección. Conceptualmente cada movimiento vehicular o peatonal puede estar asociado a una fase exclusiva del semáforo, pero esto no es eficiente ya que ciertos movimientos no tienen conflictos entre sí o pueden resolverse adecuadamente mediante una regla de prioridad (virajes con oposición).

La definición de las fases no es independiente del uso de pistas definido y, por lo tanto, primero debe revisarse si la disposición del uso de pistas es adecuada a la magnitud y tipos de movimientos existentes antes de comparar diseños de fases alternativos.

En este manual se hace uso del enfoque de control de grupos de movimientos debido a que permite soluciones más flexibles y eficientes que el enfoque basado en el control de fases. El objetivo es maximizar el número de movimientos traslapados incluso a costa de aumentar el número de fases, de esta manera se minimiza el tiempo total requerido por los movimientos críticos. En el enfoque de control de fases el objetivo es minimizar el número de fases para así disminuir el tiempo total perdido.

Como un movimiento puede tener derecho de paso en más de una fase o en una fase puede tener derecho de paso más de un movimiento, surgen dos tipos de movimientos:

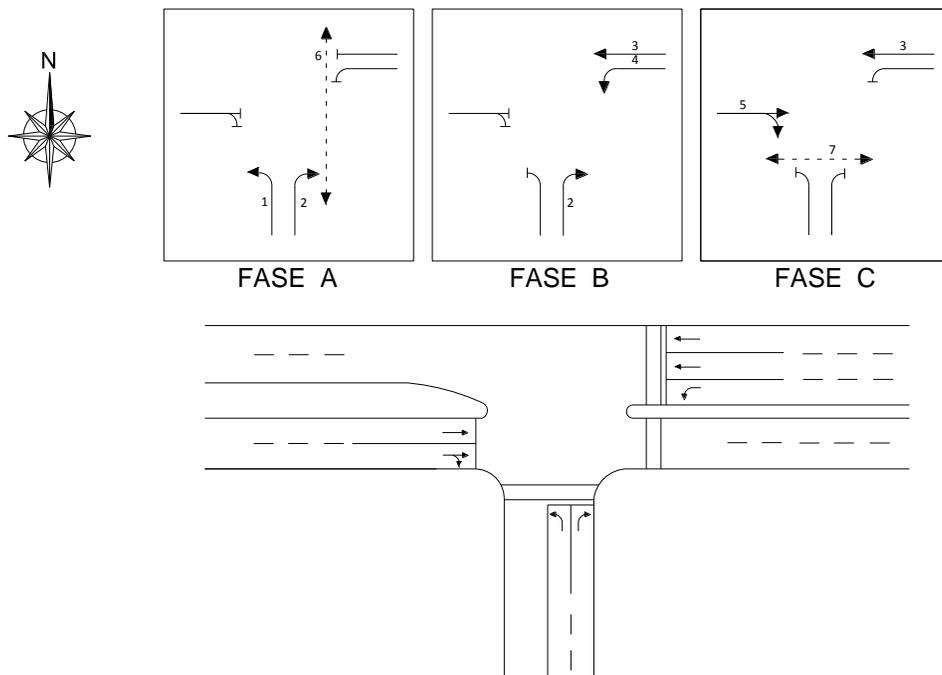
- **Movimiento crítico:** es el que, de todos los que tienen derecho de paso en una fase, requiere de más tiempo de verde, debido a la extensión de la cola formada durante el rojo.
- **Movimiento traslapado:** es un movimiento que dispone de verde en fases consecutivas. Luego, el tiempo de enterverde correspondiente a dichas fases no representa una pérdida para el movimiento traslapado.

Por convención el (los) acceso(s) que tienen orientación norte-sur se asocia(n) a la primera fase del semáforo (Fase A).

Un ejemplo de definición de fases se puede ver en la Figura 4-9, en la cual se muestra una intersección operando en tres fases, las que se identifican con las letras A, B y C. Se definen en ella cinco movimientos vehiculares, identificados con los números 1 a 5, y dos movimientos peatonales (que no distinguen sentido de circulación), identificados como 6 y 7 y que se muestran con línea punteada.

En el ejemplo, dos de las pistas provenientes del oriente han sido agrupadas en el movimiento 3 y las dos pistas provenientes del poniente en el movimiento 5.

**Figura 4-9 Ejemplo de definición de fases**



La configuración de fases del semáforo puede describirse a través de una matriz de movimientos y fases. En esa matriz para cada movimiento se identifica la fase en la que se inicia su derecho de paso y la fase en la que termina. Para el ejemplo anterior la matriz de movimientos y fases se presenta en el cuadro siguiente.

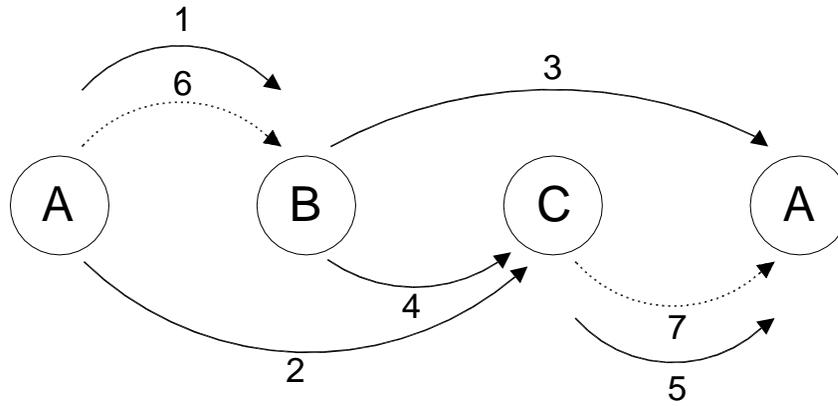
**Cuadro 4-5 Matriz de movimientos y fases**

Movimiento	Fase de inicio	Fase de término
1	A	B
2	A	C
3	B	A
4	B	C
5	C	A
6	A	B
7	C	A

Los movimientos 2 y 3 son traslapados pues tienen verde durante dos fases consecutivas: A-B y B-C, respectivamente.

El diseño de fases suele representarse también en un grafo como el que se muestra en la Figura 4-10, en donde las fases se representan por nodos (dispuestos de izquierda a derecha) y los movimientos por arcos que unen los nodos (fases) de inicio y término correspondientes. Los arcos con línea punteada representan movimientos peatonales.

Figura 4-10 Grafo para representar el diseño de fases



Este grafo es de utilidad para identificar los movimientos críticos, que son los que determinan el tiempo de ciclo y los repartos en el semáforo.

El diseño de un sistema de fases depende de la configuración geométrica de la intersección (el número de calzadas y uso de pistas) y la cantidad de virajes, en especial a la izquierda. Esto es fundamental pues implica que los diseños geométrico y operativo deben estudiarse simultáneamente.

El objetivo del diseño de fases es minimizar los accidentes (mediante la reducción de conflictos entre movimientos), y maximizar la eficiencia operativa de la intersección reduciendo demoras, colas y detenciones. De esta manera, el diseño de fases dependerá de:

- número de pistas disponibles para los movimientos en cada acceso y salida de la intersección;
- magnitud de los flujos vehiculares según movimiento;
- manejo de peatones en la intersección, incluyendo la necesidad de fases especiales para ellos;
- alineamiento horizontal y vertical, los cuales determinan el ángulo de la intersección y la distancia de visibilidad disponible, principalmente para los virajes a la izquierda;
- necesidad de mantener coordinación con intersecciones cercanas que imponga restricciones al diseño de las fases para lograr una adecuada progresión del tráfico; y
- consideraciones especiales para cierto tipo de vehículos, tales como buses, vehículos de emergencia, etc.

En función de estos aspectos y su experiencia, el especialista debe establecer el diseño de fases más adecuado en cada intersección.

#### 4.5.3.2 Tratamiento de los virajes

Un aspecto importante del diseño de fases es el tratamiento de los virajes, ya sean con oposición (vehicular o peatonal) o libres.

Las fases que permiten virajes con oposición resuelven los problemas mediante reglas de prioridad, por ejemplo, el vehículo que vira a la izquierda debe ceder el paso al vehículo que proviene de la calzada opuesta. No obstante lo anterior, si el flujo que vira a la izquierda es significativo y las brechas o intervalos para cruzar no son suficientes, se requiere analizar la factibilidad de implementar una fase especial de viraje a la izquierda o bien prohibirlo y re-rutear dicho movimiento hacia otras intersecciones con capacidad disponible.

Permitir virajes con oposición en una fase es una solución eficiente si se utiliza cuando los requerimientos básicos de capacidad se satisfacen. Esto ocurre cuando hay suficientes brechas en el flujo opositor como para permitir los virajes y hay suficiente espacio para albergar a la cola de vehículos que desean virar mientras esperan para aprovechar estos intervalos. Al mismo tiempo se requiere que se cumplan algunos requisitos de seguridad básica, como que exista buena visibilidad, distancia de entrecruzamiento aceptable (generalmente no cruzar más de dos pistas), y velocidades razonables. Si estas condiciones no se cumplen es necesario permitir sólo virajes libres y controlar los virajes problemáticos mediante fases especiales, o como se mencionó previamente, prohibir esos virajes en la intersección analizada.

En algunos casos un movimiento de viraje puede hacer uso de dos fases, una en que el viraje no está obstaculizado y otra en que sí lo está. Esto puede lograrse en la práctica de dos maneras, sin embargo, sólo es factible en el caso que el diseño de la intersección y/o las capacidades de los accesos con movimientos de

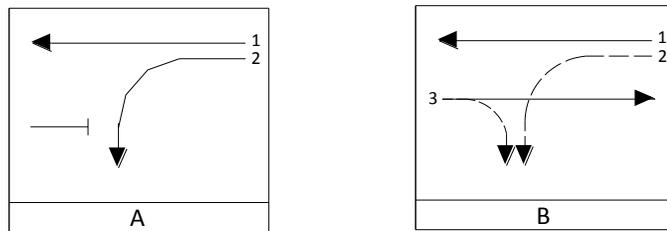
viraje presenten más de una pista (mínimo dos pistas compartidas o al menos una pista normal junto a una pista exclusiva de viraje a la izquierda).

- En el primer caso (viraje adelantado) se da derecho de paso a los vehículos que viran antes que al movimiento que los obstaculiza. Esta modalidad de viraje se aplica retardando el inicio de fase del movimiento opositor.
- La segunda opción (viraje retrasado) consiste en permitir el viraje junto con el movimiento opositor, de manera que el viraje se realice con oposición desde el inicio de fase, y al final de la fase se permite el viraje sin oposición deteniendo al movimiento opositor. En este caso la operación no es tan eficiente, pues si el volumen del viraje es alto se podrían generar colas en la pista de viraje que entorpezcan la circulación en la pista adyacente.

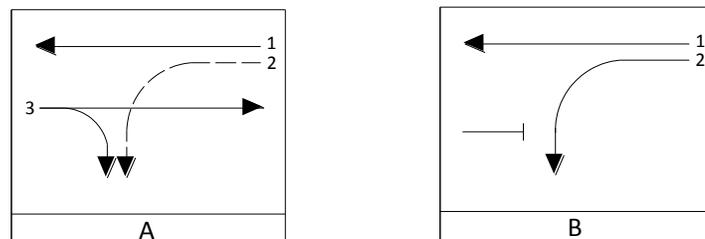
Ambos casos se presentan en la figura siguiente.

**Figura 4-11 Tipos de viraje con oposición**

Viraje adelantado



Viraje retrasado



Estas dos modalidades tienen ventajas y desventajas que deben ser analizadas con cuidado, ya que en lugar de generar beneficios pueden perjudicar la operación de la intersección. El volumen de los movimientos involucrados y la capacidad de los accesos son los principales aspectos a considerar.

En ningún caso este esquema de fases es aplicable en intersecciones con sólo una pista en el acceso desde donde se realiza el viraje. Si la intersección tiene poca capacidad y los volúmenes de flujo de los virajes son muy altos, lo más recomendable es separar las fases por acceso, sin embargo, ese esquema conlleva un aumento de las fases y un deterioro en el nivel de servicio de la intersección, ya que aumentan los tiempos perdidos y las demoras.

Por otra parte, existen ciertos aspectos que deben ser considerados a la hora de definir o modificar el esquema operativo de una intersección semaforizada, en particular, si el grado de saturación es superior o cercano al grado de saturación práctico. Al respecto, los casos que ameritan ser analizados son los que se describen a continuación.

#### 4.5.3.2.1 Prohibición de virajes a la izquierda y necesidad de rutas alternativas

En general son los virajes a la izquierda con volúmenes de flujo importantes los que generan mayores conflictos en la definición del esquema de fases óptimo, ya que en gran parte de los casos requieren fases especiales. El aumento de fases en una intersección saturada genera trastornos en las condiciones de operación de la intersección y/o en la red en la cual se encuentra inserta. Por lo tanto, previo a la redefinición o aumento de fases se debe analizar la factibilidad de reorientar o reasignar el movimiento de viraje izquierda.

Para ello, es necesario estudiar la red vial y determinar si el re-ruteo resulta conveniente o no, mediante la evaluación de los escenarios de reasignación de flujos, idealmente utilizando los modelos de tránsito adecuados.

En ciertos casos el aumento de fases puede requerir modificaciones de hardware en los controladores para incorporar esas fases de viraje, además de cambios en los cabezales.

#### 4.5.3.2.2 Virajes a la izquierda en corredores segregados

En la implementación de corredores segregados centrales para transporte público puede ser necesario eliminar fases de viraje a la izquierda existentes para mejorar las condiciones operativas del corredor. Al omitir los virajes izquierda se reduce el número de fases y, por consiguiente, se puede asignar mayor tiempo de verde al corredor o bien disminuir el tiempo de ciclo.

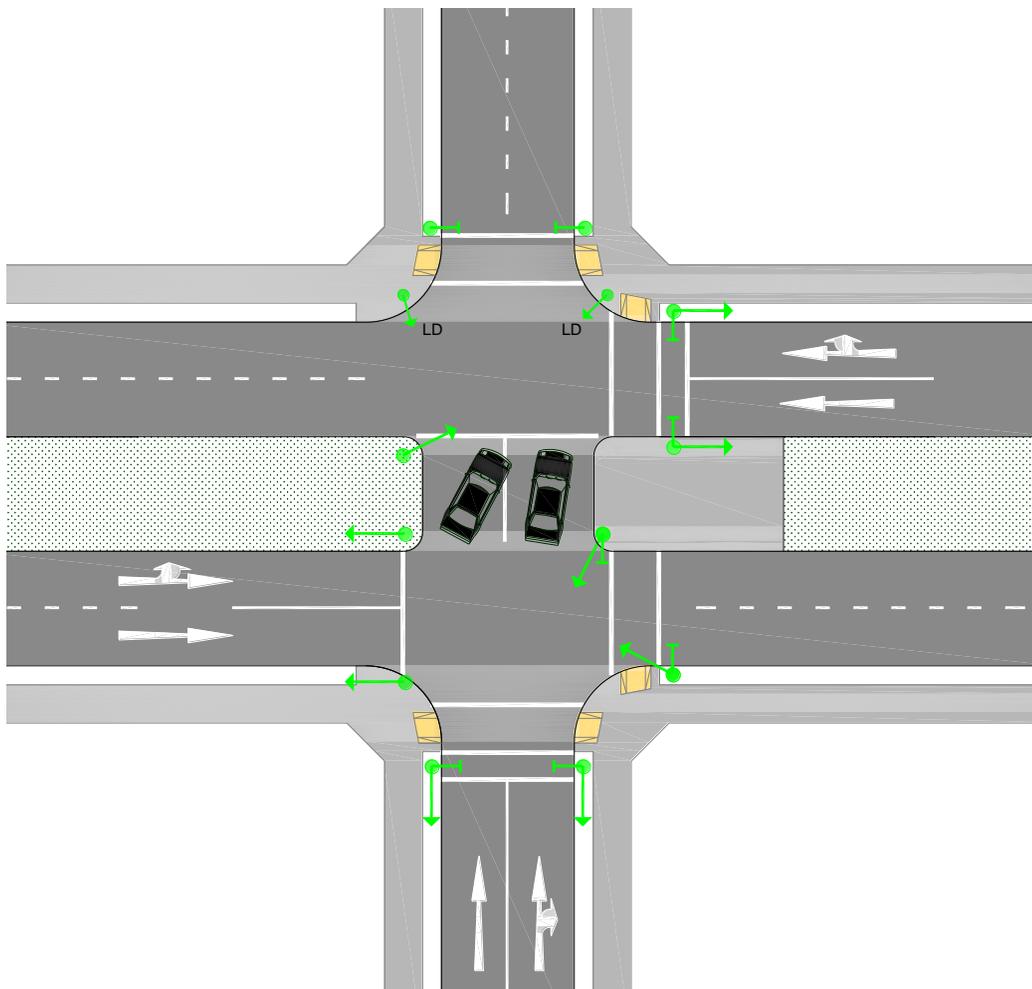
En el caso de que se permitan los virajes izquierda en un corredor segregado central, estos en general se permiten desde las vías de transporte privado. En consecuencia, las intersecciones semaforizadas de los corredores deben contemplar un número significativo de etapas<sup>9</sup> vehiculares y peatonales por fase, además de incorporar lámparas que identifiquen claramente los movimientos que son permitidos en cada fase, distinguiendo los derechos de paso de los flujos de buses y del resto de los vehículos. Tanto el diseño operativo como el proyecto de ubicación de postes y tipo de lámparas de semáforo deben ser cuidadosamente analizados, de modo que se minimicen las situaciones de riesgo de entrecruzamientos de los flujos del corredor y los de transporte privado.

#### 4.5.3.2.3 Virajes a la izquierda en intersección con arcos cortos

En el diseño operativo de una intersección con arcos cortos y uno o más virajes a la izquierda con volúmenes significativos es recomendable analizar la factibilidad de re-rutear dichos movimientos, ya que en caso contrario se generarán colas que podrían bloquear al flujo directo de las pistas adyacentes.

En caso que sea necesario permitir los virajes a la izquierda no es recomendable utilizar lámparas comunes para señalar la fase especial de viraje, pues podría generarse una situación confusa para los usuarios que esperan en la línea de detención de la vía transversal. Es por ello que para este tipo de situaciones se han utilizado lámparas direccionales. Estas lámparas se deben ubicar siempre en postes vehiculares simples secundarios. Por ejemplo, si existe un desfase en la misma vía y ésta posee una mediana angosta, la lámpara direccional permite la evacuación de la mediana, con menos confusión para los conductores que se encuentran en la misma vía pero más atrás, tal como se indica en la figura siguiente.

**Figura 4-12 Ubicación de lámparas direccionales (LD)**



<sup>9</sup> En ese contexto una etapa es un grupo de movimientos controlados por una cierta indicación del semáforo. Generalmente se tendrán más etapas que fases en un semáforo. Al definir más etapas se tiene una mayor flexibilidad para entregar derecho de paso a los distintos usuarios.

Generalmente el cabezal de la lámpara direccional muestra luz verde unos segundos antes para permitir la evacuación de la mediana, asignándole una etapa independiente en la programación del controlador. Este esquema operativo genera confusión entre algunos usuarios que asumen que las lámparas direccionales están defectuosas al apreciar la luz que despliegan solamente desde ciertos ángulos de visión. Por lo anterior, el uso de este tipo de lámparas debe estudiarse cuidadosamente.

#### 4.5.4 Entreverdes

El tiempo de entreverde es el período que va desde que termina el tiempo de verde para el movimiento que pierde el derecho de paso hasta el inicio del verde para el movimiento que gana derecho de paso. Está compuesto por un tiempo de amarillo y un período de rojo simultáneo o rojo-rojo que puede existir o no.

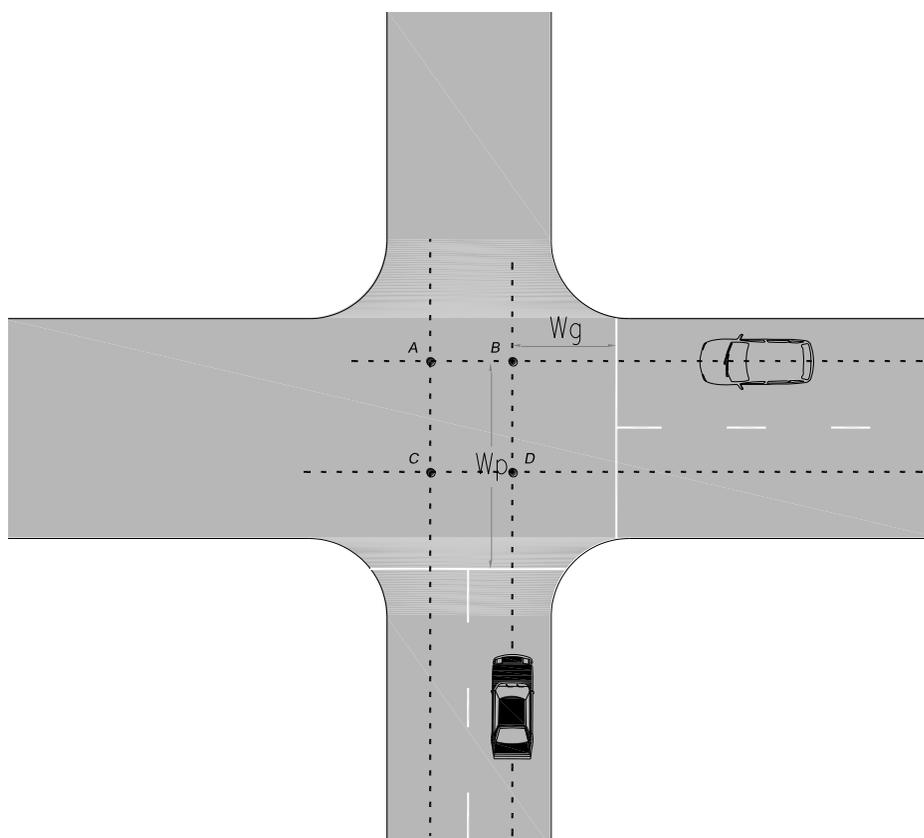
Los conductores que enfrenten la luz amarilla deben detenerse antes de entrar al cruce, pues les advierte que el color rojo aparecerá a continuación. Si la luz amarilla los sorprende tan próximos al cruce que ya no puedan detenerse con suficiente seguridad, deben continuar con precaución.

Según esta definición el objetivo del período de amarillo es evitar detenciones bruscas cuando se inicia el período de rojo y así minimizar colisiones por alcance. En estricto rigor el tiempo de amarillo depende de la velocidad de aproximación de los vehículos, el tiempo de reacción de los conductores y otras variables, pero el uso de períodos largos de amarillo induce a que los conductores, que conocen ese hecho, se confíen y lo consideren como si fuera tiempo de verde.

Debido a lo anterior, en los equipos semafóricos utilizados en Chile, y que cumplen las especificaciones técnicas de la UOCT, el período de amarillo dura siempre 3 segundos. En la medida que se requiera un tiempo mayor producto de una velocidad de aproximación más alta u otra razón puede utilizarse adicionalmente el período de rojo-rojo.

La existencia de un período de rojo-rojo depende de la necesidad de un tiempo adicional para que los vehículos que crucen la línea de detención al final del amarillo puedan desalojar con seguridad la intersección. Para determinar su duración se deben establecer las distancias de conflicto en su caso más desfavorable, como lo muestra la siguiente figura.

Figura 4-13 Definición de la distancia de conflicto



Se trata entonces de que el vehículo que pierde derecho de paso esté, al terminar el período de entreverde, más allá del punto de conflicto más crítico. En general siempre existen varios puntos de conflicto al considerar las trayectorias de los distintos movimientos permitidos en cada pista de la intersección. En la Figura 4-13 se muestran cuatro, denominados A, B, C y D. El punto más crítico (en el ejemplo, el punto B) es aquel en que se maximiza la diferencia entre el tiempo que le toma llegar a él a un vehículo del movimiento  $i$  que pierde derecho de paso y a uno que gana derecho de paso. Esa diferencia corresponde al tiempo de rojo-rojo para el movimiento  $i$ . Luego:

$$RR_i = T_{p,i} - T_{g,i} \quad (4-14)$$

con

$$T_{p,i} = \frac{w_{p,i} + L_{v,i}}{v_{p,i}}$$

$$T_{g,i} = \frac{w_{g,i}}{v_{g,i}}$$

donde

- $RR_i$ : período de rojo-rojo para el movimiento  $i$ , redondeado al entero superior (s)
- $w_{p,i}$ : distancia entre la línea de detención y el punto de conflicto más crítico para los vehículos del movimiento  $i$  que pierde derecho a paso (m)
- $v_{p,i}$ : velocidad promedio de los vehículos del movimiento  $i$  que pierden derecho a paso (m/s)
- $w_{g,i}$ : distancia entre la línea de detención y el punto de conflicto más crítico para los vehículos que ganan derecho a paso (m) una vez que lo pierde el movimiento  $i$
- $v_{g,i}$ : velocidad promedio de los vehículos que ganan derecho a paso (m/s) una vez que lo pierde el movimiento  $i$ . Se puede considerar como aproximación la mitad de la velocidad en el arco correspondiente
- $L_{v,i}$ : longitud promedio de los vehículos en el movimiento  $i$  (s)

En la expresión anterior es necesario considerar que para fines de programación del semáforo, el valor del tiempo de rojo-rojo debe ser único para la intersección y, por lo mismo, se debe utilizar el valor de  $RR$  más alto entre todos los movimientos existentes. En intersecciones con 1 o 2 pistas por acceso el tiempo de rojo-rojo calculado y redondeado al entero superior puede resultar menor a 1 segundo ( $RR < 0,5 \text{ s}$ ) caso en el que resulta  $RR = 0$ .

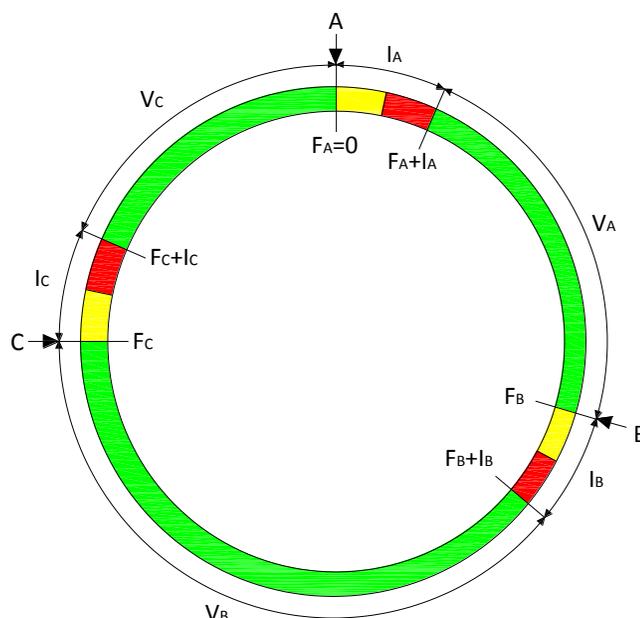
En consecuencia, el período de entreverde ( $I_i$ ) para cualquier movimiento  $i$  es igual a:

$$I_i = AM_i + \max_i(RR_i) = 3 + \max_i(RR_i) \quad (4-15)$$

Los valores típicos del tiempo de entreverde varían entre 3 y 5 segundos, aunque puede ser necesario utilizar valores más altos en intersecciones de gran tamaño que no dispongan de mediana o bandejón con ancho suficiente para almacenar vehículos.

La siguiente figura muestra una representación cíclica de las fases y tiempos del semáforo para el ejemplo que aparece en la Figura 4-9.

**Figura 4-14 Representación cíclica de tiempos del semáforo**



Finalmente, de acuerdo con el modelo binario de descarga descrito en la sección 4.3.1, el tiempo perdido ( $l_i$ ) o tiempo durante el cual el movimiento  $i$  no circula en la fase en la que tiene derecho de paso está dado por:

$$l_i = I_i + \lambda_{1i} - \lambda_{2i} \quad (4-16)$$

donde:

- $\lambda_{1i}$  = pérdida inicial para el movimiento  $i$
- $\lambda_{2i}$  = ganancia final o ganancia de amarillo para el movimiento  $i$

Los valores recomendados para estos dos parámetros se presentan en Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

#### 4.5.5 Restricciones de la programación

La optimización de la programación de un semáforo debe considerar un conjunto de restricciones que tienen por objetivo generar condiciones mínimas de seguridad a los usuarios y limitar la magnitud de las demoras. Las condiciones de seguridad se establecen imponiendo valores mínimos de los tiempos de verde, de modo que los usuarios dispongan de un tiempo razonable para cruzar la intersección. El control de las demoras se realiza imponiendo niveles máximos admisibles de saturación y acotando superiormente el tiempo de ciclo. A continuación se detallan estas restricciones.

##### 4.5.5.1 Verdes mínimos

El período de verde de un movimiento debe acotarse inferiormente para que exista un lapso mínimo razonable para el cruce de vehículos y/o peatones. Para los vehículos el tiempo mínimo de verde es 8 segundos y para los peatones la suma entre el tiempo promedio de cruce de la calzada y un margen de seguridad de 5 segundos. Los valores anteriores son válidos también cuando se tienen fases vehiculares o peatonales exclusivas, según corresponda.

Considerando que por lo general en una fase se tiene el paso simultáneo de vehículos y peatones en sentido paralelo a los vehículos, es necesario considerar para esos casos el máximo entre ambos tiempos de verde mínimo, es decir,

$$Vmin_i = \max \left\{ 8 ; 5 + \frac{w_i}{v_c} \right\} \quad (4-17)$$

donde

- $Vmin_i$ : verde mínimo del movimiento vehicular  $i$  (s) para una fase vehicular conjunta con una fase peatonal.
- $w_i$ : ancho de calzada que cruzan los peatones cuando el movimiento vehicular  $i$  tiene derecho de paso (m).
- $v_c$ : velocidad promedio de caminata de los peatones. Depende de las características de las personas, principalmente su edad y las eventuales limitaciones de movilidad que presenten. Si no se dispone de información adicional, los valores que deben utilizarse son los que se indican a continuación.

**Cuadro 4-6 Velocidad promedio de caminata para el cálculo del verde mínimo**

Tipo de peatones	Velocidad caminata (m/s)
Población en general: principalmente adultos y jóvenes	1,1
Adultos mayores, niños, personas con movilidad reducida	0,9

Si existe una isla peatonal, una mediana o un bandejón que permita a los peatones cruzar en dos etapas entonces  $w_i$  puede corresponder solamente a la calzada más ancha. Esto siempre que exista suficiente espacio para que los peatones se acumulen y esperen el momento en que puedan cruzar la segunda calzada en condiciones adecuadas de seguridad.

#### 4.5.5.2 Grado de saturación práctico

La programación de un semáforo debe evitar que alguno de los movimientos resulte con un grado de saturación elevado pues en esa situación aumentos leves del flujo producen condiciones de sobresaturación que incrementan significativamente la demora y la longitud de cola de ese movimiento.

En función de lo anterior, se requiere utilizar una cota superior del grado de saturación, denominada grado de saturación práctico ( $x_p$ ). Su valor normal es 0,9 pero puede variarse en el rango [0,85; 0,95] dependiendo de la magnitud del flujo y la capacidad de almacenaje del movimiento. Los valores superiores son aplicables solamente a movimientos de bajo flujo y que no presenten riesgos de bloquear a otros movimientos.

#### 4.5.5.3 Tiempo de ciclo mínimo y máximo

El valor mínimo del tiempo de ciclo surge cuando todos los movimientos requieren el tiempo mínimo de verde definido en la sección 4.5.5.1. Teniendo en cuenta que en ese caso puede resultar un valor muy bajo, por convención se debe adoptar 40 segundos como valor mínimo del tiempo de ciclo. Por el contrario, el valor máximo que puede utilizarse es 120 segundos para así evitar demoras excesivas a los usuarios generadas por tiempos de rojo muy extensos.

Si aún con el ciclo máximo existen problemas de saturación ( $x_i > x_{p_i}$ ), se pueden considerar las siguientes alternativas para resolver la situación de sobresaturación:

- cambiar el diseño de fases para asignar mayor tiempo de verde a los movimientos que están saturados;
- disminuir el flujo vehicular mediante prohibición de algunos virajes y su correspondiente resignación a otra ruta; o
- aumentar el flujo de saturación de los movimientos críticos mediante rediseños geométricos y/o aumentos del número de pistas disponibles para esos movimientos.

En casos excepcionales la UOCT puede autorizar el uso de tiempos de ciclo superiores a 120 segundos.

## 4.6 Indicadores de rendimiento

### 4.6.1 Generalidades

Para optimizar la programación de los semáforos se deben considerar los impactos que ella tiene en un conjunto de variables que dan cuenta del funcionamiento de las intersecciones, ya sean aisladas o en red. Se dirá que una programación es óptima si genera, por ejemplo, el menor consumo de tiempo de los usuarios, sujeta a un conjunto de condicionantes asociadas a la seguridad en la circulación de todos ellos.

Las variables a considerar en la optimización son las demoras, detenciones, longitudes de cola y capacidad de reserva. Para incorporar simultáneamente el impacto de la programación en un conjunto de estas variables se utiliza un indicador de rendimiento agregado, que corresponde a una suma ponderada de todas o algunas de ellas.

En intersecciones aisladas la estimación de las variables mencionadas puede realizarse mediante métodos analíticos pues se asume que las llegadas de vehículos se producen aleatoriamente pero con tasa media constante (sigue un proceso de Poisson). En intersecciones en las que el patrón de llegadas está influenciado por intersecciones semaforizadas cercanas se requiere además el uso de técnicas de simulación que tengan en cuenta la existencia de pelotones de vehículos que se desplazan por las vías.

A continuación se describen los métodos de estimación de las variables de interés y la determinación del indicador de rendimiento.

### 4.6.2 Longitud de cola

La longitud de cola tiene importancia desde el punto de vista del diseño físico y de la validación de los modelos. En el primer caso es útil para determinar, por ejemplo, la longitud necesaria de las pistas de viraje, y en el segundo caso, como un indicador de la capacidad del modelo de tránsito construido para reproducir las condiciones observadas de circulación.

Las colas de vehículos que se producen en una intersección semaforizada son de dos tipos:

- Cíclicas, generadas por alternancia de períodos de verde y rojo. Se denominan colas uniformes y evolucionan dentro de cada ciclo; y
- Tendenciales y aleatorias, que son dependientes del grado de saturación de la pista. Se denominan colas excedentes y evolucionan a lo largo del período de análisis.

La longitud de cola permite predecir la existencia o no de fenómenos de bloqueo, característicos de sectores urbanos congestionados. Bajo esta perspectiva interesa la extensión máxima de la cola.

Para una intersección aislada la longitud promedio ( $N_i$ ) y la extensión máxima de la cola ( $N_{m,i}$ ) en un ciclo para el movimiento  $i$  está dada por la suma de una componente uniforme y una excedente, como se muestra a continuación:

$$N_i = \underbrace{q_i r e_i}_{\text{uniforme}} + \underbrace{N_{o,i}}_{\text{excedente}} \quad (\text{veh}) \quad (4-18)$$

$$N_{m,i} = \frac{q_i r e_i}{1 - y_i} + N_{o,i} \quad (\text{veh}) \quad (4-19)$$

donde:

- $q_i$ : flujo del movimiento  $i$  (veh/s)
- $r e_i$ : rojo efectivo para movimiento  $i$  (s),  $r e_i = c - v e_i$
- $y_i$ : razón de flujo del movimiento  $i$ ,  $y_i = q_i / s_i$
- $N_{o,i}$ : longitud de cola excedente para el movimiento  $i$  (veh), dada por

$$N_{o,i} = \begin{cases} \frac{Q_i T}{4} \left[ (x_i - 1) + \sqrt{(x_i - 1)^2 + \frac{8k(x_i - x_0)}{Q_i T}} \right] & \text{si } x_i \geq x_0 \\ 0 & \text{si } x_i < x_0 \end{cases} \quad (4-20)$$

donde  $Q_i = s_i v e_i$  es la capacidad del movimiento  $i$ ,  $T$  la duración del período de análisis (una hora típicamente) y  $x_i = q_i / Q_i$  el grado de saturación del movimiento. Los valores de los parámetros  $x_0$  y  $k$  son dependientes del movimiento y se indican a continuación.

$$x_0 = 0,67 + \frac{s_i v e_i}{600} \quad (4-21)$$

$$k = 3/2$$

La expresión para  $N_{o,i}$  (Fernández, R., "Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular", 2008) es válida si se supone la formación de una cola vertical en la línea de detención, pero la cola real (horizontal) formada por estos vehículos hace que otros se incorporen a ella antes de llegar a la línea de detención. Se puede demostrar que el número real de vehículos en una cola horizontal ( $\tilde{N}_{o,i}$ ) está dado por:

$$\tilde{N}_{o,i} \approx 1,1 N_{o,i} \quad (4-22)$$

Teniendo en cuenta que  $N_{m,i}$  representa un valor promedio (y por lo tanto superado el 50% de las veces) es conveniente dimensionar las pistas exclusivas de viraje a partir de un largo crítico de cola ( $N_{c,i}$ ) del movimiento  $i$ , que se estime de modo que su valor se supere en una proporción baja de los ciclos. Esa longitud se estimará como el doble de la extensión máxima de cola, es decir,

$$N_{c,i} = 2N_{m,i} = 2 \left( \frac{q_i r e_i}{1 - y_i} + 1,1 N_{o,i} \right) \quad (4-23)$$

En consecuencia, la longitud de la pista requerida para almacenar la cola de vehículos ( $\tilde{l}_{c,i}$ ) está dada por

$$\tilde{l}_{c,i} = \frac{j N_{c,i}}{n} \quad (4-24)$$

donde  $j$  es el espacio promedio ocupado por un vehículo en la cola y  $n$  es el número de pistas utilizadas para almacenar los vehículos de la cola estimada.

En intersecciones que presentan patrones de llegadas no aleatorios, influenciados por la presencia de intersecciones semaforizadas cercanas, la componente uniforme de la longitud de cola, demoras y detenciones debe ser estimada mediante una técnica de simulación, pues las expresiones anteriores asumen que la llegada de los vehículos se produce a tasa media constante dentro del ciclo.

En efecto, la cercanía entre intersecciones hace que la llegada de los vehículos se produzca en pelotones y, en consecuencia, la magnitud de la cola no es independiente de los instantes en que llega el pelotón de vehículos y el instante de inicio del tiempo de verde (o rojo). Para abordar ese fenómeno el programa TRANSYT realiza simulaciones de la operación de la red mediante histogramas cíclicos, en los que el flujo vehicular se asocia a unidades temporales de pocos segundos. Con estos histogramas se simula la progresión de los pelotones de vehículos que salen de las intersecciones y cómo se dispersan a lo largo de las vías producto de la diferencia de velocidades entre ellos. Así por ejemplo se puede establecer que determinados vehículos al llegar a una intersección deben detenerse producto de que el semáforo se encuentra en rojo, mientras que otros pueden continuar sin detenerse porque hay luz verde y no hay vehículos detenidos delante. Un enfoque similar pero más detallado es el que se utiliza en un microsimulador, pero en ese caso se estima la trayectoria de cada vehículo, cómo interactúa con los otros vehículos (o peatones) y cómo ese vehículo es afectado por la regulación de las intersecciones.

### 4.6.3 Demoras

La demora corresponde al tiempo de viaje adicional que la regulación de una intersección impone a los usuarios en comparación con la situación en que el usuario dispone de preferencia de paso por ella.

Es posible distinguir dos maneras de expresar la demora. La primera corresponde a la tasa media de demora ( $D$ ) y la segunda a la demora media por vehículo ( $d$ ). La tasa media de demora corresponde a la demora total en que incurren los usuarios por unidad de tiempo durante un cierto período; la demora media es el tiempo adicional que en promedio cada usuario (vehículo) experimenta en un período.

Para un movimiento  $i$  en una intersección aislada se tienen las siguientes expresiones para estas dos variables (Fernández, R., "Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular", 2008), en las que, al igual que para la longitud de cola, se distinguen las componentes uniforme y excedente:

$$D_i = \underbrace{\frac{q_i c (1 - \mu_i)^2}{2(1 - y_i)}}_{\text{uniforme}} + \underbrace{N_{o,i} x_i}_{\text{excedente}} \left( \frac{veh - UT}{UT} \right) \quad (4-25)$$

$$d_i = \frac{c(1 - \mu_i)^2}{2(1 - y_i)} + \frac{N_{o,i}}{Q_i} \left( \frac{veh - UT}{veh} \right) \quad (4-26)$$

donde  $UT$  es una unidad de tiempo, normalmente hora para  $D$  y segundos para  $d$ .

Por definición la componente uniforme se define para grados de saturación menores que 1 (de modo que solamente evolucione dentro del ciclo). Por lo tanto, si eso no ocurre se asigna el valor  $x_i = 1$ , o equivalentemente  $y_i = \mu_i$  para el primer término de las expresiones anteriores. Por ejemplo, para la tasa media de demora resultaría  $D_i = \frac{q_i c (1 - \mu_i)}{2} + N_{o,i} x_i$ .

Para intersecciones que forman parte de una red la componente uniforme se estima mediante simulación. La componente excedente se estima con las expresiones incluidas en las ecuaciones (4-25) y (4-26).

En el análisis de movimientos peatonales puede ser necesario tener una estimación de la demora que experimentan esos usuarios para cruzar una intersección semaforizada. Para estimar ese valor es necesario tener en cuenta que el flujo de saturación peatonal de un cruce es del orden de 8.000 peat/h para un cruce de 2 m de ancho<sup>10</sup> y, por lo mismo, el grado de saturación resultante es generalmente cercano a cero. De esta manera la demora peatonal puede estimarse mediante la ecuación (4-26), pero asumiendo que  $x = 0$ , luego

<sup>10</sup> El flujo de saturación se estima como  $s = wvd$  donde  $w$  es el ancho del cruce,  $v$  la velocidad promedio de los peatones y  $d$  la densidad promedio de la corriente vehicular. Con  $w = 2 \text{ m}$ ,  $v = 1,1 \text{ m/s}$  y  $d = 1 \text{ peat/m}^2$  se obtiene  $s = 7.920 \text{ peat/h}$

$$d_{peat} = \frac{c(1 - \mu_{peat})^2}{2} = \frac{r_{e,peat}}{2} (1 - \mu_{peat}) \quad (UT) \quad (4-27)$$

donde  $\mu_{peat}$  y  $r_{e,peat}$  son la razón de verde efectivo y el rojo efectivo del movimiento peatonal analizado, respectivamente. El término  $r_{e,peat}/2$  corresponde a la demora promedio de los peatones que llegan durante el rojo peatonal efectivo, valor que se pondera por un término menor que 1 debido a que los peatones que llegan durante el verde efectivo peatonal tienen demora nula.

A falta de otra información se puede asumir que la pérdida en la partida y la ganancia final de los peatones son iguales ( $\lambda_{1,peat} = \lambda_{2,peat}$ ) y en consecuencia  $r_{e,peat} = c - v_{e,peat} = c - V_{peat}$ , ver sección 4.3.1.

#### 4.6.4 Detenciones

Las detenciones de los vehículos que genera el funcionamiento de un semáforo son un efecto relevante de tener en cuenta al optimizar la programación, pues cada detención y posterior puesta en marcha tiene asociado un consumo de combustible y una emisión de contaminantes significativos en comparación con la circulación a velocidad constante.

Tal como en los casos previos se pueden distinguir las componentes uniforme y excedente de la tasa media de detenciones ( $H$ ) y del número medio detenciones por vehículo ( $h$ ). Las respectivas expresiones se indican a continuación:

$$H_i = \underbrace{q_i \frac{1 - \mu_i}{1 - y_i}}_{\text{uniforme}} + \underbrace{\frac{N_{o,i}}{c}}_{\text{excedente}} \quad \left( \frac{\text{det}}{UT} \right) \quad (4-28)$$

$$h_i = \frac{1 - \mu_i}{1 - y_i} + \frac{N_{o,i}}{q_i c} \quad \left( \frac{\text{det}}{\text{veh}} \right) \quad (4-29)$$

Debido al uso del modelo binario de descarga una proporción de vehículos que solamente ajustó su velocidad al aproximarse a la línea de detención se contabiliza como si se hubiese detenido completamente. Esto induce una sobreestimación de las detenciones que puede ser corregida aplicando un factor de ponderación menor que 1. Se debe aplicar 0,9 como ponderador de  $H$  y  $h$  para que correspondan a detenciones completas.

Para intersecciones que forman parte de una red la componente uniforme se estima mediante simulación. La componente excedente se calcula con las expresiones incluidas en las ecuaciones (4-28) y (4-29).

#### 4.6.5 Indicador a nivel de movimiento

A partir de las demoras y detenciones es posible construir un indicador agregado, ponderando cada variable por un parámetro con valor económico. De esta manera se construye una variable expresada en unidades monetarias ( $UM$ ) por unidad de tiempo, típicamente horas.

Para fines de optimización de la programación en una intersección aislada, el indicador de rendimiento es una función del tiempo de ciclo y el tiempo de verde asociado a un movimiento  $j$ ,  $IR_j(c, V_j)$ , como se muestra a continuación. Los precios sociales que señala el indicador son los definidos anualmente por el Ministerio de Desarrollo Social.

$$IR_j(c, V_j) = (w_{1j} + w_2 + w_3)D_j(c, V_j) + (k_1 + k_2 + k_3)H_j(c, V_j) \quad (UM/h) \quad (4-30)$$

donde:

$D_j(c, V_j)$ : tasa media de demora (veh-h/h) para el tiempo de ciclo  $c$  y tiempo de verde  $V_j$

$H_j(c, V_j)$ : tasa media de detenciones (det/h) para el tiempo de ciclo  $c$  y tiempo de verde  $V_j$

$w_{1j}$ : tasa ocupación mov.  $j$  x valor del tiempo (UM/veh-h)

$w_2$ : consumo en ralenti x precio combustible (UM/veh-h)

$w_3$ : emisión en ralenti x "precio" de contaminantes (UM/veh-h)

$k_1$ : consumo por detención x precio combustible (UM/det)

$k_2$ : emisión por detención x "precio" contaminante (UM/det)

$k_3$ : accidentes por detención x "precio" accidente (UM/det)

Esta formulación del indicador es muy amplia en cuanto a los impactos en consumo de recursos. No siempre se dispone de valores fiables para parámetros como  $w_3$ ,  $k_2$  y  $k_3$ , caso en el cual no se incluyen en el indicador.

#### 4.6.6 Indicador a nivel de intersección y de red

El indicador de rendimiento total para la intersección ( $IR_{tot}$ ) es la suma de los indicadores por movimiento, es decir:

$$IR_{tot} = \sum_{j=1}^m IR_j(c, V_j) \quad (4-31)$$

donde  $m$  es el número de movimientos en la intersección. De esta manera, para encontrar la programación óptima de la intersección, definida por el tiempo de ciclo ( $c$ ) y los tiempos de verde de todos los movimientos ( $V$ ), el problema a resolver es el siguiente, sujeto a restricciones de tiempo de verde mínimo, entreverdes y ciclo mínimo y máximo:

$$\min_{c, V} IR_{tot} \quad (4-32)$$

En el caso de una red de semáforos se agrega la necesidad de establecer los desfases óptimos entre intersecciones ( $F_n$ ) y considerar la suma de los indicadores de rendimiento de todos los movimientos ( $j$ ) de cada intersección ( $n$ ). En ese caso el problema a resolver es:

$$\min_{c, V, F} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^m IR_{n,j}(c_n, V_{n,j}, F_{n,j}) \quad (4-33)$$

donde  $N$  es el número de intersecciones de la red,  $m$  el número de movimientos de la intersección  $n$ ,  $c_n$  es el tiempo de ciclo de la intersección  $n$ , que es un valor único para todas las intersecciones de la red o la mitad de ese valor en intersecciones con ciclo doble;  $V_{n,j}$  es el tiempo de verde en el semáforo de la intersección  $n$  asignado al movimiento  $j$  y  $F_{n,j}$  es el desfase asociado a dicho movimiento en esa intersección.

#### 4.6.7 Capacidad de reserva

La capacidad de reserva es una medida de la vida útil de la programación. Se define como el porcentaje en que puede aumentar el flujo de un movimiento sin que se supere el grado de saturación práctico definido para ese movimiento.

Teniendo en cuenta esa definición, la capacidad de reserva del movimiento  $j$  es:

$$CR_j = \left( \frac{xp_j}{x_j} - 1 \right) \times 100 \quad (4-34)$$

Donde  $x_j$  es el grado de saturación del movimiento y  $xp_j$  es el grado de saturación práctico. Este último se determina según se indica en la sección 4.5.5.2.

Por convención se asocia a la intersección el valor mínimo de la capacidad de reserva de los movimientos que en ella ocurren. En consecuencia se tiene que,

$$CR = \min_j \{CR_j\} \quad (4-35)$$

Si la capacidad de reserva es baja se puede analizar la posibilidad de incrementar el tiempo de ciclo, teniendo cuidado de no superar el valor máximo señalado en la sección 4.5.5.3.

El valor más adecuado de la capacidad de reserva depende de la frecuencia de actualización de las programaciones y del patrón de variación de los flujos. No obstante, se sugiere implementar programaciones con una vida útil no menor a dos años.

### 4.7 Planes prefijados para semáforos aislados

Se describe a continuación el proceso que se debe realizar para determinar la programación óptima de semáforos que funcionen sin coordinación de su programación con respecto a la de otros semáforos

cercanos, y que por simplicidad se denominan semáforos aislados. La programación se determina para cada uno de los períodos que corresponda.

Este proceso se debe aplicar una vez que un nuevo semáforo se encuentre operando en régimen con una programación de puesta en marcha o cuando se quiera optimizar la programación de semáforos existentes.

En lo que se explica a continuación se asumen conocidos los conceptos y métodos que se presentaron en la sección 4.5. Por lo mismo se describen aquí solamente aspectos que complementan lo señalado en esa sección o describen en términos generales el uso de herramientas computacionales para optimizar la programación.

## **4.7.1 Modelación y periodización**

### **4.7.1.1 Modelación**

La modelación es la representación abstracta de la intersección y no es una labor rutinaria ni de solución única. Es necesario que el analista conozca en profundidad las bases teóricas y las peculiaridades instrumentales de los programas computacionales que se utilicen para establecer la programación óptima, y aplique su criterio en cada caso. Ningún manual o recomendación puede sustituir ese conocimiento y el criterio. En este sentido la inclusión de la tarea de simulación de la situación actual y la disponibilidad de programas computacionales de probada eficacia son aspectos que facilitan el proceso al disponer de métodos de contraste. En la sección 4.4.5 se entrega una recomendación con respecto a los programas computacionales más apropiados.

Hay ciertos fenómenos de indiscutible gravitación en las condiciones de tráfico en las ciudades chilenas, sobre los que no existe suficiente experiencia. Son principalmente los asociados a conflictos funcionales: paradas de buses, carga-descarga y estacionamiento en la calzada, y a la circulación peatonal y su interferencia con la vehicular. Si problemas de este tipo son relevantes, el modelador debe poner cuidado en introducir sus efectos aunque sea indirectamente por medio de los valores de los parámetros pertinentes. El Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)) entrega recomendaciones en este sentido.

En el caso de intersecciones aisladas la modelación se refiere solamente a la intersección de interés y sus accesos. La modelación en este caso corresponderá a la representación de las pistas, sus características operativas y la eventual interacción entre ellas. La programación queda determinada, como se explicó en la sección 4.5, por las condiciones operativas de los movimientos críticos, que a su vez se identifican a partir de sus respectivos flujos y flujos de saturación.

Dependiendo del programa computacional que se utilice es necesario o no determinar a priori el flujo de saturación. En el Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)) se establece el procedimiento que se debe utilizar y un conjunto de recomendaciones para tratar situaciones especiales en las que se debe tener particular atención.

La modelación debe ser validada mediante un proceso de simulación de la Situación Actual y ajuste de la modelación que se requieran para reproducir las condiciones observadas en cada período, como se explica en la sección 4.7.2.

### **4.7.1.2 Periodización**

Como se explicó en la sección 4.4.3.1, la programación del semáforo aislado se realiza para cada uno de los períodos que se determinen como parte del proceso de periodización. El proceso de periodización se debe realizar con la metodología desarrollada por Hadjes (1989) y que se encuentra implementada en el programa computacional PERQT, disponible gratuitamente en la UOCT. En el Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)) se entregan recomendaciones de buenas prácticas en el uso de ese programa, el análisis de sus resultados y las conclusiones del proceso.

La periodización se realiza para una semana tipo representativa única o para distintas semanas tipo representativas de diferentes temporadas: normal y verano, por ejemplo. También pueden existir planes asociados a eventos específicos planificados en los que la demanda sea particularmente distinta de las condiciones habituales de circulación. Por ejemplo, eventos deportivos, ocupación temporal de calzadas para ferias libres o actividades culturales, entre otras situaciones.

## **4.7.2 Simulación de la situación actual**

La tarea de simulación de la situación actual es parte del proceso de programación del semáforo y tiene como objetivo validar los criterios de modelación y los parámetros utilizados para representar su operación. En la medida que se logre lo anterior se puede asegurar que la programación óptima obtenida con ese modelo responderá adecuadamente a las condiciones de circulación de cada período.

#### 4.7.2.1 Desarrollo de la simulación

La simulación de una intersección consiste en correr el programa seleccionado, SIDRA por ejemplo, con los datos de entrada correspondientes al modelo de tránsito construido, para estimar ciertos indicadores operativos que se utilizan para verificar si dicho modelo reproduce razonablemente el funcionamiento de la intersección.

La simulación se debe realizar al menos para cada uno de los dos períodos punta con mayor congestión y aquellos donde se implemente medidas de gestión de tránsito, como reversibilidad de vías, si no coinciden con los primeros. Para esto se deben utilizar los flujos vehiculares y peatonales observados y las programaciones vigentes al momento de realizar las mediciones.

#### 4.7.2.2 Criterios de validación de la simulación

La validación de la simulación se debe realizar mediante el contraste de las longitudes de colas vehiculares a nivel de pista de uso exclusivo o grupos de pistas con uso compartido en cada acceso de la intersección analizada. Para ello y como parte de la medición de flujos y otras variables operativas se debe realizar la medición de colas excedentes. Las mediciones de longitud de cola deben seguir las recomendaciones del MESPIVU.

La modelación está validada cuando las diferencias entre los valores de colas vehiculares excedentes observadas y estimadas difieran en menos de 20% en todas las pistas o grupos de pistas analizadas. La comparación debe realizarse en unidades de vehículos. En el análisis del cumplimiento de esta condición se requiere aplicar criterio ante situaciones donde no se cumpla por un margen estrecho, porque tanto la medición como la estimación están sujetas a incertezas y aleatoriedad.

#### 4.7.2.3 Ajustes en la modelación

En la medida que existan discrepancias mayores al umbral especificado entre los valores observados y estimados de la longitud de cola excedente, deben incorporarse modificaciones a la modelación de la intersección para reducirlas a un nivel aceptable, proceso que se conoce como calibración del modelo. Los cambios pueden afectar tanto a la forma de representar ciertos elementos como al valor de algunos parámetros.

Es de la mayor importancia que tales cambios tengan buen fundamento y no sean simples ajustes para cumplir la condición. Un aspecto clave en este sentido es examinar al mismo tiempo la situación de la intersección en todos los períodos simulados. Así el analista puede entender mejor la causa de las discrepancias encontradas y verificar que los cambios que realice son consistentes en los diversos períodos.

### 4.7.3 Optimización de la programación

#### 4.7.3.1 Generalidades

Una vez que se disponga de un modelo de tránsito validado según los criterios de la sección 4.7.2, se debe realizar el proceso de optimización de las programaciones de cada período.

La optimización debe restringirse a través de las siguientes condiciones:

- Los tiempos de verde están acotados inferiormente según lo descrito en la sección 4.5.5.1.
- Los tiempos de verde para los peatones se deben calcular como se indica en las secciones 4.5.5.1 y 4.7.5.6.
- El grado de saturación resultante para cada movimiento debe ser inferior al grado de saturación práctico definido en la sección 4.5.5.2.
- El tiempo de ciclo debe acotarse según lo indicado en la sección 4.5.5.3.

En función de estas restricciones y de las características del programa computacional que se utilice se determina la programación que minimice las demoras de los usuarios. Se pueden considerar otros objetivos en la medida que la UOCT los valide.

El procedimiento de cálculo de programaciones que se describe a continuación se basa en un conjunto de variables definidas para un movimiento  $i$ . Para evitar errores es recomendable expresar las variables asociadas a flujos en  $veh/s$  y las variables temporales en  $s$ . Las variables utilizadas se presentan a continuación.

Flujo vehicular:	$q_i$
Flujo de saturación:	$s_i$
Grado de saturación práctico:	$xp_i$
Verde efectivo:	$ve_i = V_i + \lambda_{2i} - \lambda_{1i}$
Verde en el semáforo:	$V_i$
Verde mínimo en el semáforo:	$Vmin_i$
Verde efectivo mínimo:	$ve_{min,i} = Vmin_i + \lambda_{2i} - \lambda_{1i}$
Tiempo de ciclo:	$c$
Razón de verde efectivo:	$\mu_i = ve_i/c$
Factor de carga:	$y_i = q_i/s_i$
Capacidad:	$Q_i = \mu_i s_i$
Grado de saturación:	$x_i = q_i/Q_i = y_i/\mu_i = q_i c / (s_i ve_i)$
Entreverde:	$I_i = AM_i + RR_i$
Tiempo perdido:	$l_i = I_i + \lambda_{1i} - \lambda_{2i}$

A partir de estas definiciones es fácil ver que para cada movimiento  $i$  se cumple en una fase:

$$ve_i + l_i = V_i + I_i \quad (4-36)$$

Esta relación es importante pues permite definir la programación mediante variables asociadas al semáforo  $(V, I)$  o a los movimientos  $(ve, l)$ .

#### 4.7.3.2 Identificación de movimientos críticos

Al programar un semáforo aislado los valores por determinar son el tiempo de ciclo ( $c$ ) y el tiempo de verde del semáforo ( $V$ ) de cada fase. Como el objetivo es determinar una programación óptima, que minimice un indicador de rendimiento de la intersección en su conjunto, es necesario identificar los movimientos críticos pues son ellos los que determinan los requerimientos de tiempos de ciclo y de verde. Los movimientos críticos son los que requieren mayor tiempo para operar con grado con  $x_i = xp_i$ .

El tiempo asignado ( $t_i$ ) a un movimiento es  $V_i + I_i$ , o equivalentemente:

$$t_i = ve_i + l_i \quad (4-37)$$

Pero como  $ve_i = \mu_i c$  y asumiendo el reparto mínimo aceptable,  $\mu_i = y_i/xp_i$ , se tiene finalmente:

$$t_i = c \frac{y_i}{xp_i} + l_i \quad (4-38)$$

Este tiempo corresponde a aquel que genera  $x_i = xp_i$  para cada movimiento en la intersección y debe cumplir además  $t_i \geq Vmin_i + I_i$  o equivalentemente  $ve_i \geq ve_{min,i} = Vmin_i + I_i - l_i$ .

Si no hay movimientos traslapados el movimiento crítico de una fase es aquel para el cual  $t_i$  es máximo. Al existir traslapos, se debe encontrar una "ruta crítica" compuesta por la suma de los  $t_i$  mayores; los movimientos que la compongan son los críticos.

Como  $t_i$  depende de  $c$ , para determinar cuáles son los movimientos críticos se debe asumir un valor para esa variable, por ejemplo 100 s. Este supuesto generalmente no afecta la identificación de los movimientos críticos. Las restantes variables que determinan  $t_i$  se obtienen de información de terreno o se conocen a priori  $(xp, I, \lambda_1, \lambda_2)$ . En la sección 4.7.5 se presenta un ejemplo de identificación de movimientos críticos.

### 4.7.3.3 Determinación del tiempo de ciclo

Sin perjuicio de la forma en que los programas computacionales recomendados realizan esta tarea, se exponen a continuación los principios básicos que se aplican para determinar el tiempo de ciclo en una intersección aislada.

Sea  $M_c$  el conjunto de movimientos críticos identificados como se explicó anteriormente, se definen entonces las siguientes variables para la intersección:

$$\begin{aligned} \text{Factor de carga:} & \quad Y = \sum_{i \in M_c} y_i \\ \text{Razón de verde:} & \quad U = \sum_{i \in M_c} \mu_i = (c - L)/c = \sum_{i \in M_c} v e_i / c \\ \text{Tiempo perdido total:} & \quad L = \sum_{i \in M_c} l_i \\ \text{Tiempo de ciclo:} & \quad c = \sum_{i \in M_c} (v e_i + l_i) \text{ o } c = \sum_{i \in \text{fases}} (V_j + I_j) \\ \text{Grado de saturación:} & \quad X = \max_{i \in M_c} \{x_i\} \end{aligned}$$

Para calcular el tiempo de ciclo óptimo se debe utilizar como criterio general la minimización del costo generalizado de los usuarios, el cual está compuesto de demoras y consumo de combustible asociado a las detenciones. Es posible demostrar que el tiempo de ciclo óptimo,  $c_0$ , que minimiza el costo generalizado está dado aproximadamente por la siguiente relación<sup>11</sup>:

$$c_0 = \frac{(1,4 + k)L + 6}{1 - Y} \quad (4-39)$$

donde el valor del parámetro  $k$  se define de acuerdo con lo siguiente

$$k = \begin{cases} 0 & \text{para minimizar demoras} \\ 0,2 & \text{para minimizar costo de demoras y combustible} \\ 0,4 & \text{para minimizar consumo de combustible} \\ -0,3 & \text{para minimizar longitud colas en movimientos críticos} \end{cases}$$

La expresión anterior sólo considera los movimientos críticos (que definen  $L$  e  $Y$ ), pero también los movimientos no-críticos generan consumo de recursos. Para ellos el ciclo óptimo es menor. Luego, es conveniente determinar el valor mínimo del tiempo de ciclo que asegure niveles adecuados de saturación a todos los movimientos y que se denomina tiempo de ciclo práctico ( $c_p$ ). Para ese ciclo se cumple  $x_i = X$  para  $i \in M_c$  y  $x_i < X$  para  $i \notin M_c$ .

Se puede demostrar que el ciclo práctico está dado por:

$$c_p = \frac{L}{1 - U} \quad (4-40)$$

La demora en la intersección es función del tiempo de ciclo, no obstante eso, si el tiempo de ciclo varía en el intervalo  $[0,75c_0; 1,5c_0]$  la demora se incrementa en menos de un 20%. Por lo tanto, se recomienda elegir un valor entre  $c_0$  y  $c_p$ , sujeto a las restricciones señaladas en la sección 4.5.5.

### 4.7.3.4 Determinación del reparto de tiempo de verde

Definido un tiempo de ciclo, la distribución de tiempos de verde se realiza generalmente aplicando el principio de equisaturación, que es consistente con la minimización de las demoras. Esto lleva a igualar los grados de saturación de los movimientos críticos, lo cual se expresa como:

$$x_i = X \quad \forall i \in M_c \quad (4-41)$$

Además, se puede demostrar que el grado de saturación de la intersección  $X$  se minimiza si a los movimientos críticos se les asigna verde efectivo ( $v e_i$ ) en proporción a sus razones de verde efectivo ( $\mu_i$ ),

<sup>11</sup>Akcelik, R. (1993) Traffic signals: capacity and timing analysis. Australian Road Research Board Ltd. Research Report ARR 123, fifth reprint

calculadas como  $\mu_i = q_i / (s_i X) = y_i / X$ . Teniendo en cuenta que el tiempo verde efectivo disponible para los movimientos críticos es  $(c - L)$ , al aplicar lo anterior se obtiene:

$$ve_i = (c - L) \frac{\mu_i}{U} = (c - L) \frac{y_i}{Y} \quad \forall i \in M_c \quad (4-42)$$

Cuando hay movimientos críticos que solamente requieren verde mínimo esta expresión no les aplica. Esos movimientos tienen  $ve_i = ve_{min,i}$  valores que se consideran como tiempos perdidos que se suman a  $L$ . Además, los correspondientes valores de  $y_i$  y  $\mu_i$  no se incluyen en el cálculo de  $Y$  y  $U$ , respectivamente.

Finalmente, los repartos en el semáforo para los movimientos críticos son los siguientes:

$$V_i = ve_i + L_i - I_i \quad \forall i \in M_c \quad (4-43)$$

Para los movimientos que no son críticos su reparto está determinado por el reparto de los movimientos críticos con los que comparten fase. El caso más simple se da cuando no existen movimientos traslapados, ya que en esa situación el tiempo de verde efectivo del movimiento no-traslapado ( $k$ ) que recibe verde en la misma fase que el movimiento crítico ( $n$ ), cuyos tiempos son  $ve_n$  y  $l_n$ , está dado por:

$$ve_k = ve_n + l_n - l_k \quad (4-44)$$

donde  $l_k$  es el tiempo perdido del movimiento  $k$ .

Cuando existe un traslapo y el movimiento traslapado es crítico entonces los tiempos de verde efectivo de los movimientos no traslapados pueden calcularse suponiendo que el tiempo asignado al movimiento crítico ( $n$ ) forma un sub-ciclo con una duración  $c^* = ve_n + l_n$ . Entonces el tiempo total disponible para los movimientos no traslapados es  $(c^* - L^*)$ , donde  $L^*$  es la suma de los tiempos perdidos de esos movimientos no traslapados.

Asumiendo la aplicación del criterio de equisaturación, el tiempo de verde efectivo de un movimiento no traslapado ( $k$ ) es en este caso:

$$ve_k = (c^* - L^*) \frac{\mu_k}{U^*} \quad (4-45)$$

o bien, si el movimiento requiere tiempo de verde mínimo:

$$ve_k = ve_{min,k} \quad (4-46)$$

donde  $U^*$  es la suma de las razones de verde de los movimientos no traslapados,  $\mu_k = q_k / (s_k x p_k)$  y  $ve_{min,k}$  es el tiempo de verde efectivo mínimo para el movimiento  $k$ .

Cuando los movimientos críticos no son traslapados ( $n$ ), pero hay movimientos traslapados no críticos ( $k$ ), se debe cumplir:

$$ve_k = \sum_{n \in C_{r,k}} (ve_n + l_n) - l_k \quad (4-47)$$

donde  $M_{c,k}$  son los movimientos críticos no-traslapados que tienen derecho de paso durante las fases en que tiene derecho de paso el movimiento  $k$ .

La programación de un semáforo destinado a controlar el paso de los vehículos puede generar condiciones para que los peatones puedan cruzar la intersección con seguridad. Esto se refuerza mediante cabezales especiales para los peatones que presentarán las siguientes indicaciones<sup>12</sup>:

<sup>12</sup> El significado de cada indicación debe corresponder al señalado en la Ley de Tránsito vigente.

- rojo peatonal: indica que los peatones no pueden ingresar a la calzada ni cruzarla o que los ciclistas deben detenerse antes de la línea de detención;
- verde peatonal continuo: indica que los peatones o los ciclistas pueden cruzar la calzada o intersección, según sea el caso, por el paso correspondiente, esté o no demarcado;
- verde peatonal intermitente: significa que el período durante el cual los peatones o los ciclistas pueden atravesar la calzada está por concluir y se va a encender la luz roja, por lo que deben abstenerse de iniciar el cruce y, a su vez, permite a los que ya estén cruzando la calzada, terminar de atravesarla.

La duración de los dos períodos de verde peatonal debe ser al menos igual al verde mínimo vehicular de la fase en la que cruzan los peatones, ver sección 4.5.5.1. Esta duración debe extenderse si hay un alto flujo peatonal o si la duración de la fase vehicular asociada así lo permite.

La duración del verde intermitente del movimiento peatonal  $i(INT_{p,i})$  es igual al 90% del tiempo de cruce de los peatones, asumiendo las velocidades de caminata ( $v_c$ ) señaladas en el Cuadro 4-6 y la misma distancia de cruce ( $w_i$ ) utilizada para el cálculo del verde mínimo vehicular correspondiente, es decir:

$$INT_{p,i} = 0,9 \left( \frac{w_i}{v_c} \right) \quad (4-48)$$

A partir de esta definición es posible especificar un tiempo de entreverde del movimiento peatonal  $i(I_{p,i})$ , análogo al caso vehicular pero más restrictivo desde el punto de vista de la seguridad del peatón. Su valor es igual a la suma del verde intermitente y el rojo-rojo de la fase vehicular correspondiente, es decir,

$$I_{p,i} = INT_{p,i} + RR_{veh(i)} \quad (4-49)$$

donde  $RR_{veh(i)}$  es el tiempo de rojo-rojo del movimiento vehicular que tiene derecho de paso junto al movimiento peatonal  $i$ , pero que para fines de programación es un valor único para la intersección, y corresponde al valor máximo de todos los movimientos como se explicó en la sección 4.5.4.

En función de lo anterior, el tiempo de verde peatonal continuo ( $V_{p,i}$ ) tiene una duración igual a:

$$V_{p,i} = V_{veh(i)} + I_{veh(i)} - I_{p,i} = V_{veh(i)} + AM_{veh(i)} - INT_{p,i} \quad (4-50)$$

donde  $V_{veh(i)}$  y  $AM_i$  son el tiempo de verde y amarillo de la fase vehicular que tiene derecho de paso junto al movimiento peatonal  $i$ . Asumiendo el valor estándar de 3 segundos para el tiempo de amarillo (válido para semáforos que cumplen la norma UOCT), resulta finalmente:

$$V_{p,i} = V_{veh(i)} + 3 - INT_{p,i} \quad (4-51)$$

De acuerdo con lo anterior y utilizando la expresión del tiempo mínimo de verde vehicular, el tiempo de verde peatonal continuo, en una fase conjunta entre vehículos y peatones, debe cumplir la siguiente relación:

$$V_{p,i} \geq 8 + 0,1 \left( \frac{w_c}{v_c} \right) \quad (4-52)$$

El tiempo de rojo peatonal ( $R_{p,i}$ ) corresponde entonces a

$$R_{p,i} = c - (V_{p,i} + I_{p,i}) \quad (4-53)$$

donde  $c$  es el tiempo de ciclo.

Estas relaciones son válidas también para el diseño de fases peatonales exclusivas, es decir, aquellas en que los únicos usuarios de la intersección con derecho de paso son los peatones. Es necesario tener en cuenta que en ese caso no existe una relación entre las indicaciones peatonales y vehiculares como la señalada en la ecuación (4-50), sino que el tiempo de verde continuo exclusivo ( $V_{p,i}^{exc}$ ) e intermitente deben sumar al menos el tiempo de verde mínimo requerido para el cruce seguro de los peatones, tal como se definió en la sección 4.5.5.1, es decir,

$$V_{p,i}^{exc} + INT_{p,i} \geq Vmin_i = 5 + \frac{w_i}{v_c} \quad (4-54)$$

Con lo cual el tiempo de verde peatonal continuo de una fase peatonal exclusiva debe cumplir la relación

$$V_{p,i}^{exc} \geq 5 + 0,1 \left( \frac{W_c}{V_c} \right) \quad (4-55)$$

El valor final del tiempo de verde continuo depende del tiempo de ciclo y los tiempos de verde de las fases vehiculares.

#### 4.7.3.5 Especificación de la programación

Para introducir los planes de programación en el controlador del semáforo es necesario formalizar las variables de programación en un esquema apto para ese propósito. Esto implica centrarse en cada una de las fases con que opera el semáforo, tal como se explica a continuación.

El tiempo de verde en el semáforo para una cierta fase puede calcularse como  $V = ve + l - I$  donde  $(ve + l)$  es el tiempo asignado a un movimiento que recibe verde solamente durante esa fase e  $I$  es el entreverde de la fase.

Cuando existen movimientos traslapados, la duración del tiempo de verde debe obtenerse a partir de la relación siguiente:

$$\sum_{i \in M_{j,k}} (ve_i + l_i) = \sum_{n=j}^{k-1} (V_n + I_n) \quad (4-56)$$

donde  $M_{j,k}$  es el conjunto de movimientos que reciben verde consecutivamente entre las fases  $j$  y  $k$ .

Una vez que los tiempos de verde de todas las fases son conocidos, los instantes de cambio de fase se calculan mediante la siguiente relación:

$$F_i = F_{i-1} + (V_{i-1} + I_{i-1}) \quad (4-57)$$

donde

$F_i$ : instante de cambio de la fase  $i$  (s)

$F_{i-1}$ : instante de cambio de la fase anterior a la fase  $i$  (s)

Los valores de los cambios de fase deben ajustarse para que  $0 < F_i \leq c$ , dado el carácter cíclico del funcionamiento del semáforo.

A partir de los cambios de fase se pueden determinar directamente los tiempos de verde efectivo y los tiempos en el semáforo para cada movimiento/fase, pues se cumple que

$$ve = F_k - F_j - l \quad (4-58)$$

donde  $F_k$  y  $F_j$  son los instantes de término e inicio de la fase correspondiente y  $l$  es el tiempo perdido del movimiento. De manera similar, el tiempo de verde en el semáforo está dado por

$$V = F_k - F_j - I \quad (4-59)$$

donde  $I$  es el entreverde correspondiente al movimiento.

Para intersecciones aisladas puede definirse un inicio arbitrario para la Fase A, en cambio en redes de semáforos es de gran relevancia establecer el inicio de las fases de modo que se logre una operación coordinada, que busque minimizar la componente uniforme de las colas, demoras y detenciones, tal como se explica en la sección 4.8.

#### 4.7.3.6 Tratamiento de períodos nocturnos

En períodos nocturnos, para los cuales habitualmente no se cuenta con información de flujos, es recomendable el uso del semáforo en modalidad intermitente (*flashing*) de modo que opere de manera similar

a una intersección de prioridad<sup>13</sup> y se logre así un funcionamiento que genere menos demora a los usuarios. Es necesario verificar en terreno que ese funcionamiento sea adecuado y no produzca efectos secundarios, por ejemplo, en la accidentabilidad. Si se generan inconvenientes con la operación intermitente entonces el semáforo debe operar con el ciclo mínimo que corresponda.

#### 4.7.4 Reporte del proceso de optimización de programación de un semáforo aislado

El proceso de obtención de la programación óptima de un semáforo aislado debe reportarse en un informe que se presentará a la UOCT para su revisión y aprobación cuando proceda. El informe debe elaborarse según los requisitos definidos en el Manual de "Programación y modelación de semáforos" ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)). Se deben considerar las etapas de modelación, periodización, simulación y calibración, y optimización de las programaciones según sea el caso.

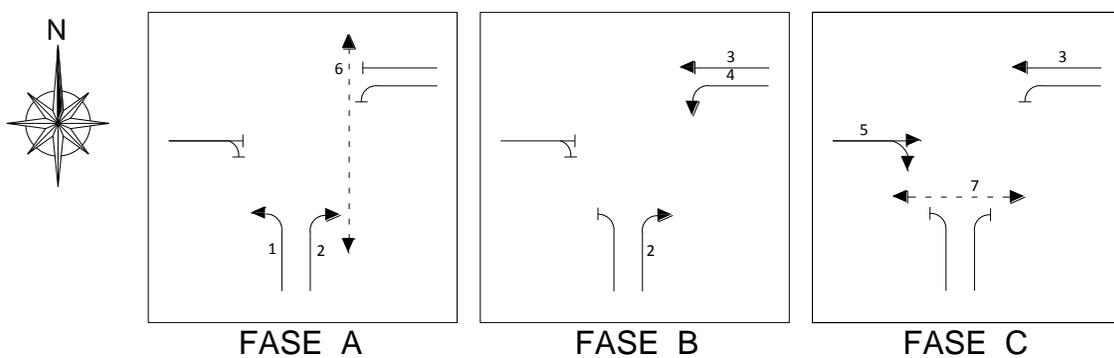
#### 4.7.5 Ejemplo de aplicación

En el caso de una intersección que opera aislada el cálculo del tiempo de ciclo y reparto de tiempo de verde depende exclusivamente de los flujos que ocurren en esa intersección en cada período definido. Se asume en este caso que la llegada de los vehículos a la intersección no está afectada por la presencia de otras intersecciones semaforizadas, lo cual permite el uso de expresiones analíticas sencillas para la longitud de cola, demoras, detenciones y tiempo de ciclo óptimo.

##### 4.7.5.1 Identificación de movimientos críticos

A continuación se desarrolla un ejemplo de identificación de movimientos críticos. Para esto se utiliza el mismo esquema de fases presentado en la sección 4.5.3.1, que se reproduce nuevamente a continuación, y se suponen valores para las variables relevantes:  $I$ ,  $V_{min}$ ,  $q$ ,  $s$ ,  $l$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , y  $x_p$  de cada movimiento. Se asume además que el tiempo de amarillo es igual a 3 segundos para todos los movimientos vehiculares.

Figura 4-15 Ejemplo de especificación de fases



<sup>13</sup> Según el Artículo N°104 del DFL N°1 2007 (Ley de Tránsito) la luz roja intermitente indica "Ceda el Paso" y la luz amarilla advierte peligro.

**Cuadro 4-7 Datos y variables para identificación de movimientos críticos**

Movimiento	Fase inicio	Fase término	Entreverde (I)	Verde mínimo (V <sub>min</sub> )	Flujo (q)	Flujo saturación (s)	Tiempo perdido (l)	Verde efectivo mínimo (ve <sub>min</sub> )	Grado saturación práctico (xp)
1	A	B	5	6	170	1.490	3	8	0,92
2	A	C	5	8	580	1.240	8	5	0,90
3	B	A	6	8	650	3.480	6	8	0,90
4	B	C	6	6	240	1.510	5	7	0,92
5	C	A	5	8	920	3.260	4	9	0,85
6	A	B	5	17	peatonal		4 22	18	---
7	C	A	5	14	peatonal		4 19	15	---

La identificación de los movimientos críticos requiere la siguiente secuencia de pasos.

**Paso 1: Elaboración de cuadro para búsqueda de movimientos críticos**

Calcular para cada movimiento la razón de flujo ( $y = q/s$ ), razón de verde efectivo mínima ( $\mu = y/xp$ ), tiempo requerido inicial ( $100\mu + l$ ), ver ecuación (4-38); y tiempo mínimo requerido ( $t_m = V_{min} + l$ ).

Determinar el tiempo requerido,  $t$ , como el máximo entre  $t_m$  y ( $100\mu + l$ ).

Si  $t = t_m$  para algún movimiento entonces es necesario reemplazar provisoriamente el tiempo perdido (l) por  $t_m$ , ver movimientos 6 y 7 en Cuadro 4-7. Esto es necesario para la búsqueda de movimientos críticos. No considerar los valores de  $y$  y  $\mu$  correspondientes a ese movimiento para el posterior cálculo de indicadores de la intersección si el movimiento resulta ser crítico. Para movimientos peatonales se deben ignorar los valores de  $y$  y  $\mu$  y asignar siempre  $t = t_m$ , tal como se muestra en el cuadro siguiente.

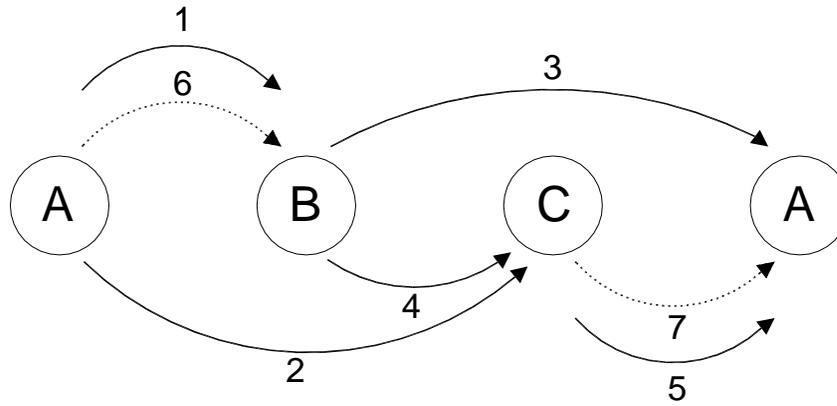
**Cuadro 4-8 Cálculos para la identificación de movimientos críticos**

Movimiento	$y = q/s$	$\mu = y/xp$	$100\mu + l$	$t_m = V_{min} + l$	$t$
1	0,11	0,12	15	11	15
2*	0,47	0,52	60	13	60
3	0,19	0,21	27	14	27
4	0,16	0,17	22	12	22
5*	0,28	0,33	37	13	37
6	---	---	---	22	22
7	---	---	---	19	19

**Paso 2: Construcción del grafo de búsqueda de movimientos críticos**

Dibujar el grafo que representa las fases del semáforo. En ese grafo los nodos representan a las fases, dispuestas en orden alfabético de derecha a izquierda y desde la fase A hasta nuevamente la A. Luego se conectan los nodos mediante arcos, que representan los movimientos, según la fase de inicio y término correspondiente. Por ejemplo, el movimiento 2 conecta A y C (traslapado) y el movimiento 1 conecta A y B (no traslapado). Si algún movimiento no alcanza a ser representado es necesario extender el diagrama agregando nodos B, C, etc. según se requiera. El diagrama resultante para el ejemplo se muestra en la siguiente figura.

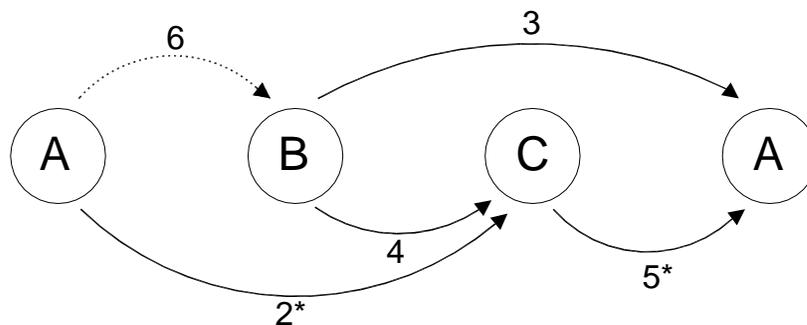
Figura 4-16 Grafo de fases



**Paso 3: Análisis de movimientos no traslapados**

Comparar los valores de  $t$  de los movimientos no traslapados en cada fase, escoger como representativos los que tengan valores más altos y descartar los otros. En el ejemplo se tiene  $t_6 > t_1$  en la fase A y  $t_5 > t_7$  en la fase C, por lo tanto, se deben descartar los movimientos 1 y 7. A partir de lo anterior generar un grafo o diagrama reducido, que para este ejemplo se muestra a continuación.

Figura 4-17 Grafo de fases reducido



Para un conjunto de fases sin movimientos traslapados los movimientos críticos son los que aparecen en el grafo reducido. En el ejemplo esto no ocurre y en consecuencia se requiere un paso adicional, que se describe a continuación.

**Paso 4: Análisis de movimientos traslapados**

Cuando existen movimientos traslapados es necesario comparar los valores de  $t$  para los movimientos traslapados que tienen derecho de paso durante las mismas fases, es decir, aquellos que tienen las mismas fases de inicio y término, y escoger los que tengan valores más altos.

Después deben identificarse en el grafo reducido las combinaciones de movimientos que completan un ciclo: en el ejemplo se tienen las combinaciones (3, 6), (4, 5, 6), (2, 5). A continuación se debe calcular el tiempo total requerido ( $T$ ) para completar esas combinaciones y seleccionar la que tenga el valor más alto. Los movimientos que sean parte de esa combinación son los movimientos críticos. En el ejemplo se tiene:

- $T_{3,6} = t_3 + t_6 = 27 + 22 = 49 \text{ s}$
- $T_{4,5,6} = t_4 + t_5 + t_6 = 22 + 37 + 22 = 81 \text{ s}$
- $T_{2,5} = t_2 + t_5 = 60 + 37 = 97 \text{ s}$

En consecuencia los movimientos críticos son el 2 y el 5, y se representan con un asterisco en el grafo reducido.

A partir de variables asociadas a los movimientos críticos se pueden establecer el tiempo de ciclo óptimo y los repartos para todos los movimientos, tal como se explica en las siguientes secciones.

#### 4.7.5.2 Cálculo del tiempo de ciclo

Utilizando los datos del ejemplo, se tiene  $L = l_2 + l_5 = 8 + 4 = 12$  s,  $Y = y_2 + y_5 = 0,47 + 0,28 = 0,75$  y  $U = \mu_2 + \mu_5 = 0,52 + 0,33 = 0,85$ . Asumiendo  $k = 0,2$ , el tiempo de ciclo óptimo resulta ser:

$$c_0 = \frac{1,6L + 6}{1 - Y} = \frac{1,6 \times 12 + 6}{1 - 0,75} = 101 \text{ s}$$

y el ciclo práctico:

$$c_p = \frac{L}{1 - U} = \frac{12}{1 - 0,85} = 80 \text{ s}$$

En este ejemplo se asume que el tiempo de ciclo seleccionado es 90 s. En una aplicación real el especialista debe establecer, en función de su experiencia y las condiciones operativas del lugar, el tiempo de ciclo más apropiado a partir de los ciclos óptimo y práctico.

#### 4.7.5.3 Reparto de verde para movimientos críticos

Utilizando los datos del ejemplo ya presentado, se tiene:

$$ve_2 = (90 - 12) \frac{0,52}{0,85} = 47,7 \approx 48 \text{ s}$$

$$ve_5 = (90 - 12) \frac{0,33}{0,85} = 30,3 \approx 30 \text{ s}$$

#### 4.7.5.4 Reparto de verde para movimientos no críticos

Para los movimientos que no son críticos su reparto está determinado por el reparto de los movimientos críticos con los que comparten fase. El caso más simple se da cuando no existen movimientos traslapados. Para el ejemplo analizado se tiene al movimiento 7 compartiendo fase con el movimiento crítico 5, por lo tanto,

$$ve_7 = ve_5 + 4 - 4 = 30 \text{ s}$$

Nótese que el tiempo perdido del movimiento 7 toma su valor real (4 s) y no el valor provisorio indicado

Cuando existe un traslapo y el movimiento traslapado es crítico entonces los tiempos de verde efectivo de los movimientos no traslapados pueden calcularse suponiendo que el tiempo asignado al movimiento crítico forma un sub-ciclo con una duración menor ( $c^*$ ) que el ciclo de la intersección. Esto puede representarse mediante un grafo reducido en el que aparece el movimiento crítico y los movimientos que se traslapan a él.

Continuando con el ejemplo, el movimiento crítico 2 está traslapado con los movimientos 4 (fase B) y 6 (fase A), por lo tanto para ellos se tiene  $c^* = ve_2 + l_2 = 56$  s. Pero el movimiento 6 tiene verde mínimo y por lo tanto  $t_6 = t_{6,min} = 22$ . En consecuencia, el tiempo perdido es  $L^* = l_4 + t_{6,min} = 5 + 22 = 27$  s y  $U^* = \mu_2$ . Entonces, aplicando la ecuación (4-45) resulta:

$$ve_4 = (c^* - L^*) \frac{\mu_2}{U^*} = 56 - 27 = 29 \text{ s}$$

Para el movimiento 6, por definición de verde efectivo mínimo, se tiene

$$ve_6 = ve_{min,6} = t_{6,min} - l_6 = 22 - 4 = 18$$

Para el movimiento 1, que comparte fase con el movimiento 6, se cumple entonces:

$$ve_1 = ve_6 + l_6 - l_1 = 18 + 4 - 3 = 19 \text{ s}$$

Finalmente, para el movimiento 3 que está traslapado con los movimientos 4 y 5, resulta:

$$ve_3 = (ve_4 + l_4 + ve_5 + l_5) - l_3 = 29 + 5 + 30 + 4 - 6 = 62 \text{ s}$$

En el siguiente cuadro se resumen los valores resultantes de repartos para todos los movimientos del ejemplo analizado, se incluye también el grado de saturación para comprobar que  $x \leq xp$ . Se indican con asterisco los movimientos críticos.

**Cuadro 4-9 Resumen de repartos y grados de saturación obtenidos**

Movimiento	$y = q/s$	$\mu c + l$	$t$	$ve$	$x = \frac{c}{ve} y$
1	0,11	14	14	19	0,52
2*	0,47	55	55	48	0,88
3	0,19	25	25	62	0,28
4	0,16	20	20	29	0,50
5*	0,28	34	34	30	0,84
6	---	---	22	18	---
7	---	---	19	30	---

#### 4.7.5.5 Determinación de cambios de fase en el semáforo

Aplicando estas relaciones indicadas en la sección 4.7.3.5 al ejemplo analizado se obtienen los inicios de fase que se muestran en el cuadro siguiente.

**Cuadro 4-10 Resumen de inicios de fase (s)**

Fase	Entreverde (I)	Verde presentado (V)	Inicio de fase (F)	Inicio de verde (F + I)	Término de fase (F + I + V)
A	5	17	0	5	22
B	6	28	22	28	56
C	5	29	56	61	90 (=0)

#### 4.7.5.6 Determinación de indicaciones para peatones

Las indicaciones para los peatones no resultan de un análisis del nivel de flujo peatonal y su capacidad, pues ésta última es muy alta en cualquier cruce peatonal debido a la densidad que normalmente tienen las corrientes peatonales. El cálculo de las indicaciones peatonales se realiza entonces en función de los tiempos mínimos requeridos para que crucen la intersección con seguridad y de la relación que existe con las fases vehiculares que tienen derecho de paso junto con los peatones.

Como se mencionó en la sección 4.7.3.4, las indicaciones peatonales incluyen tiempos de rojo, verde continuo y verde intermitente. Asumiendo que las distancias de cruce para los movimientos peatonales 6 y 7 del ejemplo son 7 y 16 metros, respectivamente, se tiene entonces.

##### Movimiento peatonal 6:

- $INT_{p,6} = 0,9(7/1,1) = 6 \text{ s}$
- $I_{p,6} = INT_{p,6} + RR_{veh(6)} = INT_{p,6} + (I_{veh(6)} - AM_{veh(6)}) = 6 + (5 - 3) = 8 \text{ s}$
- $V_{p,6} = V_A + 3 - INT_{p,6} = 17 + 3 - 6 = 14 \text{ s}$
- $R_{p,6} = c - V_{p,6} - I_{p,6} = 90 - 14 - 8 = 68 \text{ s}$

##### Movimiento peatonal 7:

- $INT_{p,7} = 0,9(16/1,1) = 13 \text{ s}$
- $I_{p,7} = INT_{p,7} + RR_{veh(7)} = INT_{p,7} + (I_{veh(7)} - AM_{veh(7)}) = 13 + (5 - 3) = 15 \text{ s}$
- $V_{p,7} = V_C + 3 - INT_{p,7} = 29 + 3 - 13 = 19 \text{ s}$
- $R_{p,7} = c - V_{p,7} - I_{p,7} = 90 - 19 - 15 = 56 \text{ s}$

Estas indicaciones son las que se presentan en los cabezales peatonales respectivos.

## 4.8 Planes prefijados para redes de semáforos

### 4.8.1 Introducción

Se describe a continuación el proceso que debe realizarse para determinar la programación óptima de un conjunto de semáforos que funcionan coordinadamente con otros semáforos cercanos, y que por simplicidad se denominará una red.

Este proceso se aplica una vez que los semáforos se encuentren operando en régimen con una programación de puesta en marcha, cuando se requiera optimizar la programación de una red existente o si se trata de un grupo de semáforos que conformarán una nueva red.

La cercanía entre intersecciones semaforizadas y su funcionamiento periódico generan regularidades en la salida de los vehículos desde las intersecciones que dan lugar a la formación de grupos o pelotones que se desplazan hacia los semáforos aguas abajo. Este fenómeno introduce cambios en la estimación de la componente uniforme de colas, demoras y detenciones, pues las expresiones analíticas conocidas asumen que las llegadas se producen a tasa constante (ver sección 4.5). En este escenario el instante en que aparecen las indicaciones de los semáforos con respecto a la posición de los pelotones es relevante para estimar la componente uniforme de esas variables. La estimación de la componente excedente, por el contrario, no se ve afectada por la existencia de llegadas de los vehículos en pelotón.

Es necesario entonces definir una nueva variable de programación, denominada desfase, que fija la posición del inicio del tiempo de verde dentro del ciclo. El desfase corresponde al tiempo que transcurre entre el inicio de una cierta fase en un semáforo y el inicio de la fase homóloga en un semáforo adyacente. Con los desfases adecuados podría lograrse idealmente, si la componente excedente nula (bajo grado de saturación), que los pelotones se desplacen por la red con un mínimo de detenciones y demoras.

La relación entre las indicaciones de uno y otro semáforo que busca minimizar las detenciones y demoras de los usuarios se denomina coordinación de las programaciones. Existen dos alternativas para lograr lo anterior:

- Coordinación dinámica: optimiza los desfases según las características del tráfico en cada momento, en función de la información capturada mediante sensores instalados en las calles que detectan la presencia de los vehículos.
- Coordinación con planes prefijados: optimiza los desfases para un plan predeterminado fijo que abarca todos los semáforos de la red durante los diferentes períodos del día.

En el ámbito urbano existe una trama vial en la cual los vehículos se desplazan en distintas direcciones y condiciones operativas, por lo tanto, no es posible lograr la coordinación simultánea de todas las vías. Se requiere entonces buscar una configuración óptima de desfases, repartos de tiempo de verde y tiempo de ciclo, que minimice algún indicador de costo generalizado que dé cuenta del consumo de recursos de todas las intersecciones analizadas, tal como se explicó en la sección 4.6.6.

### 4.8.2 Modelación y conformación de redes de semáforos

#### 4.8.2.1 Modelación

La modelación es la representación abstracta de las intersecciones y vías que forman la red de interés. Como se explicó en la sección 4.7.1.1, ésta no es una labor rutinaria ni de solución única. Se requiere un profundo conocimiento de las herramientas computacionales que se utilicen y la aplicación de criterio y experiencia para representar situaciones complejas. La etapa de simulación de la situación actual es fundamental para validar esta tarea.

La recomendación de este manual para optimizar la programación de redes es el uso del programa TRANSYT 8S, dada la experiencia nacional en su uso, los buenos resultados obtenidos y el hecho de que está disponible gratuitamente.

En función de lo anterior, la modelación de una red consiste en la representación en cada período de las intersecciones y vías-flujos mediante los elementos definidos en TRANSYT 8S, es decir, nodos y arcos, respectivamente.

Los arcos de la red de modelación representan a las corrientes vehiculares que se desplazan por las vías. Un arco está caracterizado principalmente por la velocidad a la que circulan los vehículos y tiene asociado un cierto flujo. En el caso de TRANSYT también se pueden establecer diferencias entre arcos por otros atributos, como por ejemplo: tasa de ocupación de los vehículos, acceso desde el cual proviene cierta corriente, demora adicional en el tramo de vía asociada a paraderos, etc. Por lo general se diferencian arcos de transporte público y arcos con los restantes tipos de vehículos, aunque como ya se mencionó es posible establecer una

desagregación mayor si las condiciones particulares de la red así lo indican. Los flujos vehiculares, y los flujos de saturación, se deben expresar en unidades de vehículos equivalentes mediante los respectivos factores de equivalencia.

La capacidad de las intersecciones se asocia a líneas de detención que pueden estar constituidas por una o más pistas. La capacidad de esas líneas de detención es la suma de las capacidades de las pistas que la componen. Cuando una pista es de uso exclusivo para un determinado movimiento, esa pista constituye una línea de detención propia; por el contrario, cuando un grupo de pistas es utilizado indistintamente por uno o más movimientos entonces esas pistas constituyen una sola línea de detención.

El modelo conceptual de la red puede variar entre períodos producto de cambios en el uso de la vialidad, por ejemplo, la reversibilidad de una calle o la aplicación de restricciones temporales a la circulación de ciertos vehículos, como en el caso de las vías exclusivas para transporte público.

La construcción del modelo de la red requiere de al menos la siguiente información por período para las intersecciones y tramos de vía, según corresponda:

- Flujos vehiculares representativos de las condiciones normales de circulación, clasificados por tipo de vehículo de forma consistente con el modelo de flujo de saturación que se utilice.
- Velocidades de circulación en arcos para vehículos livianos, pesados y buses. La velocidad no debe estar afectada por la demora en las intersecciones.
- Demora de buses o taxis colectivos en los paraderos más relevantes según sus efectos en la circulación.
- Características físicas de las vías entre líneas de detención: longitud y pendiente.
- Características físicas de las intersecciones: ancho de pistas, longitud de pistas cortas, distancia de paraderos a línea de detención, etc.
- Catastro operativo de la red, que describa en detalle la forma de operación de las intersecciones y las vías, las programaciones vigentes y otros antecedentes, con el objetivo de representar adecuadamente la operación de la red en el modelo.

La medición de las variables operativas debe seguir las recomendaciones del MESPIVU.

En el Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)) se entregan diversas recomendaciones para llevar a cabo la modelación. En particular la representación de situaciones complejas de interacción entre pistas o de dependencia entre la capacidad y la programación del semáforo, donde se requiere el uso conjunto de TRANSYT 8S y SIDRA o la aplicación de relaciones simplificadas que buscan incluir esos fenómenos en el modelo de tránsito, como se explicó en la sección 4.3.2. El Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)) presenta también los procedimientos para la asignación de valores a los parámetros del modelo, como los flujos de saturación y los factores de equivalencia.

#### **4.8.2.2 Conformación de redes**

Como se explicó en la sección 4.4.3.2, en el caso de grupos de semáforos que operan de manera coordinada se requiere llevar a cabo un proceso de etapas sucesivas para determinar los límites espaciales y temporales de la red. Este proceso, denominado conformación de redes, puede generar más de una red para un determinado conjunto de semáforos. Además, las definiciones de esas redes pueden cambiar a lo largo del día para tener en cuenta variaciones en la magnitud o el patrón de flujos.

Producto de lo anterior la conformación de las redes se realiza de la siguiente manera:

- En redes coordinadas existentes en las que se considere que su definición es correcta tanto espacial como temporalmente no se requiere la realización de esta etapa de conformación. La periodización vigente determina los períodos de análisis.
- En redes existentes en las que se estime necesario actualizar su definición espacial y/o temporal es necesario realizar el proceso completo de conformación de redes.
- En redes nuevas es necesario realizar el proceso completo de conformación de redes.

Las redes generadas tienen una definición espacial y una periodización que determina la cuantía de la toma de datos y los recursos necesarios para la simulación de la situación actual y la optimización de las programaciones. El procedimiento para conformar las redes se describe en el Manual de “Programación y modelación de semáforos” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

### 4.8.3 Simulación de la situación actual

#### 4.8.3.1 Desarrollo de la simulación

La simulación de una red consiste en correr el programa TRANSYT 8S para estimar ciertos indicadores operativos que se utilizan para verificar si dicho modelo reproduce razonablemente el funcionamiento de la red. El programa debe aplicarse en modalidad “simulación”, ingresando los datos de flujos, velocidades, tiempo de ciclo y programaciones que representan el modelo de tránsito construido.

Como la optimización de las programaciones tiene un efecto más significativo en situaciones de congestión, al disminuir la componente excedente de demoras y detenciones, es recomendable concentrar los esfuerzos en lograr que el modelo de tránsito esté particularmente ajustado a la situación observada en los períodos punta. Por esta razón, la simulación se debe realizar en al menos los dos períodos punta con mayor congestión y aquellos donde se implemente medidas de gestión de tránsito que modifiquen significativamente la operación de la red, como reversibilidad de vías, si no coinciden con los primeros. La simulación debe corresponder a una o más semanas tipo definidas en la periodización de la red.

#### 4.8.3.2 Criterios de validación de la simulación

Para determinar la validez del modelo construido se debe seleccionar un mínimo de 6 rutas (secuencias de arcos) representativas al interior de la red para cada período simulado y en acuerdo con la UOCT. Para esas rutas se debe realizar una comparación de la longitud de las colas vehiculares en los arcos correspondientes, utilizando la longitud de cola excedente observada como valor representativo de ellas. La medición de longitud de cola excedente se debe realizar en conjunto con la de flujos vehiculares y las otras variables operativas, de modo que todas ellas sean consistentes. En la medición de las colas se deben seguir las recomendaciones del MESPIVU.

La validación se realiza comparando la longitud de cola excedente medida con la tasa media de demora aleatoria y por sobresaturación<sup>14</sup> que entrega TRANSYT 8S. En el proceso de comparación se debe tener en cuenta que la estimación de TRANSYT 8S corresponde a un arco (con 1 o más pistas) en unidades VEQ-H/H y, por lo tanto, hay que realizar las conversiones necesarias y comparar valores en unidades de vehículos.

La modelación está validada cuando las diferencias entre los valores de colas vehiculares excedentes observadas y estimadas difieran en menos de 20% en todos los arcos analizados para cada período simulado. En el análisis del cumplimiento de esta condición se requiere aplicar criterio ante situaciones donde no se cumpla por un margen estrecho, porque tanto la medición como la estimación están sujetas a incertezas y aleatoriedad.

#### 4.8.3.3 Ajustes en la modelación

En la medida que existan discrepancias mayores al umbral especificado entre los valores observados y simulados de la longitud de cola excedente, deben incorporarse modificaciones al modelo de red para reducirlas a un nivel aceptable, proceso que se conoce como calibración del modelo. Los cambios pueden afectar tanto a la forma de representar ciertos elementos como al valor de ciertos parámetros.

Es de la mayor importancia que tales cambios tengan buen fundamento y no sean simples ajustes para cumplir la condición de validación. Un aspecto clave en este sentido es examinar al mismo tiempo la situación de la red en todos los períodos simulados. Así el analista puede entender mejor la causa de las discrepancias encontradas y verificar que los cambios que realice son consistentes en los todos los períodos analizados.

### 4.8.4 Optimización de la programación

La determinación de la programación óptima de una red de semáforos es un problema teórico complejo no resuelto analíticamente: cada desfase depende del patrón de llegadas desde el semáforo previo el que, a su vez, depende de las llegadas y desfases aguas arriba, etc. Por esta razón, para obtener la programación óptima se recurre a un método heurístico que realiza sucesivos cambios en la programación y verifica su efecto en un indicador de rendimiento la red.

Las variables que se utilizan para optimizar la programación de una red de semáforos son el tiempo de ciclo, los repartos de tiempo de verde y los desfases. El diseño de fases, verdes mínimos y entreverdes se realiza con los mismos métodos descritos en el sección 4.5.

---

<sup>14</sup> En cada arco corresponde a la columna denominada “RANDOM+OVERSAT”, expresada en VEQ-H/H.

El enfoque que debe aplicarse en la optimización consiste en establecer primero el tiempo de ciclo utilizando un procedimiento especial para eso, determinar luego los repartos por equisaturación y simultáneamente optimizar desfases, todo lo cual está implementado en el programa TRANSYT 8S. Para esto dicho programa utiliza como función objetivo la minimización de un indicador de rendimiento de la red, compuesto por la agregación de demoras y detenciones como se explicó para un caso general en la sección 4.6.6.

#### **4.8.4.1 Tiempo de ciclo de la red**

El indicador de rendimiento de una red poco sensible al tiempo de ciclo dentro un rango de cierta amplitud si paralelamente se optimizan los desfases y se dejan intersecciones en doble ciclo o bien en fases duplicadas, es decir, que cada fase aparece dos veces en un ciclo, no necesariamente con igual duración cada vez. Entonces el problema consiste en determinar una combinación adecuada de tiempo de ciclo e intersecciones con doble ciclo o fases duplicadas.

Para establecer cuál es la combinación óptima se debe utilizar la metodología de Barrientos y Gibson (1988) que está implementada en TRANSYT 8S. Ese método determina un intervalo de soluciones factibles donde se encuentra el ciclo óptimo de la red bajo análisis. Los resultados generados por TRANSYT 8S muestran los intervalos de variación del ciclo óptimo de cada intersección, la configuración de ciclo simple o doble, y los ciclos óptimos de la red. La recomendación es entonces determinar el tiempo de ciclo directamente de los resultados de TRANSYT 8S.

En ciertos casos el método no logra encontrar una solución para el tiempo de ciclo. En ese caso se deben analizar los resultados e identificar las causas de esa situación. Por ejemplo, podría resultar que un grupo de intersecciones tenga como óptimo un ciclo distinto al del resto de la red; ante eso una alternativa es separar la red en dos grupos y realizar una búsqueda de ciclo para cada uno por separado. La situación anterior es una indicación de que la definición de la red debe ser revisada para ajustarse mejor a las condiciones de circulación. En caso que no sea posible generar soluciones para grupos de semáforos dentro de la red original, la búsqueda de ciclo se debe realizar mediante simulaciones de la red con diferentes tiempos de ciclo, utilizando la configuración de ciclos simples/dobles señalada por TRANSYT 8S. Se seleccionará entonces el tiempo de ciclo que genere el valor más bajo del índice de rendimiento de la red y su correspondiente configuración de intersecciones en ciclo simple o doble.

En aquellos semáforos de la red que figuren con ciclo doble en la solución definida, hay que optar entre hacerlos operar con la mitad del tiempo de ciclo seleccionado y que operen con fases duplicadas y el tiempo de ciclo completo. En general, se recomienda usar fases duplicadas por ser más flexible.

Cualquiera sea el caso, el tiempo de ciclo está acotado de acuerdo con lo indicado en la sección 4.5.5.3.

#### **4.8.4.2 Determinación de repartos y desfases en la red**

Definidos el tiempo de ciclo y las intersecciones en ciclo doble o doble verde (fases duplicadas), los repartos y desfases se calculan con TRANSYT 8S. Para los repartos debe utilizarse la opción de equisaturación y para los desfases se optimiza con el programa.

Si se utiliza la opción de fases duplicadas, una vez hecho lo anterior se debe realizar una optimización de repartos. En esta etapa se toma como situación inicial la programación antes determinada y se aplica una optimización de reparto y desfase, con la secuencia de pasos recomendada por el programa, y especificando en la Tarjeta 2 de TRANSYT 8S como nodos a optimizar solamente aquellos en que hay fases duplicadas.

Es importante tener en cuenta que mediante la coordinación de los semáforos de una red es posible inducir determinados comportamientos en los conductores. Un ejemplo de esto es la reducción de la velocidad de circulación. En efecto, optimizando los desfases en ciertos ejes o áreas para una velocidad definida como más apropiada para el entorno en que ellos se ubican, se puede lograr ese efecto pues los conductores observarán que circulan con menos detenciones si ajustan su velocidad a la que está implícita en los desfases. Si bien esto puede implicar un mayor consumo de tiempo de los usuarios, probablemente tenga beneficios importantes producto de un menor número de accidentes, una disminución del nivel de ruido, y otros efectos positivos en el entorno inmediato de las vías.

#### **4.8.4.3 Análisis de la programación**

Terminado el proceso de optimización se debe hacer una revisión concienzuda de la situación de la red. En particular, examinar si hay líneas de detención con grados de saturación muy altos, si hay arcos en que la extensión máxima de la cola haga presumir que se pueden producir problemas de bloqueo o si hay arcos de alto flujo no suficientemente favorecidos por la coordinación.

Producto de este análisis pueden generarse modificaciones del tratamiento de movimientos o de la programación misma. Los beneficios de estas modificaciones deben verificarse a través de los cambios resultantes en el indicador de rendimiento de la red, salvo el caso de cambios efectuados para evitar bloqueos.

Es especialmente recomendable que el análisis se haga considerando la situación de la red en todos los períodos definidos, de modo que las modificaciones sean consistentes.

#### 4.8.4.4 Especificación de la programación

Para introducir los planes de programación en los controladores de los semáforos de la red es necesario formalizar las variables de programación determinadas con T8S en un esquema apto para ese propósito. Esto implica centrarse en cada una de las fases con que operará el semáforo, del modo que se explica a continuación.

En primer lugar se debe tener en cuenta que el programa T8S utiliza una definición particular del inicio de cada fase: en Transyt una fase se inicia cuando termina el tiempo de verde de la fase anterior. Por lo tanto, el instante de inicio de cada fase se calculará como se muestra a continuación:

$$F_i = F_{T8S,i} + AM_{i-1} + RR_{i-1} \quad (4-60)$$

donde

- $F_i$ : instante de inicio de la fase  $i$ , corresponde al inicio del tiempo de verde de esa fase (s)
- $F_{T8S,i}$ : instante de inicio de la fase  $i$  según T8S, corresponde al final del tiempo de verde de la fase anterior a la  $i$  (s)
- $AM_{i-1}$ : duración del período de amarillo de la fase anterior a la fase  $i$  (s)
- $RR_{i-1}$ : duración del período de rojo-rojo de la fase anterior a la fase  $i$  (s)

Los valores de inicio de cada fase deben ajustarse para que  $0 < F_i \leq c$ , dado el carácter cíclico del funcionamiento del semáforo. Es importante tener en cuenta que los inicio de fase así calculados respetan los desfases óptimo implícitos en los valores de  $F_{T8S,i}$ .

A partir de los cambios de fase se pueden determinar directamente los tiempos de verde efectivo y en el semáforo para cada movimiento/fase, pues se cumple:

$$ve = F_k - F_j - l \quad (4-61)$$

donde  $F_k$  y  $F_j$  son los instantes de término e inicio de la fase correspondiente y  $l$  es el tiempo perdido del movimiento. De manera similar el tiempo de verde en el semáforo está dado por:

$$V = F_k - F_j - I \quad (4-62)$$

donde  $I$  es el entreverde del movimiento.

#### 4.8.4.5 Tratamiento de períodos nocturnos

Para la programación de redes de semáforos en períodos nocturnos valen también las recomendaciones señaladas en la sección 4.7.3.6, referidas al uso de indicaciones luminosas intermitentes como forma de lograr una operación más eficiente en horarios de muy bajo flujo vehicular.

### 4.8.5 Reporte del proceso de optimización de las programaciones de redes de semáforos

El proceso de obtención de la programación de una red de semáforos debe reportarse en un informe que se presentará a la UOCT para su revisión y aprobación cuando proceda. El informe debe elaborarse según los requisitos definidos en el Manual de "Programación y modelación de semáforos" ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)). Se deben considerar las etapas de modelación, conformación de redes, simulación y calibración, y optimización de las programaciones según sea el caso.

## 4.9 Control dinámico de tránsito

### 4.9.1 Introducción

La mayor parte de los semáforos del país opera con planes de tiempo prefijados. Cada uno de esos planes consiste en un conjunto de tiempos de operación previamente definidos con información de tránsito recogida en terreno. Los planes de tiempo prefijados operan bajo el supuesto de que los volúmenes de flujo son estables y tienen variaciones pequeñas dentro de cada período y, por lo tanto, el tiempo de ciclo, repartos de tiempo de verde y desfases se mantienen como valores óptimos en todo el lapso de tiempo en que el plan está activo. Sin embargo, esto no sucede exactamente así porque los flujos vehiculares tienen variaciones aleatorias y sistemáticas dentro del período. Estas variaciones implican que los semáforos que funcionan bajo la modalidad de planes prefijados operan en su estado “óptimo” solamente cuando los flujos existentes coinciden con los flujos que determinaron la programación. En otros momentos el semáforo opera de modo sub-óptimo.

Otra situación que produce desajustes operativos en las redes urbanas son el incremento gradual de los flujos en el tiempo y los eventos previstos y no-previstos que alteran la circulación, tales como accidentes y desvíos de tránsito, ocupación de vías debido a faenas constructivas, etc. Estos eventos en períodos punta generan problemas serios de congestión que no pueden ser abordados adecuadamente si no hay intervención sobre las programaciones de semáforos predefinidas. Para superar estos problemas se desarrolló el concepto de control de tránsito dinámico o adaptativo.

La primera generación de sistemas que se adaptaba a la demanda monitoreaba el tráfico continuamente y activaba el plan más apropiado de un conjunto de planes predefinidos. Posteriormente los sistemas utilizaron contadores de tráfico para actualizar datos históricos y producir nuevas programaciones. Esto generaba frecuentes cambios de plan, con los consiguientes problemas de continuidad entre cambios de programación.

A fines de los años 70 se desarrollaron en Inglaterra y en Australia métodos para superar los problemas mencionados. Los nuevos métodos se basaron en el uso de un computador que en línea continuamente monitoreaba los flujos vehiculares en la red y realizaba una serie de ajustes pequeños y frecuentes a las programaciones para hacer más fluida la circulación. Con este enfoque el ajuste de las programaciones es gradual y ocurre continuamente. Pierde importancia entonces la periodización. Actualmente, con el avance tecnológico de los equipos involucrados, el control dinámico se utiliza habitualmente, particularmente en ciudad con altos niveles de congestión.

Las principales ventajas de la regulación de intersecciones semaforizadas mediante control dinámico son las siguientes:

- Mejora la eficiencia en el uso del espacio disponible de las vías urbanas, reduciendo las detenciones, tiempos de viaje y consumo de combustible, particularmente en períodos de alta congestión con variaciones importantes en intervalos cortos.
- Disminuye la congestión generada por trabajos en la vía, incidentes u otras condiciones anormales de tráfico.
- Elimina la necesidad de generar planes de tiempo prefijados, especialmente cuando son necesarias actualizaciones frecuentes debido a cambios importantes de la demanda y/o características de la red.
- Proporciona información adicional sobre la operación de la red vial a partir de los datos capturados por los detectores y las facilidades gráficas proporcionadas por el sistema de control dinámico. Esto facilita la entrega de información a los usuarios en tiempo real sobre las condiciones de circulación de la red.

Las principales desventajas de utilizar control dinámico en vez de planes de tiempo prefijados son las siguientes:

- Requiere disponer de un centro de control con comunicación directa con los controladores y un software especializado que realice la optimización de las programaciones. Estos elementos representan un costo significativo que solamente se justifica cuando los niveles de congestión son considerables y existen variaciones significativas de los flujos dentro de los períodos punta. Estas condiciones se dan solamente en grandes ciudades.
- Además de lo anterior existen costos adicionales correspondientes a la instalación de espiras u otros sensores de tráfico y su mantenimiento periódico.

- La puesta en marcha del sistema y su mantenimiento requiere personal calificado y con experiencia en ese tipo de sistema de control, en aspectos como la calibración de los parámetros que transforman los datos capturados por las espiras en información de flujos vehiculares.

En Chile existen dos sistemas de control dinámico que han sido implementados con éxito en dos ciudades: Santiago y Concepción. En el caso de Santiago se utiliza el sistema SCOOT (Siemens, Inglaterra) y en Concepción el sistema SCATS (RTA, Australia). A continuación se presentan las principales características de dichos sistemas.

#### 4.9.2 El sistema SCOOT

El sistema de control dinámico SCOOT (Split Cycle Offset Optimisation Tool) fue desarrollado por la empresa Siemens en Inglaterra. Este sistema mide continuamente la demanda vehicular en todas las ramas de las intersecciones en las que está implementado y modifica los tiempos de los semáforos para minimizar un Índice de Rendimiento (Performance Index o PI). Este índice es una combinación de demoras, longitudes de cola y detenciones en la red. Las modificaciones en los tiempos se hacen de tal forma que sean lo suficientemente pequeños para no producir impactos en el flujo vehicular, pero también lo suficientemente frecuentes para permitir una rápida respuesta a las condiciones cambiantes del tránsito.

El sistema SCOOT genera Perfiles Cíclicos de Flujo (Cyclic Flow Profile o CFP) basados en la demanda vehicular real que capturan los detectores vehiculares instalados en los accesos.

La unidad fundamental de demanda en SCOOT es el Link Profile Unit (LPU), que es una medida que combina los datos de flujo y ocupación recibidos desde cada detector vehicular. Basado en el CFP generado, SCOOT predice la dispersión y llegada del pelotón de vehículos a la línea de detención aguas abajo. Esto permite que se modele la formación y disipación de las colas vehiculares.

SCOOT incluye tres optimizadores, uno para el tiempo de ciclo, otro para los repartos y uno para los desfases de un conjunto de semáforos. Un área de la ciudad controlada con SCOOT se divide en sectores denominados "regiones", cada una contiene varios "nodos" correspondientes a intersecciones semaforizadas con ciclos idénticos que permitan su coordinación. Los nodos pueden funcionar también con ciclos dobles. Los límites de cada región se definen donde los arcos sean lo suficientemente largos como para permitir una dispersión alta de pelotones que minimice la necesidad de coordinación.

El funcionamiento de los optimizadores de SCOOT se describe brevemente a continuación.

El optimizador de tiempo de ciclo opera por región una vez cada cinco minutos o cada 2,5 minutos si el tiempo de ciclo se incrementa muy rápidamente. Identifica el nodo crítico de la región y opera tratando de mantener la saturación de ese nodo por debajo de 90% en cada fase. Si estima que un cambio en el tiempo de ciclo debe ser realizado, lo puede incrementar o disminuir en 4, 8 o 16 segundos, dependiendo de la duración del ciclo en ese momento.

El optimizador de repartos, opera en cada cambio de fase analizando el tiempo de verde y rojo actuales para determinar la posibilidad de aumentar, rebajar o mantener la duración de la fase. El optimizador de repartos, utiliza incrementos o reducciones entre 1 y 4 segundos

El optimizador de desfases se activa una vez por ciclo en cada nodo, analizando la conveniencia de mantener, atrasar o adelantar el inicio de la próxima fase. El optimizador de desfases trabaja con incrementos o reducciones de 1 a 4 segundos.

Mediante la combinación de pequeños cambios en estas tres variables, SCOOT puede responder a cambios puntuales en la demanda y cambios sostenidos, manteniendo la coordinación del sistema. Los ajustes que genera SCOOT se envían a los controladores de semáforos mediante líneas telefónicas análogas o digitales especializadas. El controlador contesta al computador central que aceptó la instrucción o bien informa una condición de falla.

Es necesario contar con buenos datos de tráfico para que el sistema pueda responder a adecuadamente a los cambios en el flujo. Normalmente se requieren detectores en cada arco de la red controlada dinámicamente, los que se ubican habitualmente al inicio de los arcos. Normalmente se utilizan espiras inductivas, pero se encuentran en desarrollo otros métodos de detección como los que utilizan cámaras de video. Cuando los vehículos pasan sobre el detector, SCOOT convierte la información en LPU y CFP.

Una vez que se establece la necesidad de utilizar el sistema SCOOT se debe realizar un proceso de ajuste o validación de un conjunto de parámetros relevantes del modelo que son utilizados para el proceso de optimización de las programaciones. Ese proceso de validación es una tarea compleja que debe ser realizada por personal altamente calificado y con experiencia en la materia.

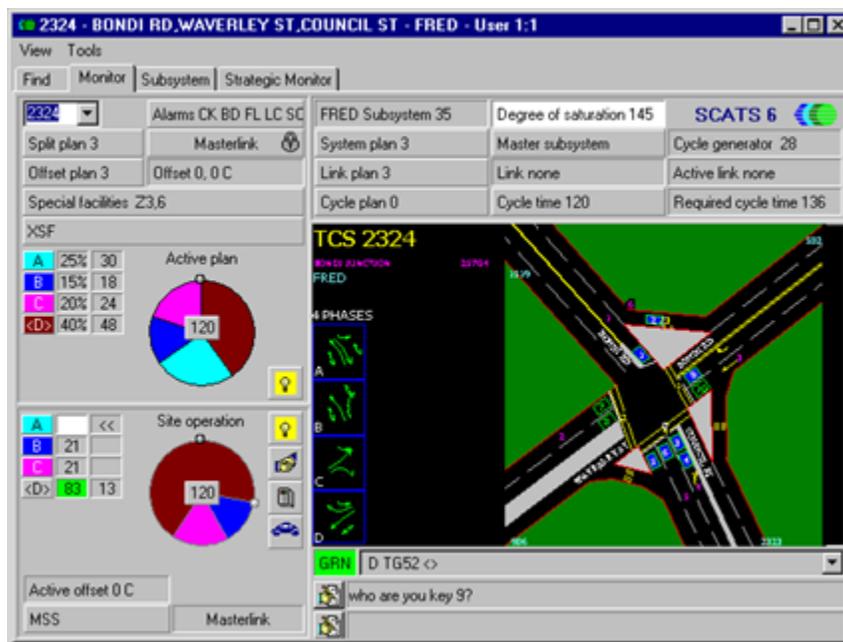
### 4.9.3 El sistema SCATS

El sistema de control dinámico SCATS (Sidney Coordinated Adaptive Traffic System) fue desarrollado en los años 70 por la Roads and Traffic Authority of New South Wales (RTA) de Australia.

El sistema SCATS determina el tiempo de ciclo, repartos y desfases en intersecciones y cruces a mitad de cuadra. Mediante detectores de vehículos es capaz de modificar esas variables y optimizar la operación de la red para las condiciones de circulación existentes. También tiene la capacidad de operar los semáforos con planes de tiempo prefijados. La conexión de las intersecciones con el centro de control pueden ser permanente o solamente cuando se requiera.

El sistema registra automáticamente las alarmas y eventos relevantes generados durante la operación de la red, los cuales pueden ser visualizados mediante una interfaz gráfica. El sistema opera normalmente en forma automática, pero es posible intervenir manualmente su operación ante eventos no programados. La siguiente figura muestra una pantalla típica de monitoreo de una intersección.

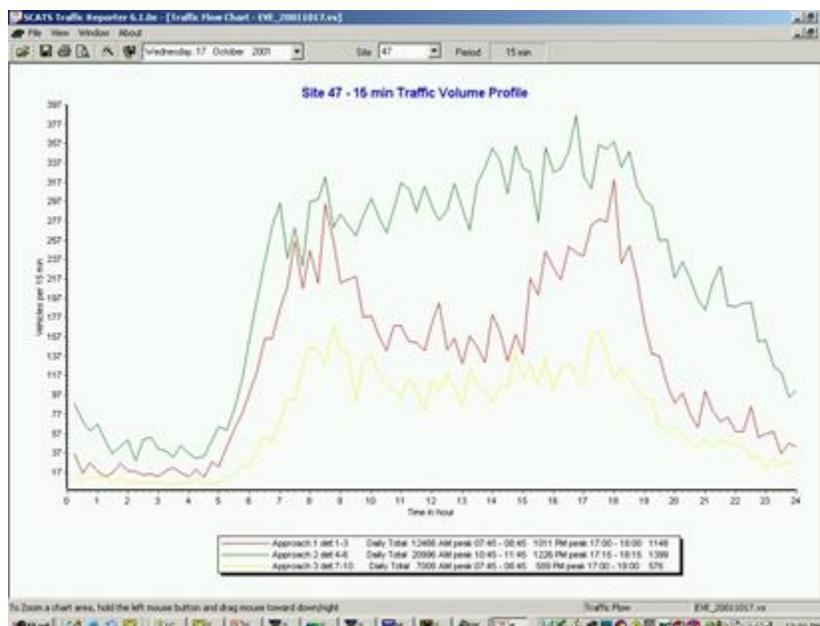
Figura 4-18 Pantalla de monitoreo de intersección en SCATS



Las principales características del sistema SCATS son las siguientes:

- El sistema SCATS tiene la ventaja de poder ser operado en forma de tiempos prefijados al principio y luego ser transformado a un sistema dinámico para el control y monitoreo del tráfico.
- SCATS proporciona estrategias flexibles para manejo del tráfico; en algunos casos puede ser apropiado utilizar la selección de la duración del ciclo basándose en una periodización, junto con la selección adaptativa de los repartos y de la selección por volumen de los ajustes secuenciales. En otra área de la ciudad puede ser apropiado utilizar el control adaptativo completo de los tres parámetros, excepto durante las horas punta en que la selección de la duración del ciclo sea por horario.
- Permite la asignación de derecho preferente de paso a ciertos vehículos.
- SCATS toma decisiones basándose en datos reales, provenientes de los detectores y de los controladores instalados. En caso de que los sistemas de detección fallen la intersección puede pasar a operar con planes de tiempo prefijado.
- SCATS transforma datos recogidos por los detectores de vehículos y los indicadores de operación de la red en información útil, expresada en unidades fácilmente interpretables por el operador. Es posible incluso estudiar los procesos de toma de decisiones que realiza el sistema a partir de los datos que se recopilan en cada instante. La siguiente figura muestra un diagrama con el perfil de flujo observado durante distintos días.

Figura 4-19 Ejemplo de despliegue del perfil de flujo



- SCATS detecta automáticamente fallas en los sistemas y genera reportes para que sean resueltos por los encargados del mantenimiento de los distintos dispositivos de terreno. Esto incluye lámparas, controlador, comunicaciones, errores en el ingreso de datos al sistema, etc.
- SCATS puede ser implementado en un plazo breve, un sistema típico de 60 intersecciones con un solo computador regional puede entrar en operación en menos de 12 meses.
- SCATS permite entregar prioridad a buses, para ello se requiere que esos vehículos cuenten con un dispositivo que permita su detección al aproximarse a una intersección.
- SCATS permite supervisión remota, es posible controlar el sistema desde un computador con acceso a la red donde se encuentra el sistema o mediante modem.

#### 4.9.4 Programación con sistemas de control dinámico

Como ya se mencionó, en un sistema de control dinámico la programación de los semáforos se optimiza automáticamente en función de los datos recogidos por los sensores instalados en terreno. Desde ese punto de vista no existe la necesidad de establecer una periodización ni optimizar con otro programa computacional la programación, como se requiere en un sistema con planes prefijados.

No obstante lo anterior, cualquier sistema de control dinámico requiere como datos de entrada el diseño operativo y las restricciones a la programación (verdes mínimos, entreverdes, tiempo de ciclo mínimo y máximo) en cada intersección y a nivel de red. En función de esa información básica y los datos de terreno es que se produce la optimización de las programaciones.

El diseño operativo y las restricciones a la programación se deben establecer siguiendo lo indicado en la sección 4.5 de este documento. Es necesario además tener en cuenta la seguridad de los usuarios de acuerdo con las recomendaciones y criterios que se indican en la sección 4.10 siguiente.

#### 4.10 Diseño seguro para todos los usuarios

El diseño de una intersección semaforizada se refiere tanto a aspectos geométricos (diseño físico) como a la manera en que funciona (diseño operativo). Este diseño debe tener en cuenta desde el principio la seguridad de todos los usuarios para minimizar el riesgo de que ocurran accidentes de tránsito. Existen dos aspectos fundamentales que deben tenerse en cuenta al diseñar la intersección.

El primer aspecto se refiere a los conflictos entre movimientos de vehículos, peatones o ciclistas que se cruzan o unen. Esto se analiza mediante la definición de puntos de conflicto y el cálculo de los tiempos de entreverde. El entreverde debe ser tal que permita despejar el área de conflicto antes de que el flujo opositor llegue a ella después de recibir luz verde. Otro factor importante es la definición de tiempos mínimos de verde orientados a generar tiempos de cruce adecuados para los peatones. Todo esto fue tratado en la sección 4.5 de este documento.

El segundo aspecto es más difícil de cuantificar ya que está relacionado con la percepción de los usuarios acerca del diseño físico y la distribución de los elementos en la intersección. En este sentido una de las

consideraciones más importantes es la posición de los postes y cabezales del semáforo. Ellos deben colocarse de manera que sean claramente visibles solamente para aquellos conductores, peatones o ciclistas que estos controlan, y no inducir a confusión a los restantes usuarios. En las secciones 4.10.4 y 4.10.5 se entregan pautas al respecto.

A partir de las recomendaciones y requerimientos señalados aquí, y la experiencia del profesional a cargo del proyecto de semaforización, se debe generar el diseño de la intersección, teniendo en cuenta que el diseño físico y operativo son tareas interrelacionadas que deben ser abordadas en forma simultánea. El diseño físico debe respetar la normativa y recomendaciones aplicables, y el diseño operativo debe seguir las pautas que se describen a continuación.

#### **4.10.1 Diseño operativo de la intersección**

El objetivo del diseño operativo de una intersección semaforizada es maximizar el flujo de vehículos, peatones y ciclistas, minimizando las demoras y manteniendo un alto nivel de seguridad de tránsito para todos ellos.

Todo proyecto de semaforización debe considerar una etapa de diseño operativo que, además, debe realizarse en coordinación con el diseño físico de la intersección de modo que se retroalimenten mutuamente hasta generar una solución consistente en aspectos geométricos, operativos y de seguridad de tránsito.

El diseño operativo de la intersección debe ser consistente con los volúmenes de tráfico y los movimientos realizados por los vehículos, junto con los requerimientos de peatones y ciclistas. Idealmente cada movimiento vehicular debe estar asignado a pistas exclusivas, pero a menudo eso no es posible o no es eficiente en el uso del espacio vial. Por lo tanto, es necesario que distintos movimientos compartan pistas.

Los movimientos pueden organizarse de distintas formas según las características físicas de la intersección y la magnitud de los flujos. A modo de recomendaciones generales pueden considerarse las siguientes:

- Aceptar movimientos conflictivos, tales como virajes a la izquierda que enfrentan movimientos prioritarios en la misma fase, donde el grado de conflicto es aceptable y la circulación es suficientemente segura.
- Eliminar movimientos, como los virajes a la izquierda, pero teniendo en cuenta que no se generen problemas operativos en otras intersecciones hacia donde se desvíe el movimiento no permitido y que las alternativas sean razonables en el sentido de que no produzcan recorridos adicionales excesivos.
- Generar virajes sin oposición durante una parte o la totalidad del tiempo de verde. En el primer caso definiendo, por ejemplo, el término adelantado del tiempo de verde del movimiento opositor.
- Permitir virajes a la izquierda simultáneos desde distintos sentidos en una misma vía cuando existe suficiente espacio en la intersección.
- Ensanchar los accesos o aumentar el número de pistas, definiéndolas con el ancho mínimo aceptable para los vehículos que circulan por la vía.
- Generar pistas especiales para virajes, con una longitud acorde a la magnitud del movimiento.
- Combinar el período de verde de movimientos vehiculares y peatonales cuando estos se puedan realizar con un nivel adecuado de seguridad.
- Generar distintas secuencias de fases en distintos períodos para adecuar el funcionamiento de la intersección a los cambios en los patrones de demanda.

La aplicación de estas recomendaciones generales y las que se indican a continuación, junto con la experiencia del diseñador son un aspecto relevante para que las intersecciones operen de manera eficiente y segura.

#### **4.10.2 Facilidades explícitas para peatones y ciclistas**

En algunas intersecciones los peatones experimentan conflictos severos con los vehículos incrementando la posibilidad de accidentes. El conflicto más frecuente se produce entre vehículos que viran y los peatones que en esa misma fase tienen derecho preferente de paso. Si bien la normativa establece que esos vehículos deben detenerse y permitir el paso de los peatones o ciclistas, eso no siempre ocurre, generando situaciones riesgosas que producen atropellos.

El siguiente cuadro muestra las distintas alternativas de facilidades para peatones en intersecciones semaforizadas. En función de las condiciones propias de cada lugar debe determinarse la opción más apropiada.

**Cuadro 4-11 Alternativas de facilidades para peatones en intersecciones semaforizadas**

Alternativa	Descripción
Semáforo con fase peatonal y vehicular conjunta	Es la alternativa más común, combina en una misma fase la circulación de vehículos que viran y peatones que cruzan la vía perpendicular, pero con preferencia para estos últimos. Esta alternativa es útil en vías unidireccionales o en vías bidireccionales con niveles de conflicto aceptables entre vehículos y peatones.
Semáforo peatonal	Este tipo de semáforo se justifica en tramos de vía o intersecciones a partir del nivel de conflicto entre peatones y vehículos representado por el indicador $PV^2$ . En este caso si el semáforo se ubica en un tramo de vía, el dispositivo debe operar activado por botoneras peatonales; si se ubica en una intersección podría requerirse espiras y botoneras ubicadas de forma que todos los usuarios tengan demoras aceptables y adecuadas condiciones de seguridad para cruzar la intersección. En función de esto, si el semáforo está inserto en una red y el ciclo común es alto entonces debe funcionar con ciclo doble y si la intersección está aislada entonces debe funcionar con el tiempo de ciclo más bajo posible. De otro modo la demora peatonal (ver sección 4.6.3), luego de activar la botonera, puede ser excesiva, haciendo que los peatones ignoren la botonera y crucen aprovechando brechas.
Semáforo con fase peatonal exclusiva	<p>Corresponde a una intersección semaforizada típica, pero que incluye una fase peatonal exclusiva donde todos los vehículos reciben luz roja y todos los peatones luz verde. La fase peatonal puede ser activada con botoneras si la demanda peatonal tiene una alta variabilidad. Como referencia es conveniente considerar una fase exclusiva para los peatones cuando:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ El flujo peatonal que cruza un acceso es igual o superior a 300 peatones/h.</li><li>▪ El flujo vehicular que vira es mayor a 720 veh/h y la corriente peatonal prioritaria tiene un flujo mayor a 50 peatones/h.</li><li>▪ Existen situaciones especiales tales como un número significativo de ancianos o personas con alguna discapacidad.</li></ul> <p>Siempre es necesario considerar que la definición de una fase peatonal exclusiva puede llegar a ser inconveniente si el tiempo de ciclo se incrementa en demasía y los peatones optan por cruzar con luz roja debido a la excesiva demora.</p>
Semáforo con cruce peatonal en dos etapas (desfasado)	Se aplica en vías bidireccionales con dos o más pistas por sentido. Los peatones cruzan una de las calzadas a la vez en distintas fases del semáforo. Requiere un adecuado espacio de almacenamiento de peatones en la mediana de la vía. Contribuye a disminuir los tiempos de verde mínimos.
Semáforo con cruce peatonal desplazado	<p>Se aplica en intersecciones congestionadas con flujos peatonales importantes y que, por lo tanto, presentan elevados niveles de conflicto entre vehículos y peatones, principalmente entre vehículos que viran a la derecha y los peatones que cruzan en la misma fase.</p> <p>En esta alternativa el cruce peatonal se desplaza aguas abajo de la intersección en una distancia apropiada al tipo de vehículo que circula por la vía, de forma tal que al menos se puedan almacenar 1 o 2 vehículos por pista y que los conductores puedan percibir claramente que existe otra línea de detención asociada al cruce de peatones. Para lograr lo anterior, y a la vez evitar extender demasiado el recorrido de los peatones, el cruce peatonal debe estar desplazado entre 20 y 50 metros de la intersección semaforizada. La solución puede incluir un cruce en dos etapas (desfasado) en vías bidireccionales.</p>

---

Semáforo con cruce peatonal con detectores de personas	<p>Corresponde a un cruce de peatones a mitad de cuadra, con botoneras, que incluye sensores adicionales para hacer más segura y eficiente su operación. En este tipo de cruce existen dos clases de sensores, aquellos que se ubican en la vereda y los que se asocian al área de cruce.</p> <p>El sistema de detección en la vereda debe ser capaz de mantener activa la petición de fase peatonal realizada con las botoneras cuando existan peatones esperando cruzar y cancelarla si todos los peatones cruzan, por brecha, antes de recibir luz verde. Esto último elimina la frustración de los conductores cuando enfrentan la luz roja pero nadie cruza. Los sistemas de detección pueden ser instalados en la misma vereda (sistemas activados por presión) o en postes (cámaras de video). Se debe tener especial cuidado en cubrir completamente el área de espera de los peatones. Para esto se deben conocer las características técnicas de los detectores utilizados y observar en terreno las áreas donde los peatones típicamente esperan.</p> <p>Los sensores enfocados al área de cruce deben detectar a las personas caminando (incluso a bajas velocidades) y entregar señales al controlador para modificar la extensión del entreverde peatonal según la demanda existente, alargando su duración hasta su valor máximo si todavía existen peatones (más lentos) cruzando al final del verde normal o reduciéndolo al mínimo si todos han terminado de cruzar. Es particularmente importante que los sensores sean capaces de distinguir rápidamente a los peatones que ingresen al área de cruce al final del verde peatonal.</p> <p>Este tipo de cruce generalmente disminuye las demoras de peatones y vehículos con respecto a un cruce peatonal tradicional.</p>
--	---

---

Un aspecto común a las soluciones anteriores es la necesidad de dimensionar el ancho del cruce peatonal según la demanda máxima de peatones, de modo que puedan cruzar manteniendo una densidad razonable. Para esto se deben respetar las recomendaciones del Capítulo 6 del Manual de Señalización de Tránsito.

En los casos donde se proponga el uso de soluciones que requieran cambios significativos en la forma de circular de peatones, ciclistas o conductores, es recomendable que se implemente una campaña de información y educación vial que oriente a los usuarios sobre el objetivo de los cambios y forma correcta de circular por el lugar.

### 4.10.3 Otras consideraciones

Las obras y diseños viales asociados a un proyecto de semaforización deben respetar la normativa aplicable y tener en cuenta las recomendaciones de diseño vial del REDEVU.

En particular, para instalar un semáforo en una intersección donde alguno de los accesos tiene pendiente de bajada, se deben considerar los siguientes requisitos para disminuir los riesgos de accidentes ante la dificultad de algunos vehículos (vehículos pesados, típicamente) de detenerse ante una luz roja cuando circulan en bajada:

- Si la velocidad de diseño de la vía con pendiente de bajada es igual o superior a 60 km/h entonces 60 metros antes de la línea de detención la pendiente no debe superar el 4%. Si la velocidad de diseño es menor a 60 km/h entonces esa longitud puede reducirse a 40 metros.
- Además de lo anterior, se debe tratar de disponer de un tramo de 20 metros antes de la línea de detención con una pendiente cercana al mínimo posible (determinado por la evacuación de aguas lluvias).

En caso que no sea posible modificar las características de las vías para lograr las pendientes señaladas, no debe instalarse el semáforo a pesar que se cumpla alguno de los criterios de justificación. No obstante lo anterior, y en casos excepcionales debidamente analizados, la UOCT puede autorizar la instalación del semáforo a pesar de que no se cumplan las condiciones geométricas antes señaladas.

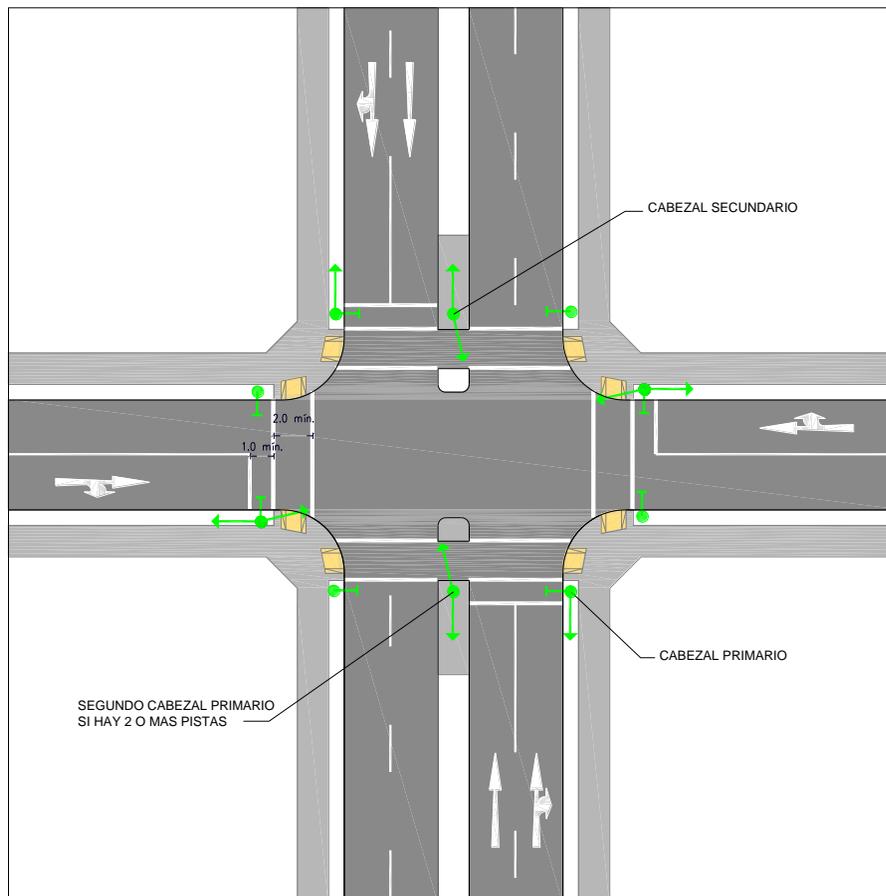
### 4.10.4 Ubicación de postes de semáforos

Los cabezales de los semáforos deben ubicarse en postes de semáforos cuyas características están definidas en las “Especificaciones Técnicas para la Instalación de Semáforos de la UOCT” ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)). No se debe utilizar otro tipo de postes.

Para cada calzada debe existir al menos un cabezal primario y un cabezal secundario, de forma que, al acercarse a una intersección, los conductores perciban las indicaciones de al menos dos cabezales vehiculares a una distancia de 80 metros. Cuando el límite de velocidad sea mayor que 60 km/h, dicha distancia debe ser 200 metros, sin la presencia de neblina. En caso que lo anterior no pueda lograrse, la presencia del semáforo debe ser anunciada mediante la señal preventiva PO-11.

El cabezal primario debe instalarse en un poste al lado derecho de la calzada, idealmente un metro atrás de la línea de detención, pero a no más de dos metros de ella. El cabezal secundario debe ubicarse en un poste al lado izquierdo de la calzada, en forma diagonal-opuesto del primario, y que puede ser en el mismo poste del cabezal primario del sentido opuesto. Esta configuración básica se muestra en el siguiente esquema.

**Figura 4-20 Diseño básico para localización de postes de semáforos de una intersección**



El objeto del cabezal primario es indicar claramente a los conductores la posición de la línea de detención y el cruce peatonal. El cabezal secundario refuerza al cabezal primario y es más visible para los vehículos que esperan justo antes de la línea de detención. En el caso de que existan elementos que obstruyan la visibilidad del cabezal primario, debe considerarse su instalación en un poste con brazo.

Es fundamental asegurar que la visibilidad de los cabezales no sea obstruida en el tiempo por la presencia de letreros, postes, vegetación u otros elementos. Lo anterior, debe verificarse al menos una vez al año, preferentemente en primavera, como parte del programa de mantenimiento de los semáforos. Asimismo, se debe asegurar que no existan avisos, propaganda u otros objetos que distraigan al conductor en las cercanías de los cabezales.

Toda nueva instalación debe cumplir estos requerimientos y las instalaciones antiguas deben ajustarse a ellos en la medida en que sea necesario modernizar los equipos utilizados.

Los criterios básicos ya señalados son aplicables a un número importante de situaciones, sin embargo, existen otras configuraciones geométricas que requieren una disposición especial de postes (postes simples y con gancho) y lámparas.

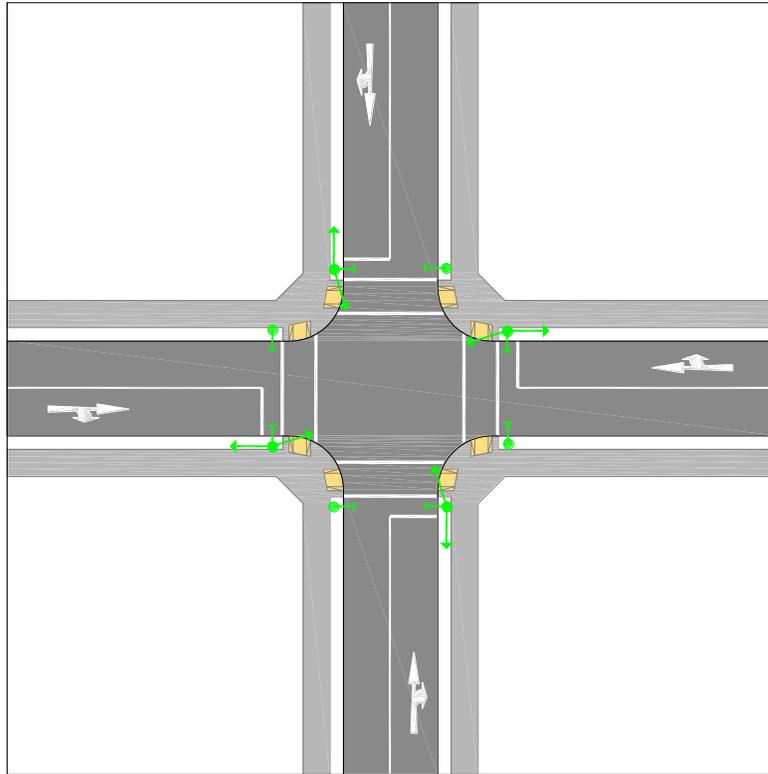
En las siguientes secciones se muestran algunos ejemplos de localización de postes, distinguiendo postes simples y postes con gancho o brazo, botoneras, vallas peatonales, etc. para los casos que ocurren más frecuentemente. Estos ejemplos no corresponden a diseños que puedan aplicarse directamente en terreno sino a aplicaciones ficticias que deben ser utilizadas como referencia para el diseño de cada situación real analizada.

En algunos ejemplos se muestra el uso de vallas peatonales, elemento fundamental para lograr que los peatones sigan trayectorias seguras en intersecciones complejas o con características especiales.

#### 4.10.4.1 Intersección en cruz con una pista por sentido

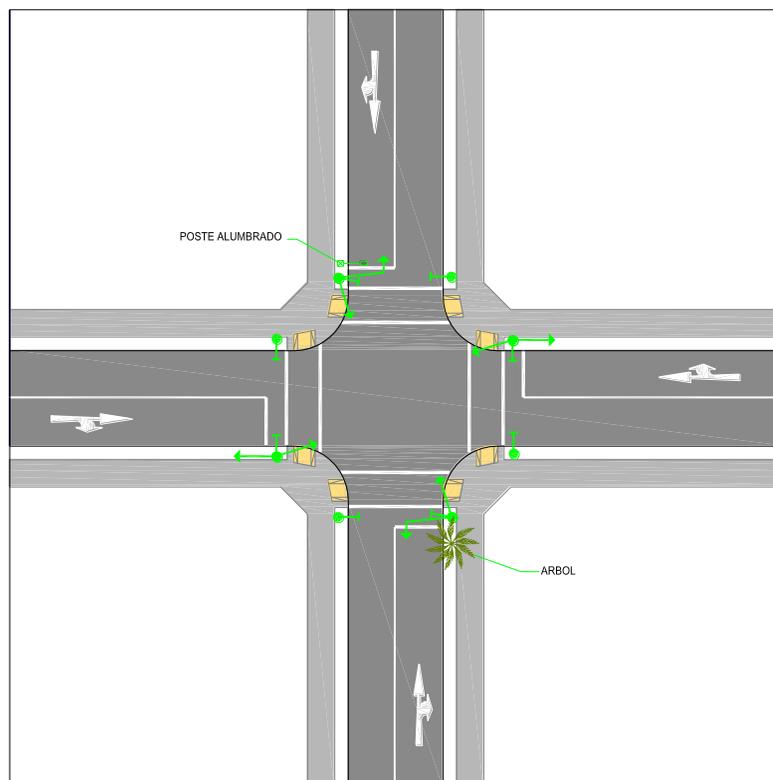
En este caso basta considerar dos lámparas de semáforo por acceso, procurando que la ubicación del poste y lámpara tengan buena visibilidad. La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

**Figura 4-21** Diseño intersección en cruz, accesos bidireccionales y una pista por sentido



En el caso de que la visibilidad del poste primario se vea obstaculizada por elementos como árboles, postes de alumbrado o cualquier otro mobiliario urbano, debe considerarse un poste con gancho o brazo, de modo que la lámpara sea visible al acercarse a la línea de detención. La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

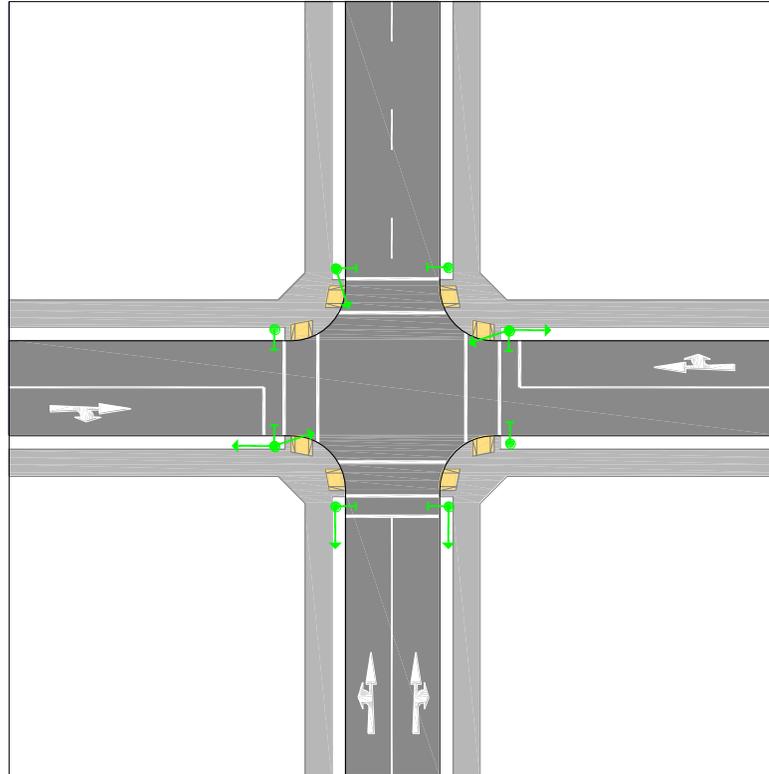
**Figura 4-22** Diseño intersección en cruz, accesos bidireccionales y una pista por sentido, si existen problemas de visibilidad



#### 4.10.4.2 Intersección en cruz con vía principal unidireccional y secundaria bidireccional con una pista por sentido

En este caso, la ubicación y número de lámparas por acceso es una combinación de tres lámparas para el acceso unidireccional y dos para el bidireccional. La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

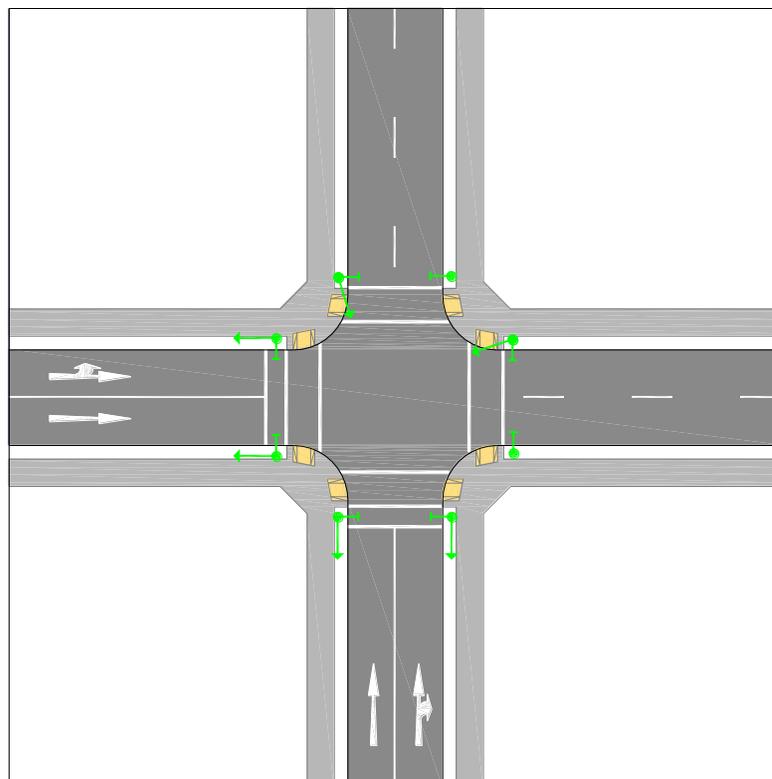
**Figura 4-23** Diseño intersección en cruz, acceso principal unidireccional y secundarios bidireccionales



#### 4.10.4.3 Intersección en cruz con accesos unidireccionales

En este caso deben considerarse tres lámparas por acceso. La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

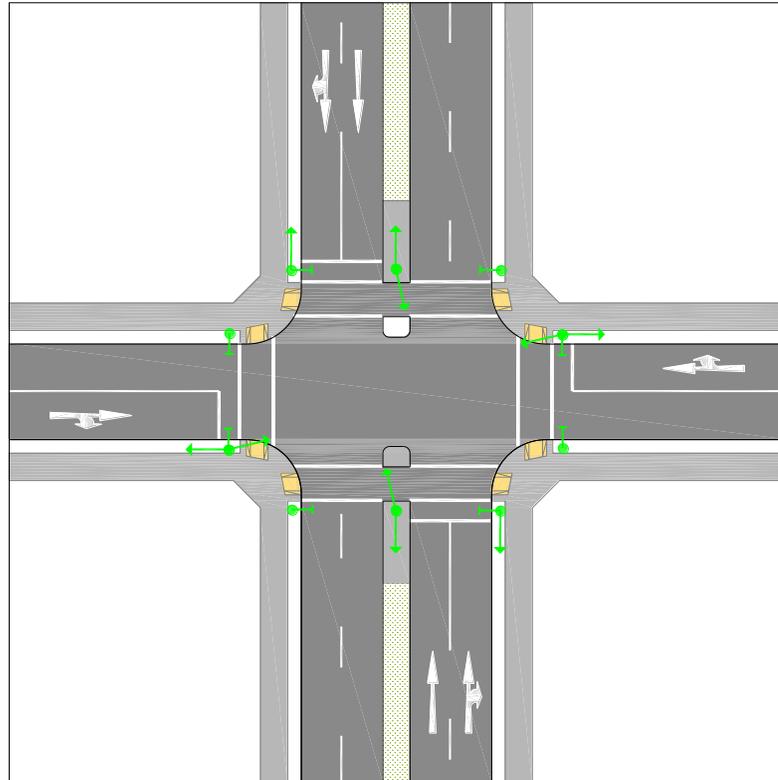
**Figura 4-24** Diseño Intersección en cruz, ambos accesos unidireccionales



#### 4.10.4.4 Intersección en cruz con dos pistas por sentido y mediana en vía principal, y una pista por sentido en vía secundaria

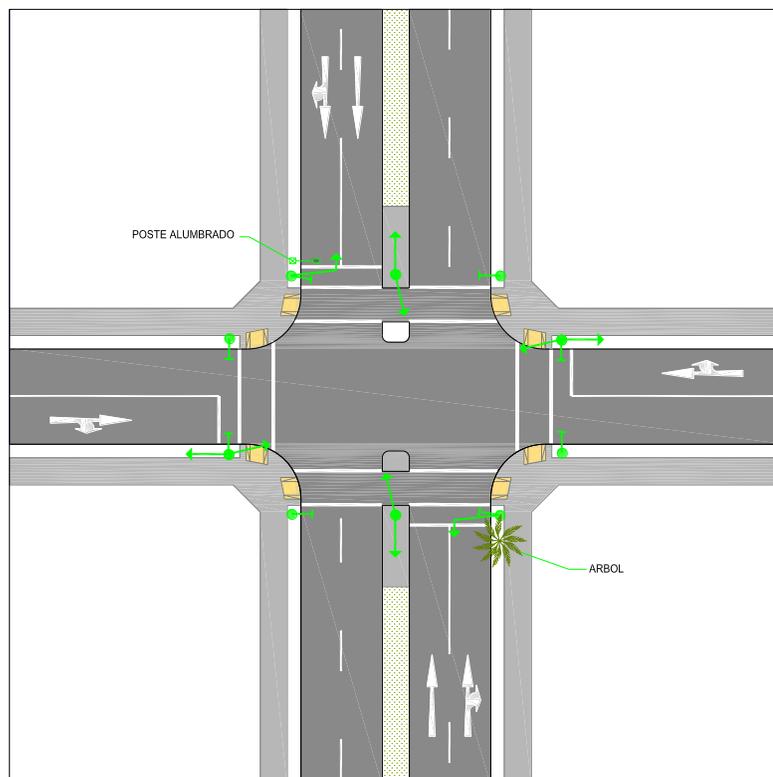
La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

**Figura 4-25** Diseño intersección en cruz con dos pistas por sentido y mediana en vía principal y una pista por sentido en vía secundaria



Si existen elementos que obstruyan la visual de la lámpara del semáforo debe contemplarse un poste con gancho. La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

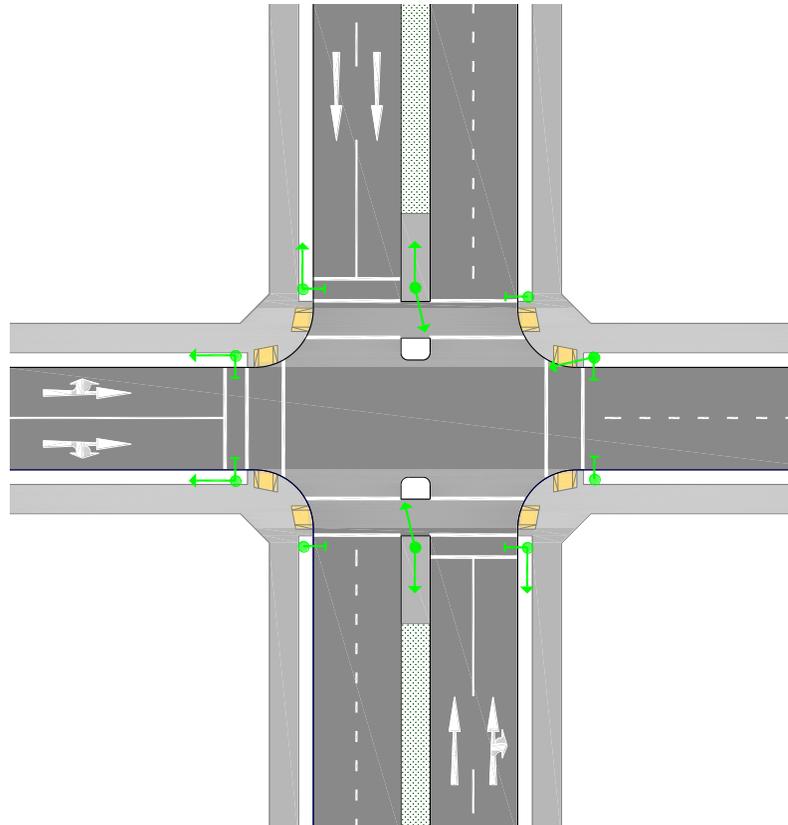
**Figura 4-26** Diseño intersección en cruz con dos pistas por sentido y mediana en vía principal y una pista por sentido en vía secundaria, cuando existen problemas de visibilidad



#### 4.10.4.5 Intersección en cruz con dos pistas por sentido con mediana por la vía principal y vía secundaria unidireccional

La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

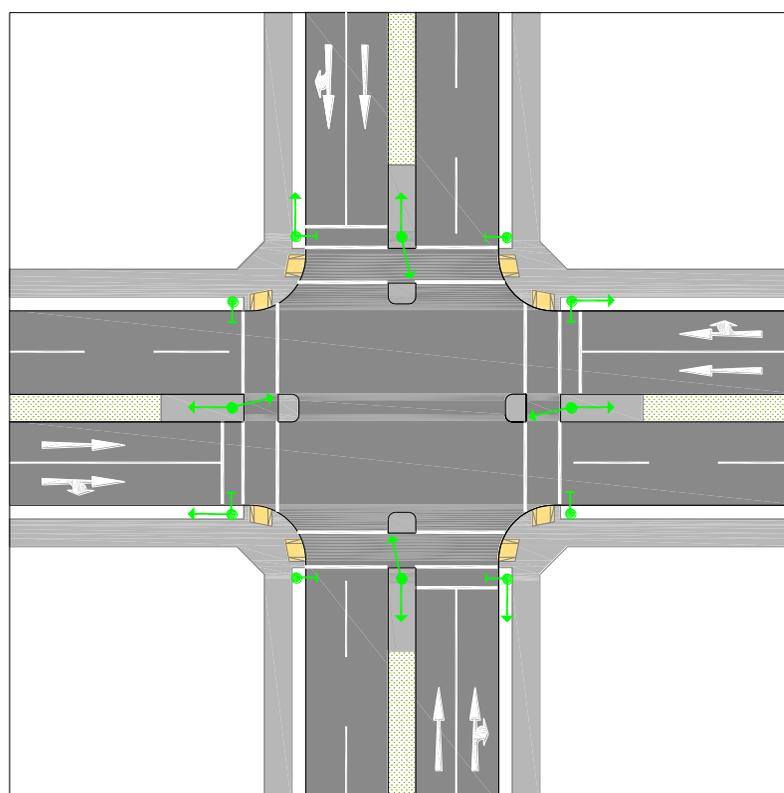
**Figura 4-27 Diseño Intersección en cruz, acceso principal con mediana y secundaria unidireccional**



#### 4.10.4.6 Intersección en cruz con accesos bidireccionales y medianas

La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

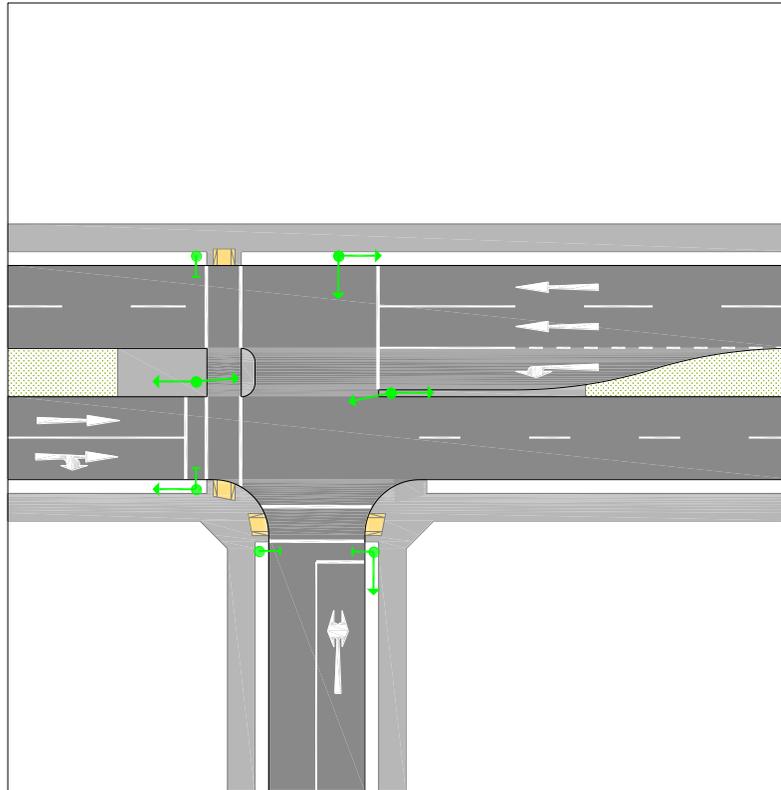
**Figura 4-28 Diseño intersección en cruz con accesos bidireccionales y medianas**



#### 4.10.4.7 Intersección en “T” con pista de viraje a la izquierda

La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

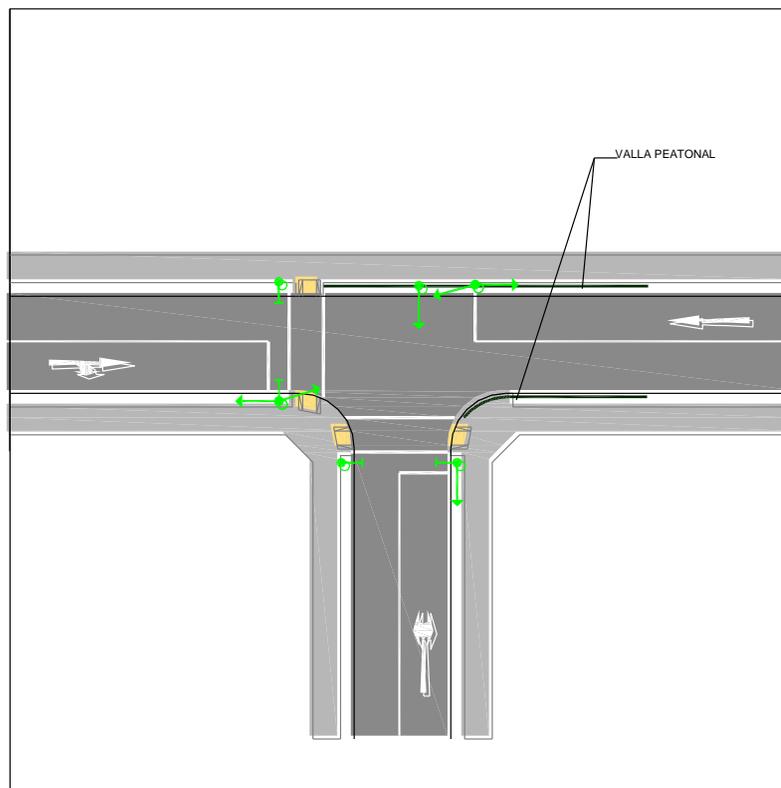
Figura 4-29 Diseño intersección en T con viraje a izquierda



#### 4.10.4.8 Intersección en “T” con vías bidireccionales

La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración. En este caso es necesario el uso de vallas peatonales para encauzar la circulación de los peatones.

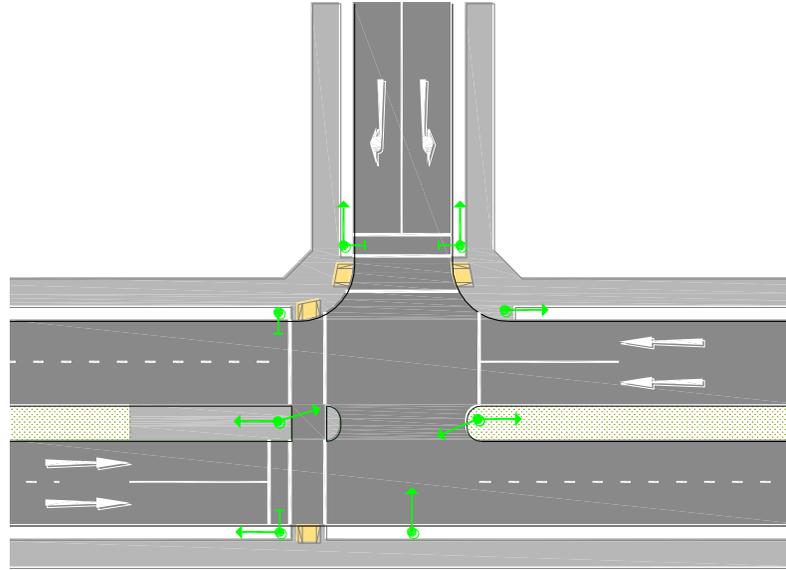
Figura 4-30 Diseño intersección en “T” con vías bidireccionales



#### 4.10.4.9 Intersección en "T" con vía principal bidireccional y secundaria unidireccional

La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

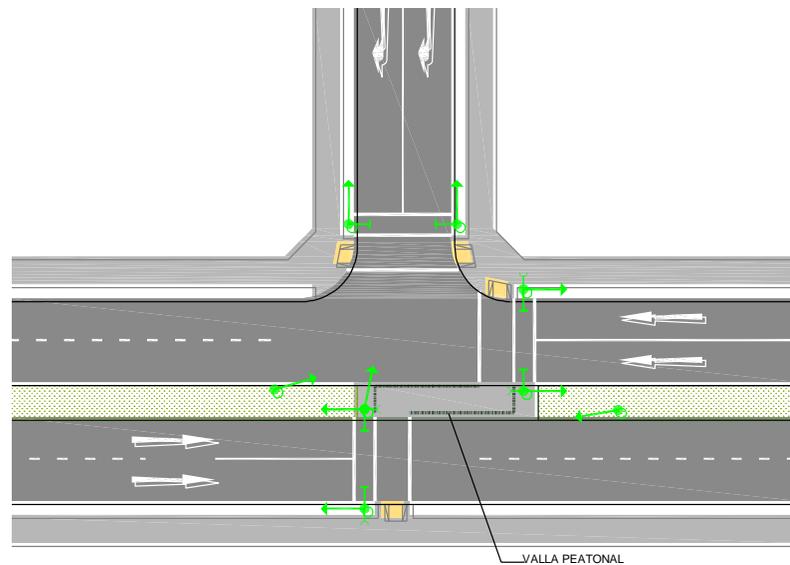
**Figura 4-31** Diseño intersección en "T" con vía principal bidireccional y secundaria unidireccional



#### 4.10.4.10 Intersección en "T" con vía principal bidireccional, secundaria unidireccional y paso peatonal desfasado

La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración. En este caso es necesario el uso de vallas peatonales para encauzar la circulación de los peatones en la mediana.

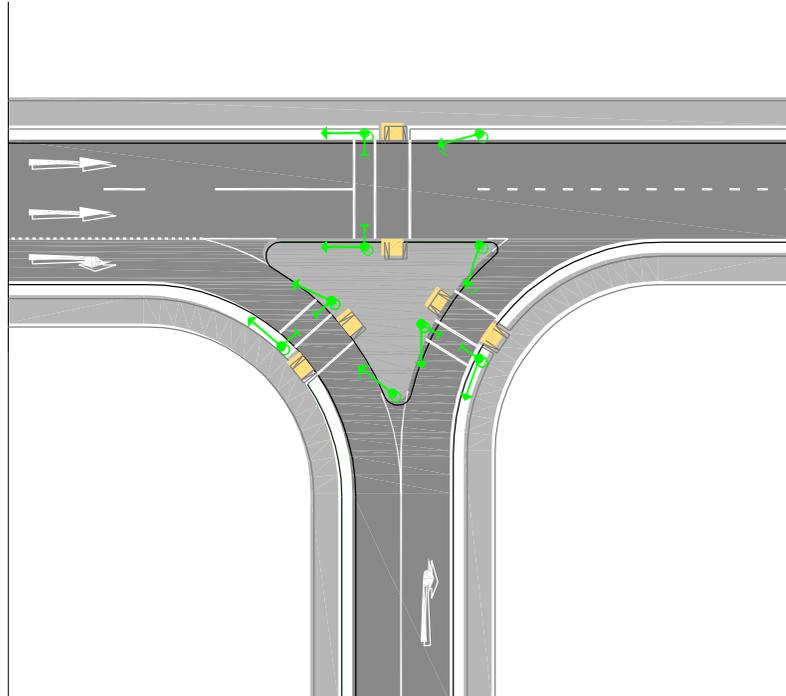
**Figura 4-32** Diseño intersección en "T" con vía principal bidireccional, secundaria unidireccional y paso peatonal desfasado



#### 4.10.4.11 Intersección en “T” con isla peatonal

La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

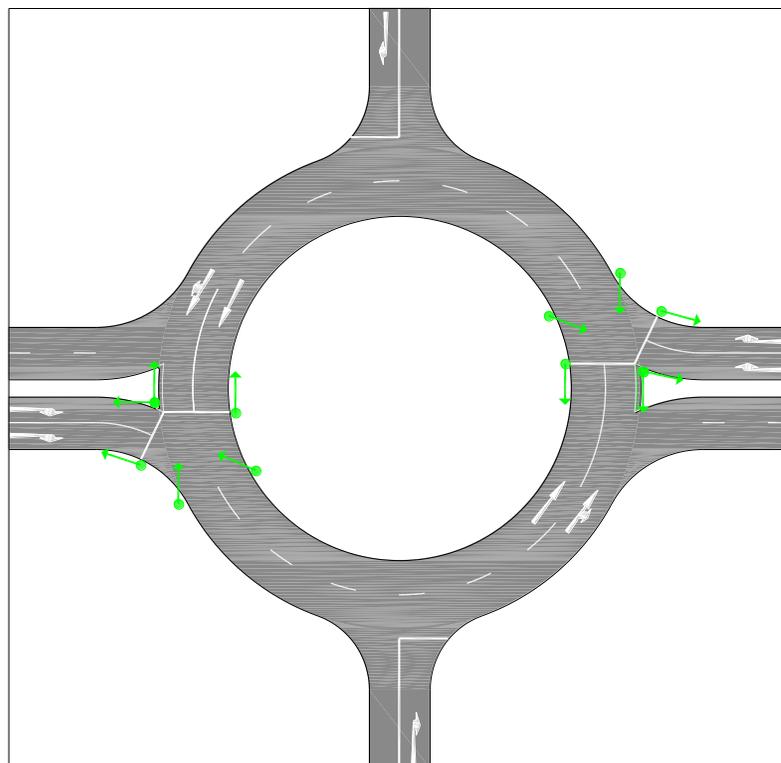
Figura 4-33 Diseño intersección en “T” con isla peatonal



#### 4.10.4.12 Rotonda semaforizada

Ante ciertas condiciones de demanda podría ser necesario semaforizar los accesos a una rotonda existente. La siguiente figura muestra el esquema tipo de esta configuración.

Figura 4-34 Diseño tipo para acceso en rotonda semaforizada



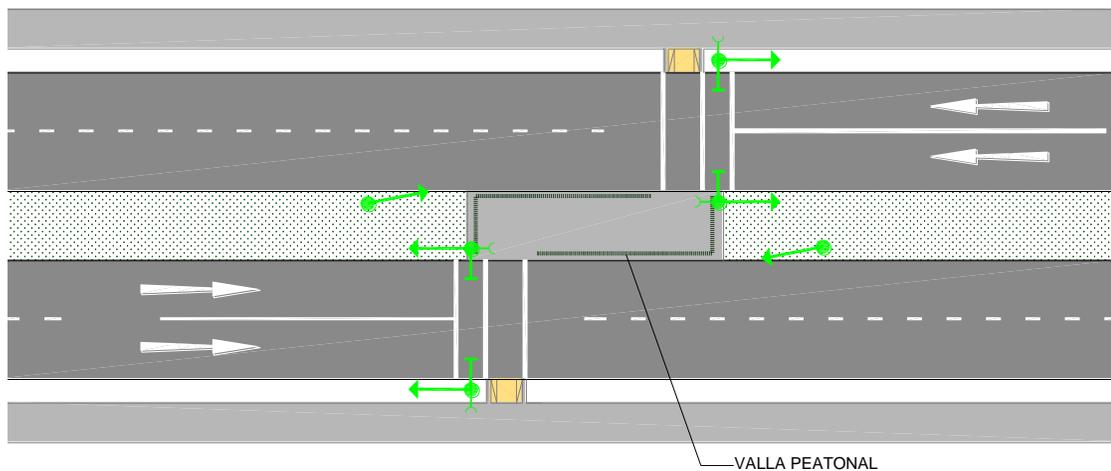
#### 4.10.4.13 Cruce peatonal desfasado

En determinados cruces peatonales a mitad de cuadra es necesario desfasar las sendas peatonales para generar un cruce en dos etapas y así disminuir la duración del tiempo de rojo de los vehículos. Es fundamental la instalación de vallas peatonales para orientar la circulación de los peatones en la mediana.

La distancia entre los pasos peatonales del cruce debe ser al menos 3 m, el ancho libre del área de espera debe ser de al menos 2 m y su superficie debe ser tal que permita almacenar la demanda más alta de peatones con una densidad máxima de 1,5 peat/m<sup>2</sup>. Este tipo de facilidad no debe ubicarse a menos de 80 m de otras intersecciones o facilidades peatonales.

La siguiente figura muestra la configuración típica.

**Figura 4-35 Diseño tipo para cruce peatonal desfasado**



#### 4.10.4.14 Cruce peatonal desplazado

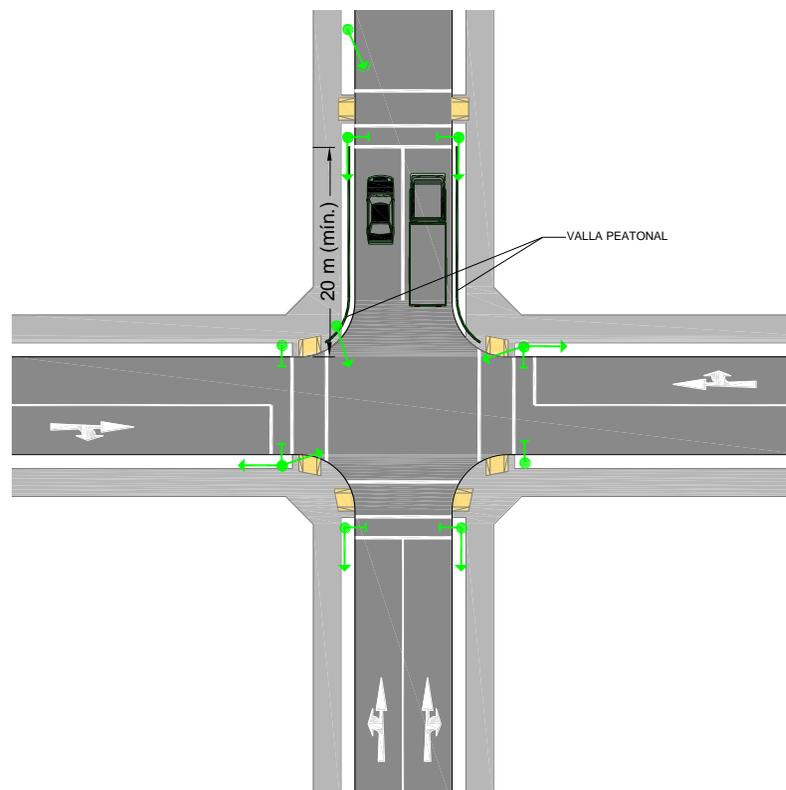
En ciertos casos, debido a la magnitud de los conflictos entre los vehículos que viran y los peatones que tienen derecho preferente de paso en la misma fase, puede ser necesario desplazar el cruce peatonal aguas abajo de la intersección para generar el espacio suficiente para que los vehículos que viran enfrenten a los peatones con mejor visibilidad y observen claramente los cabezales vehiculares del cruce peatonal. Es necesario disponer vallas peatonales para encauzar el flujo de peatones hacia el lugar de cruce, de otra forma los peatones cruzarán por el lugar habitual. La distancia de desplazamiento del cruce peatonal depende de los tipos de vehículo que circulen por la intersección, pero no debe ser excesiva para evitar que los peatones se resistan a recorrer una distancia demasiado larga.

El cruce desplazado debe ubicarse al menos a 20 m de la intersección, pero a no más de 50 m. Es recomendable utilizar mobiliario urbano para reforzar el desplazamiento de los usuarios hacia el cruce peatonal.

El desplazamiento del cruce genera un espacio de almacenamiento de vehículos que disminuye los efectos de bloqueo en el flujo vehicular directo que circula en la misma fase que el viraje, que en la situación sin desplazamiento debe detenerse y esperar el cruce de peatones.

La siguiente figura muestra la configuración típica de este caso.

**Figura 4-36 Diseño tipo para cruce peatonal desplazado aguas abajo de la intersección**



#### 4.10.5 Configuración de postes y cabezales

##### 4.10.5.1 Configuración de postes

La parte inferior de un cabezal de semáforo vehicular debe estar a 3,4 metros del nivel de la acera; o, de no existir ésta, del nivel de la calzada. Para el caso de los cabezales peatonales, esa distancia debe ser 2,4 metros.

Si la visibilidad es deficiente, los cabezales vehiculares se montarán en un poste con brazo por sobre las pistas de circulación. En este caso la altura sobre la calzada de la base del cabezal no debe ser inferior a 4,5 metros.

Con el objeto de evitar el contacto entre los vehículos y los postes de semáforos, éstos se deben ubicar de modo que su parte más saliente se encuentre a no menos de 0,6 metros del borde de la pista de circulación más cercana.

##### 4.10.5.2 Cabezales vehiculares

Los cabezales destinados al control de tráfico vehicular, deben tener una configuración vertical de luces, que incluya al menos una luz roja, una amarilla y una verde, en ese orden, desde arriba hacia abajo. Las ópticas deben ser preferentemente de tipo LED u otro que tengan mejores características de durabilidad, luminosidad y eficiencia energética y que la UOCT autorice. En algunos casos, es conveniente utilizar una o más flechas verdes, para precisar el o los movimientos que tienen derecho preferente de paso. En este caso, las lámparas con flechas se localizarán en forma adyacente a la luz verde, o la reemplazarán cuando todos los movimientos posibles desde la respectiva línea de detención estén controlados por indicaciones de flecha verde. No se aceptará el uso de flechas luminosas de otro color en un cabezal. Las configuraciones posibles y el diseño de las flechas verdes se indican en las Especificaciones Técnicas para la Instalación de Semáforos de la UOCT.

Se pueden utilizar dos diámetros nominales para las ópticas de un cabezal, 200 o 300 mm. Las ópticas de 300 mm de diámetro únicamente se utilizan para las indicaciones de flecha verde. No obstante lo anterior, se pueden usar ópticas de 300 mm de diámetro en intersecciones con problemas especiales, como interferencia inevitable de avisos comerciales u otras fuentes luminosas.

El cabezal vehicular debe estar provisto de una placa de respaldo negra con orla blanca, cuyas formas y dimensiones se definen en las Especificaciones Técnicas para la Instalación de Semáforos de la UOCT. La

placa de respaldo debe estar localizada aproximadamente en el mismo plano que la parte anterior de las ópticas. Cada óptica debe estar provista de la correspondiente visera.

Los cabezales, al igual que los postes de los semáforos, deben ser de color negro.

#### **4.10.5.3 Cabezales peatonales**

Los cabezales destinados a informar a los peatones sobre cuándo se les concede derecho de paso, deben tener una configuración vertical de luces roja y verde, según se indica en las Especificaciones Técnicas para la Instalación de Semáforos de la UOCT. No deben estar provistos de placa de respaldo y deben tener una visera corta. Las ópticas deben ser preferentemente de tipo LED u otro con mejores características que autorice la UOCT.

La luz verde debe tener una figura humana caminando y la luz roja una figura humana detenida. No se aceptarán leyendas, tales como PARE, SIGA, etc., en ninguna óptica del semáforo.

#### **4.10.5.4 Cabezales para ciclistas**

Los cabezales destinados a informar a los ciclistas sobre cuándo se les concede derecho de paso, deben tener una configuración vertical de luces roja y verde, similar a las de los peatones, según se indica en las Especificaciones Técnicas para la Instalación de Semáforos de la UOCT. No deben estar provistos de placa de respaldo y deben tener una visera corta. Las ópticas deben ser preferentemente de tipo LED u otro con mejores características que autorice la UOCT.

La luz verde debe tener una figura de una bicicleta al igual que la luz roja. No se aceptarán leyendas, tales como PARE, SIGA, etc., en ninguna óptica del semáforo.

#### **4.10.5.5 Cabezales para corredores de buses**

Los cabezales para corredores de buses deben incluir un módulo de 300 mm de diámetro con cinco ópticas: una amarilla al centro; dos rojas, una a la derecha y otra a la izquierda; y dos verdes, una arriba y otra abajo, según se indica en las Especificaciones Técnicas para la Instalación de Semáforos de la UOCT. Deben estar provistos de placa de respaldo con la figura de un bus y deben tener una visera larga. Las ópticas deben ser preferentemente de tipo LED u otro con mejores características que autorice la UOCT.

#### **4.10.5.6 Cabezales para cuenta regresiva**

No se aceptarán cabezales con cuenta regresiva debido a que generan problemas de seguridad y confusión en los usuarios cuando se implementan cambios de planes.

### **4.11 Implementación y sintonía fina**

La optimización de las programaciones está basada en el uso de un modelo de tránsito, que a pesar de estar validado para una determinada situación observada, tiene una limitada capacidad para reproducir ciertos fenómenos. Por esta razón las programaciones óptimas definidas siempre deben someterse a un proceso de sintonía fina.

El objetivo de la sintonía fina es realizar en terreno un diagnóstico de la operación de las intersecciones con las programaciones óptimas definidas y determinar, en caso necesario, las modificaciones necesarias para mejorar las condiciones de circulación y seguridad de tránsito. Las modificaciones identificadas deben ser implementadas y evaluados sus resultados de manera que sean validadas o corregidas. El resultado de la sintonía fina es un conjunto de ajustes a la programación para los períodos analizados.

Como las programaciones óptimas están basadas en flujos y otras variables observadas en un cierto momento, la sintonía fina debe realizarse en el más breve plazo posible luego de su obtención.

La tarea de sintonía se debe realizar en coordinación con la UOCT y consiste en activar la programación óptima de cada período y disponer personal con experiencia en terreno para que observe el funcionamiento de las intersecciones. El personal de terreno debe establecer los problemas operativos o de seguridad de tránsito, si existen, y decida si es posible modificar en línea las programaciones y verificar de inmediato su efecto o bien si es necesario determinar los ajustes en gabinete y probar su eficacia en otro momento.

La necesidad de introducir cambios significativos en la programación es un indicador de la necesidad de corregir la modelación y/o la optimización de las programaciones, lo cual debe ser aprobado por la UOCT. Se considera como cambios mayores en la programación la modificación del tiempo de ciclo, cambios superiores al 20% de la duración de una fase y ajustes en los desfases de una parte importante de las intersecciones,

que indiquen diferencias generalizadas en la velocidad de los vehículos o la magnitud o estructura de los flujos con respecto a los datos utilizados en la optimización de las programaciones.

El proceso de sintonía fina consiste entonces en el desarrollo de las siguientes actividades:

- instalación de programaciones a validar en el computador central, cuando existe un sistema SCAT, o directamente en los controladores de los semáforos;
- recopilación y análisis de información existente;
- inspección general de terreno;
- diagnóstico operacional y formulación de acciones;
- ajustes de las programaciones;
- validación de ajustes a las programaciones;
- verificación de extensión y asimilación de períodos; e
- implementación de programaciones finales.

A continuación se describe cada una de estas actividades y se entregan pautas para realizar cada una de ellas.

#### **4.11.1 Instalación de programaciones**

La primera actividad en el proceso de sintonía fina es la instalación de las programaciones que deben revisarse en el computador central del sistema SCAT existente o bien en los controladores de cada semáforo si no existe un sistema centralizado.

Las programaciones pasarán a formar planes provisorios mientras dure el proceso de sintonía fina.

La generación de los planes provisorios tiene como objetivo disponer de un respaldo que permita restaurar las programaciones que se encontraban vigentes antes de la sintonía fina, teniendo en cuenta que el proceso puede tomar varios días y que podrían producirse errores u otras situaciones durante el trabajo de ajuste en línea de las programaciones que hagan necesario restablecer las programaciones originales.

#### **4.11.2 Recopilación y análisis de información existente**

Habitualmente la tarea de sintonía fina se realiza en intersecciones o redes que fueron modeladas y simuladas con un programa computacional, lo cual es de utilidad para la sintonía fina. Se debe entonces recopilar la siguiente información:

- Listado de semáforos que deben analizarse, identificando las intersecciones críticas, los ejes principales y sentidos de sincronismo prioritarios en el caso de redes.
- Esquemas operativos de las intersecciones y de las redes.
- Periodización utilizada, indicando la extensión de los períodos y las correspondientes horas representativas.
- Programación vigente en cada intersección en los distintos períodos.
- Flujos vehiculares, velocidades y otras variables operativas utilizadas en la optimización de las programaciones.
- Archivos de modelación SIDRA, TRANSYT u otro modelo, incluyendo entradas de datos y salidas con resultados.
- Informes de modelación para conocer los criterios y supuestos adoptados y los objetivos perseguidos en cuanto a la optimización de las programaciones. En especial el cálculo de tiempos mínimos de verde, entreverdes y uso de ciclos dobles.

El análisis de estos antecedentes permite establecer cuáles son los aspectos más relevantes de considerar en las intersecciones analizadas.

### 4.11.3 Inspección general de terreno

Con las programaciones óptimas activadas, se debe realizar una primera inspección general de terreno, cuyo objetivo es compenetrarse con la operación de los semáforos o de las redes, para ello se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- En el caso de redes, se deben efectuar recorridos en vehículo en circuitos predefinidos que abarquen, en conjunto, todas las intersecciones de la red, con énfasis en las intersecciones críticas en cada uno de los períodos. La inspección se debe realizar tantas veces como sea necesario para lograr un adecuado conocimiento de la operación de la red, tanto desde una perspectiva de conjunto (red) como de cada uno de sus semáforos. El número de visitas por período no debe ser inferior a dos tanto para redes como para semáforos aislados.
- Durante las visitas de inspecciones importante detectar la ocurrencia de sub-períodos punta que presenten problemas particulares de congestión.
- Se deben identificar las intersecciones críticas o sectores en los que se produzcan problemas de congestión o funcionamientos operativos deficientes.
- Posteriormente, para cada intersección crítica identificada se deben establecer las causas de los problemas observados y las posibles soluciones.
- En el caso de redes, se deben analizar los límites de la red, tanto espacial como temporalmente y determinar preliminarmente si es conveniente reordenarla temporal y/o espacialmente o bien incorporar nodos adyacentes.

En esta inspección general se debe determinar, en función del nivel de conflictos, la conveniencia de utilizar el modelo de tránsito como apoyo a la labor de sintonía fina.

### 4.11.4 Diagnóstico operacional y formulación de acciones

El diagnóstico operacional se basa en los antecedentes recopilados y en la inspección general realizada. Además, en esta etapa se debe tomar contacto con el encargado de la administración de las intersecciones de modo de incorporar también su experiencia y los problemas detectados por los usuarios que hayan sido informados a la UOCT o a la entidad responsable.

En función de los problemas detectados y sus causas se deben formular las acciones a realizar sobre las programaciones de terreno. Se deben revisar los objetivos de la programación, ya que es posible que los originalmente planteados sufran modificaciones a la luz de lo observado en terreno. Por ejemplo: se podría tomar la decisión de aislar una intersección o una parte de la red, priorizar otros ejes, etc.

Para el caso de redes con más de un eje a coordinar, es necesario seleccionar los ejes e intersecciones que deben incluirse en la etapa de ajuste de las programaciones. Para ello se requiere elaborar un listado jerárquico y realizar los ajustes en función de éste, considerando las intersecciones que pertenecen a más de un eje como punto de partida. De esta forma es posible optimizar el máximo número de intersecciones, sin perjudicar la coordinación de los ejes de mayor jerarquía.

El producto de esta actividad es la identificación de los principales problemas detectados, sus posibles causas y la formulación de acciones necesarias en cada período.

### 4.11.5 Ajustes a las programaciones en redes de semáforos

Las modificaciones a las programaciones de la red se pueden clasificar en dos grupos:

- modificaciones en gabinete, las que son enviadas al centro de control en forma posterior a la inspección en terreno, y
- modificaciones en terreno, las cuales requieren comunicación directa entre el personal de terreno y la sala de control, para chequear y modificar en tiempo real las programaciones.

Es posible distinguir tres tipos de redes que poseen diferentes estrategias de solución a los problemas que presentan.

- Redes Tipo 1: estas redes presentan problemas que sólo requieren ajustes menores de repartos y desfases sin modificaciones del tiempo de ciclo. Generalmente esto ocurrirá cuando la red cuente con nuevas programaciones definidas a partir de un estudio reciente. Se recomienda comenzar el análisis por las intersecciones críticas. Los criterios de modificación de desfases y repartos se describen más adelante.

- Redes Tipo 2: este tipo de redes son aquellas en que es necesario realizar ajustes menores del tiempo de ciclo y que la UOCT determine que no requieren de una actualización de la modelación y/u optimización. Esto probablemente ocurrirá cuando la sintonía fina se realice sobre programaciones con un grado menor de obsolescencia. La necesidad de ajustar el tiempo de ciclo se manifiesta en la existencia de algunas intersecciones con colas excedentes frecuentes y sin tiempos de verde ociosos para más de una fase. En este caso el proceso debe tener en cuenta lo siguiente:
  - Se debe comenzar con el análisis de ajuste del tiempo de ciclo.
  - Una vez encontrado el ciclo de operación óptimo se procede a la revisión de repartos y desfases de la misma forma que con las redes Tipo 1.
  - Podrían existir bloqueos a nivel de áreas, pero de poca magnitud, cuya solución puede basarse en estrategias de gestión de la congestión. Algunos ejemplos son la concentración de la congestión en arcos que eviten bloqueos (arcos con suficiente capacidad de almacenamiento de colas) y el uso de intersecciones "compuertas" que regulen el acceso al área de conflicto según la capacidad de esa área.
- Redes Tipo 3: corresponden a aquellas redes en que la operación real difiere significativamente de la analizada en la optimización de las programaciones, o aquellas donde las programaciones vigentes están obsoletas producto de cambios en la magnitud y estructura de los flujos. Este caso requiere cambios importantes en el tiempo de ciclo, repartos y desfases, que no pueden abordarse en un proceso de sintonía fina. Es necesario en cambio volver a programar la red a través de un estudio específico.

A continuación se entregan recomendaciones más detalladas para el proceso de sintonía fina en redes de semáforos.

#### 4.11.5.1 Criterios para modificar el tiempo ciclo de una red

Para llevar a cabo ajustes al tiempo de ciclo de una red se requieren los siguientes pasos:

- Analizar en primera instancia la modificación del tiempo de ciclo observando el grado de saturación de las intersecciones críticas pues ellas definen la magnitud del tiempo de ciclo. El procedimiento consiste en observar las colas producidas en cada acceso de esas intersecciones y revisar si se alcanzan o no a descargar con el tiempo de verde asignado. Si se observan colas excedentes y no existen posibilidades de distribuir mejor el tiempo de verde entonces se debe cuestionar el ciclo escogido y se debe proponer incrementarlo. Por el contrario, también es posible que se observen tiempos de verde desaprovechados en las intersecciones críticas en cuyo caso se requiere una disminución del tiempo de ciclo. En ambos casos es necesario respetar los valores máximo y mínimo del tiempo de ciclo definidos en la sección 4.5.5.3.
- En función de la magnitud de los problemas detectados se procede a modificar tentativamente el tiempo de ciclo de la intersección bajo análisis incrementando o disminuyendo proporcionalmente los repartos. Estas modificaciones se realizan y se validan en terreno a través de comunicación en línea con la sala de control, si ella existe.
- Si los resultados del ajuste tentativo son satisfactorios, se requiere determinar en gabinete el tiempo de ciclo de toda la red con la ayuda de las modelaciones de tránsito disponibles. Para ello, y en el caso de redes Tipo 2, se debe cuantificar la magnitud de los flujos actuales y utilizar las modelaciones disponibles con los ajustes correspondientes. La modificación de repartos para el resto de las intersecciones también se debe estimar en gabinete, teniendo en cuenta la existencia de accesos con holguras de tiempo de verde. En redes Tipo 1 los ajustes se realizan manualmente según las condiciones observadas y la experiencia del profesional responsable de la sintonía fina.
- Finalmente, en terreno se deben validar las modificaciones para cada intersección en forma individual y para cada período analizado.

#### 4.11.5.2 Criterios para modificaciones de repartos en redes

Las situaciones que indican la necesidad de modificar el reparto de un semáforo y las posibles soluciones son, en general, las siguientes:

- Si existe cola excedente en alguno de los accesos de una intersección y existe tiempo de verde ocioso en accesos que tienen derecho de paso en otras fases, se debe analizar la modificación de los repartos teniendo como límite inferior el verde mínimo correspondiente.

- Si se detectan tiempos de verde ociosos en varios accesos, se requiere analizar la modificación de los repartos para asignar el exceso entre las fases con mayor demanda o eventualmente se puede utilizar ciclo doble o fases duplicadas si el exceso de tiempo de verde es significativo.

Las modificaciones mínimas de repartos generalmente deben ser de 2 segundos pues variaciones menores no producen mejoras significativas de operación o sus efectos son imperceptibles en terreno en la mayor parte de los casos. Esto podría no aplicar en intersecciones muy congestionadas donde puede ser útil aplicar cambios de 1 segundo.

#### **4.11.5.3 Criterios para modificar los desfases en redes**

Para determinar la necesidad de modificar los desfases entre semáforos de una red se debe realizar un proceso de seguimiento de los pelotones de vehículos en los ejes definidos como más relevantes. Para este análisis es necesario tener presente lo siguiente:

- La modificación de desfases se debe realizar después de analizar y eventualmente ajustar los repartos y el ciclo de la red.
- La verificación de la coordinación se debe estudiar desde dos perspectivas. La primera asociada a una visión de usuario, definida a partir de recorridos con el método de vehículo flotante que permitan conocer las detenciones producidas en cada intersección para vehículos representativos de los pelotones que se formen. La segunda consiste en un estudio particular de cada intersección y requiere observar cómo llegan los pelotones a las líneas de detención.

En función de lo que observe el personal de terreno, con experiencia en este tipo de tareas, se debe establecer la necesidad de ajustar los desfases en ciertas intersecciones buscando disminuir las detenciones y demoras para los vehículos de los ejes más relevantes.

En redes Tipo 1 los ajustes se realizan en forma manual y según las condiciones observadas y la experiencia del profesional a cargo de la sintonía fina. En redes Tipo 2 los ajustes deben obtenerse con el apoyo de la modelación existente y los respectivos ajustes de las variables operativas relevantes.

#### **4.11.6 Ajustes de programaciones en intersecciones aisladas**

El ajuste de las programaciones de semáforos aislados se realiza siguiendo una metodología similar a la utilizada para redes de semáforos, descrita en la sección 4.11.5, pero teniendo en cuenta que en este caso la programación es función sólo de las variables operativas de la propia intersección.

Se debe analizar entonces la modificación del tiempo de ciclo y los repartos buscando disponer de suficiente tiempo de verde para descargar las colas y minimizando los tiempos de verde ociosos.

#### **4.11.7 Validación de ajustes de programaciones**

La validación de los ajustes se puede realizar de manera simultánea a su implementación si se cuenta con comunicación en línea con la sala de control. Sin embargo, es necesario hacer una inspección posterior en terreno para corroborar el funcionamiento de la red o las intersecciones estudiadas, en especial cuando se hayan realizado modificaciones del tiempo de ciclo.

Para la validación de cambios realizados en gabinete es necesario observar repetidamente el comportamiento de las intersecciones luego de los cambios, para así tener un adecuado grado de certeza de que los cambios son beneficiosos a nivel global.

#### **4.11.8 Verificación de extensión y asimilación de períodos**

Una vez validados los ajustes implementados para cada período bajo análisis, se recomienda realizar una verificación final de la extensión y asimilación de períodos de modelación.

La extensión del período se verificará observando que el inicio y el término del período sean los adecuados, en el sentido de que la estructura y magnitud de los flujos sean similares a uno u otro período. La acción correctiva en este caso es probar un corrimiento del inicio o término del período o bien un adelantamiento del período siguiente.

En el caso de períodos que contienen horarios disjuntos, en especial laborales y de fin de semana, se recomienda verificar los ajustes en los otros horarios que lo componen, siempre y cuando la magnitud de tales ajustes sea significativa.

Por otro lado, se debe verificar la existencia de sub-períodos punta que pudieran ser tratados en forma separada, definiendo para ellos alguna programación especial. En general, estos sub-períodos son

observables para algunas intersecciones de la red bajo análisis y particularmente coinciden con la existencia de centros atractores y generadores de viajes, por ejemplo, la existencia de colegios cercanos.

#### **4.11.9 Implementación de programaciones a nivel de controlador**

Esta tarea consistirá en la grabación de las programaciones finales en la memoria no volátil del controlador, mediante la transformación de los datos a lenguaje de máquina. La información incluye los parámetros propios de los controladores, como son: las tablas horarias, tablas estacionales, secuencias de fases, los movimientos asignados a cada fase y secuencia, ciclos, repartos, etc.

#### **4.11.10 Reporte de la implementación y sintonía fina de las programaciones**

El proceso de implementación y sintonía fina de las programaciones debe reportarse en un informe que se presentará a la UOCT para su revisión y aprobación cuando proceda. El informe debe elaborarse según los requisitos definidos en el Manual de "Programación y modelación de semáforos" ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

### **4.12 Características técnicas de los equipos semafóricos**

Los equipos que configuran una intersección semaforizada son aquellos que se instalan bajo o sobre la plataforma vial. Estos equipos semafóricos deben cumplir los requerimientos técnicos y de instalación establecidos por la UOCT. La instalación de los equipos se debe realizar siguiendo lo establecido en un proyecto de semaforización aprobado por la UOCT.

Los equipos semafóricos son los siguientes:

- Controlador del semáforo, es el dispositivo electrónico que establece el funcionamiento del semáforo (duración y secuencia de luces) en cada instante. El controlador puede funcionar en coordinación con otros que regulen intersecciones cercanas y también puede estar conectado a un centro de control.
- Cabezales para vehículos, peatones y ciclistas. Los cabezales vehiculares y los peatonales son obligatorios. Los cabezales para ciclistas son necesarios cuando existe una ciclovía que cruza la intersección.
- Postes y ganchos, en los cuales se instalan los cabezales.
- Detectores de vehículos en alguno o todos los accesos de la intersección, son necesarios solamente cuando la forma de operación del semáforo los requiera para activar una o varias fases.
- Botoneras para peatones y ciclistas, necesarios cuando las respectivas fases son actuadas.
- Cámaras y canalizaciones subterráneas o conexiones aéreas, necesarias para conectar el controlador con los cabezales y detectores.
- Elementos complementarios, tales como vallas peatonales, sendas táctiles para personas con visión reducida y detectores de peatones.

Los controladores de semáforo pueden programarse para funcionar de distintas maneras según las condiciones de circulación y la presencia de vehículos que requieren facilidades especiales. Las formas de operación deben ser establecidas como parte del correspondiente estudio de justificación o un estudio posterior. Las formas de operación posibles son las siguientes:

- Operación con tiempos prefijados: en este caso los tiempos del semáforo permanecen fijos durante cada período. Este caso admite que ciertas fases sean actuadas por vehículos y/o peatones.
- Operación dinámica: en la cual la programación varía en respuesta a la demanda vehicular en cada instante. Requiere un sistema que procese la información capturada por detectores de vehículos ubicados en los accesos de las intersecciones.
- Operación actuada por vehículos especiales: en este caso la presencia de cierto tipo de vehículo (que cuente con un dispositivo para ser detectado) genera una modificación de la programación para favorecer su paso por la intersección. Esto puede ser implementado para buses o vehículos de emergencia.

Las características técnicas de los semáforos son las definidas por la UOCT y se encuentran en [www.uoct.cl](http://www.uoct.cl) y son las siguientes:

- Especificaciones técnicas de instalación de semáforos.
- Especificaciones técnicas de controladores de semáforos.
- Especificaciones técnicas de módulos de señales a LED.

Los semáforos que se instalen en vías públicas deben cumplir todas las especificaciones técnicas y de instalación antes señaladas. Los semáforos que se instalen en recintos privados de uso público pueden considerar lo indicado en ellas como una recomendación, cuyo cumplimiento es deseable para mantener la consistencia y uniformidad con la regulación de las vías públicas.

El mantenimiento de los equipos semaforicos se debe realizar de acuerdo con los requerimientos definidos en el Manual de "Mantenimiento de semáforos y actualización de programaciones" ([www.uoct.cl](http://www.uoct.cl)).

