

“MANUAL PROGRAMACIÓN Y MODELACIÓN DE SEMÁFOROS”

Tabla de contenido

1	CONFORMACIÓN DE REDES Y PERIODIZACIÓN	4
1.1	CONFORMACIÓN DE REDES	4
1.2	PERIODIZACIÓN.....	10
1.2.1	<i>Aspectos generales</i>	10
1.2.2	<i>Uso de PERQT</i>	11
1.2.3	<i>Verificación de la extensión de períodos punta</i>	13
1.2.4	<i>Duración y cantidad de períodos</i>	16
1.2.5	<i>Síntesis del procedimiento de periodización</i>	16
2	MODELACIÓN DE REDES	17
2.1	INTRODUCCIÓN.....	17
2.2	MODELACIÓN DE ELEMENTOS DE REDES	17
2.2.1	<i>Modelación de arcos</i>	17
2.2.2	<i>Modelación de nodos</i>	18
2.2.3	<i>Modelación de cuellos de botella</i>	18
2.2.4	<i>Modelación de flujos</i>	18
2.2.5	<i>Extensión de la red</i>	18
2.3	HISTOGRAMAS CÍCLICOS DE FLUJO Y DISPERSIÓN	18
2.4	COMPONENTE EXCEDENTE EN T8S	22
2.5	CONSIDERACIONES DE MODELACIÓN ASOCIADAS A PROGRAMAS COMPUTACIONALES.....	22
2.5.1	<i>Tipología de vehículos</i>	22
2.5.2	<i>Movimientos, pistas, arcos y líneas de detención</i>	23
3	MÉTODOS DE MEDICIÓN	24
3.1	MEDICIONES DE FLUJOS VEHICULARES.....	24
3.2	MEDICIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE	24
3.2.1	<i>Método de persecución de vehículo</i>	25
3.2.2	<i>Método de las patentes</i>	25
3.2.3	<i>Método del vehículo flotante</i>	25
3.3	MEDICIÓN O ESTIMACIÓN DE DEMORAS	25
3.3.1	<i>Medición de demora media vehicular</i>	26
3.3.2	<i>Medición de demora media peatonal</i>	27
4	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE CAPACIDAD	28
4.1	FLUJO DE SATURACIÓN BÁSICO	28
4.2	TRATAMIENTO DE LA HETEROGENEIDAD	29
4.2.1	<i>Heterogeneidad por tipo de vehículo</i>	29
4.2.2	<i>Heterogeneidad por tipo de movimiento</i>	31
4.2.3	<i>Heterogeneidad por características geométricas de la pista</i>	33
4.2.4	<i>Flujo de saturación considerando heterogeneidad por tráfico mixto y características de la pista</i> .	33
4.3	ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE SATURACIÓN DEPENDIENTES DE LA PROGRAMACIÓN.....	34
4.3.1	<i>Pistas cortas</i>	34

4.3.2	<i>Pistas con paraderos de buses</i>	35
4.4	RETARDOS INICIAL Y FINAL	37
4.5	ESTIMACIÓN DE FLUJO DE SATURACIÓN MEDIANTE PLANILLA ELECTRÓNICA	38
4.5.1	<i>Datos de entrada</i>	38
4.5.2	<i>Uso de la planilla</i>	39
4.5.3	<i>Resultados entregados</i>	40
5	SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL	41
5.1	SIMULACIÓN.....	41
5.2	METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN	41
5.2.1	<i>Variables de calibración</i>	41
5.2.2	<i>Calibración de intersecciones aisladas</i>	41
5.2.3	<i>Calibración de ejes o redes</i>	42
5.3	DESARROLLO DE LA CALIBRACIÓN	43
6	OPTIMIZACIÓN DE LAS PROGRAMACIONES	44
6.1	CONSIDERACIONES INICIALES	44
6.1.1	<i>Obtención de información primaria</i>	44
6.1.2	<i>Diseño básico de la programación</i>	44
6.1.3	<i>Procedimiento general de optimización</i>	44
6.2	PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA REDES	45
6.2.1	<i>Ponderadores de demoras y detenciones</i>	45
6.2.2	<i>Obtención del tiempo de ciclo</i>	49
6.2.3	<i>Optimización de repartos y desfases</i>	50
6.2.4	<i>Tratamiento de períodos punta</i>	50
6.2.5	<i>Ajuste e implementación</i>	51
7	INTERACCIÓN SIDRA-T8S	52
7.1	ASPECTOS GENERALES	52
7.2	COMPATIBILIZACIÓN DE LA CAPACIDAD	53
7.3	PROCEDIMIENTO	54
8	CAPACIDAD DE INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS	56
9	REPORTE DE LA JUSTIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE SEMÁFOROS	59
9.1	JUSTIFICACIÓN DE SEMÁFOROS	59
9.2	MODELACIÓN DE TRÁNSITO Y CONFORMACIÓN DE REDES.....	60
9.3	SIMULACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y CALIBRACIÓN	61
9.4	OPTIMIZACIÓN DE LAS PROGRAMACIONES	61
9.5	REPORTE DE LA IMPLEMENTACIÓN Y SINTONÍA FINA DE LAS PROGRAMACIONES	62

1 CONFORMACIÓN DE REDES Y PERIODIZACIÓN

Cuando hay proximidad entre intersecciones semaforizadas su funcionamiento periódico introduce regularidades en la circulación que dan origen a la formación de grupos o pelotones de vehículos que circulan de una intersección a otra. En ese caso la coordinación de la programación de esos semáforos puede contribuir significativamente a disminuir las demoras y detenciones. Sin embargo, para lograr este beneficio, además de la proximidad de los semáforos (variable espacial), debe darse que tengan una periodización común (variable temporal) y tiempo de ciclo compatible (homogeneidad operacional). Es decir, la contigüidad espacial es una condición necesaria pero no suficiente para que un conjunto de semáforos opere óptimamente en red.

Lo que ocurre en realidad es que la definición de los límites espaciales de una red, su periodización y su ciclo, constituyen un problema simultáneo. Esto introduce la posibilidad de que a distintas horas del día, las agrupaciones de semáforos a ser coordinados, sean diferentes

Cuando se analiza la programación de intersecciones aisladas no se requiere un análisis espacial pues no existen agrupaciones de semáforos que deban coordinarse. La etapa de análisis temporal corresponde a la periodización y la etapa de análisis operativo pasa a ser la de programación, en cual se determina el ciclo óptimo y los repartos de tiempo de verde.

El método de conformación de redes que se describe a continuación corresponde al definido por Baeza et al (1995)¹.

1.1 Conformación de redes

Usualmente la definición de redes de semáforos no incorpora aspectos de variabilidad temporal y operacional. Típicamente lo que se ha hecho es, primero, definir redes solamente por consideraciones de tipo espacial y luego, dada esa estructura fija en el tiempo, se ha definido la periodización y la programación para cada período. Con este enfoque se puede incurrir en altos costos al tener intersecciones operando, forzadas por el grupo, con un ciclo muy distinto a su óptimo o en períodos que no le son propios; si bien es cierto que para conformar redes en pos de la coordinación es necesario permitir que los semáforos operen en ciclos distintos de su óptimo y que sus períodos no son exactamente los que les corresponden individualmente, este alejamiento debe ser controlado.

La agrupación de semáforos en redes depende de los siguientes factores:

- a) ubicación espacial de los semáforos;
- b) periodización, determinada fundamentalmente por los patrones de demanda en las intersecciones; y
- c) ciclos óptimos de operación individual de cada intersección, determinados principalmente por los niveles de demanda.

Si bien se reconoce que la conformación de redes necesita una definición simultánea de las tres dimensiones del problema, el enfoque que aquí se plantea es secuencial, pero capta la interdependencia entre las variables espaciales, temporales y operacionales.

¹ 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.

El método de conformación de redes incluye las siguientes etapas:

- **Etap 1: Subdivisión espacial**, en esta etapa se generan grupos de intersecciones semaforizadas aislados espacialmente de otros y con distinto grado de dependencia de las variables temporales y operacionales.
- **Etap 2: Periodización**, en esta etapa se definen los períodos a partir de la demanda de las intersecciones críticas y la agrupación de intersecciones en cada uno de ellos.
- **Etap 3: Programación**, en esta etapa se conforman definitivamente las redes de semáforos que operan con un ciclo común durante un cierto período de tiempo.

En la etapa de subdivisión espacial se distinguen: intersecciones aisladas y cuatro grupos de intersecciones: nucleares, básicos, prioritarios y residuales. Específicamente se tienen las siguientes definiciones.

- Los **grupos nucleares** corresponden a grupos conexos aislados que presentan patrones similares de demanda. Los límites de estos grupos están claramente definidos y su periodización es única y determinada por sus intersecciones críticas. Aún cuando la periodización está resuelta, la conformación definitiva es función de la variable operacional (tiempo de ciclo) en la etapa de programación.
- Los **grupos básicos** corresponden a grupos densos y numerosos de semáforos que no poseen límites claros para subdivisiones internas y presentan patrones distintos de demanda en su interior. Su conformación espacial es dependiente de la periodización, la cual incluso puede variar entre períodos. En la etapa de programación la conformación espacial en cada período puede ser modificada con el fin de agrupar intersecciones con ciclos óptimos similares.
- Los **grupos prioritarios** se asocian a grupos de semáforos cuya operación como red es necesaria por decisiones exógenas, como por ejemplo la definición de un eje relevante de la ciudad como una red específica, a pesar de colindar con otros semáforos. Estos grupos tienen periodización única y otros semáforos pueden ser incorporados si tienen ciclos compatibles, imponiendo que la programación del grupo prioritario no se altere para facilitar la unión entre ellos.
- Los **grupos residuales** son aquellos que están rodeados de grupos nucleares o prioritarios. Tienen periodización única y pueden modificarse en la etapa de búsqueda de ciclo de cada período y así unirse a otros adyacentes si tienen ciclos compatibles.

Las redes de semáforos son el resultado de un conjunto de análisis dependientes entre sí que buscan definir a qué grupo pertenece cada intersección. En estos análisis se definen agrupaciones de intersecciones en función de criterios espaciales y luego se analizan desde el punto de vista temporal en función de la periodización de sus intersecciones críticas. Este proceso se describe más adelante. En el caso de los grupos básicos este proceso genera desagregaciones espaciales de las intersecciones de modo que resulten subgrupos con ciclos compatibles.

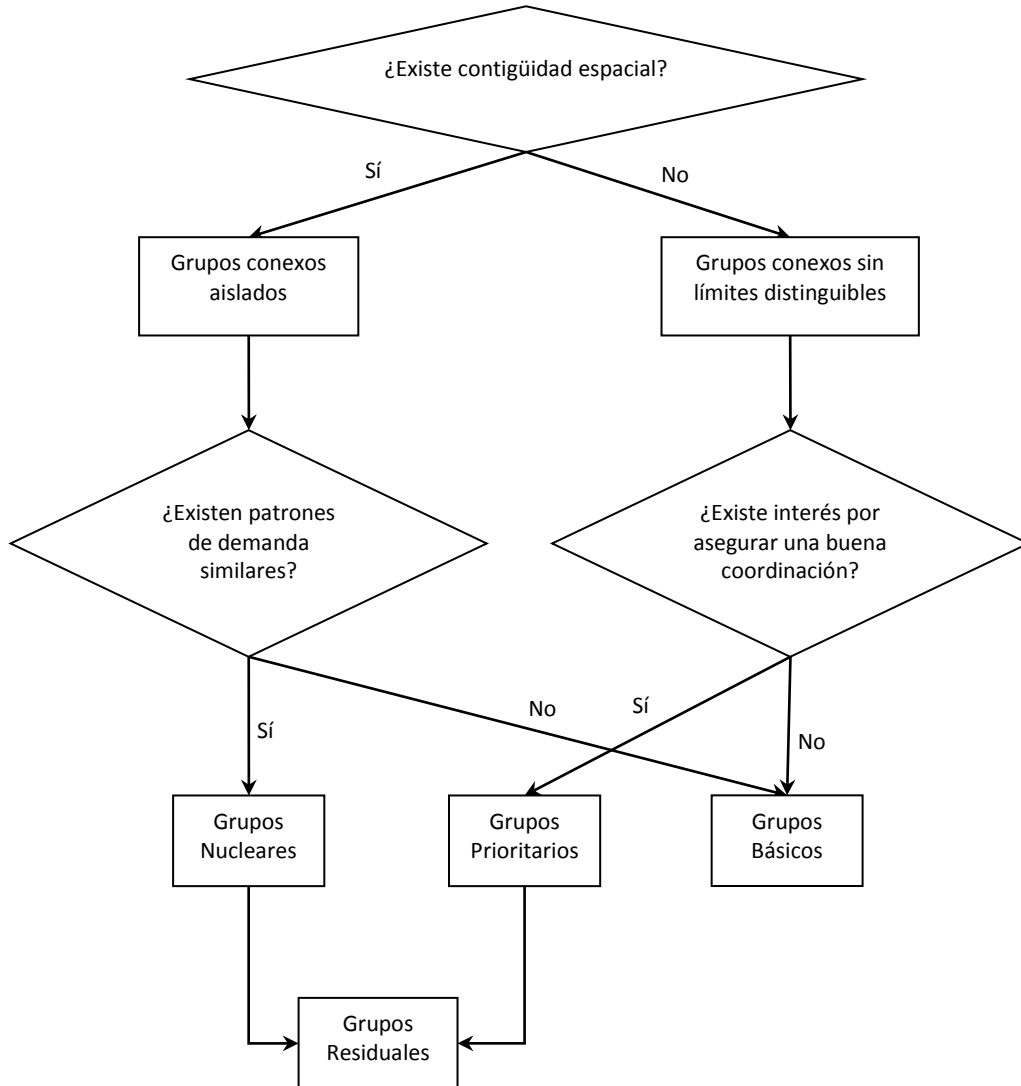
Para los grupos cuya definición espacial es constante en todos los períodos (nucleares, prioritarios y residuales) la obtención de su periodización se realiza de acuerdo con la metodología que se detalla en la sección 1.2. Para los grupos básicos, en cambio, donde su conformación espacial está ligada con la periodización, se aplica un procedimiento estructurado que cuenta con las siguientes cinco etapas:

- **Etap 1: Definición de subgrupos nucleares**, que corresponden a intersecciones para las cuales no cabe duda que deben operar en red por su cercanía y la homogeneidad de su operación. Por ejemplo un subgrupo puede corresponder a un eje que se quiere privilegiar en algunos períodos.

- **Etapa 2: Periodización individual de cada subgrupo**, se aplica a cada subgrupo la metodología descrita en la sección 1.2.
- **Etapa 3: Redefinición del grupo básico**, con la información de la periodización de cada subgrupo y considerando las características del área de estudio, es posible separar los subgrupos que tendrán periodización única, para seguir trabajando con el grupo de semáforos en que aún hay duda de cómo operarán en el tiempo y el espacio.
- **Etapa 4: Periodización global**, los subgrupos apartados se periodizarán con la metodología de la sección 1.2. Para las intersecciones restantes se aplicará un procedimiento especial consistente en:
 - Se periodiza todo el grupo restante con la metodología mencionada previamente
 - Se analizan los resultados considerando las siguientes dos alternativas:
 - Que los períodos obtenidos del conjunto sean similares en cantidad y tengan extensiones semejantes a los resultantes de la periodización individual. En ese caso se comparan los ciclos asociados a los tramos del grado de saturación obtenido para las intersecciones críticas de cada subgrupo. Si todos los subgrupos aceptan un ciclo compatible en todos los períodos, la combinación bajo análisis pasará a conformar un grupo con la periodización única dada por PERQT para el conjunto.
 - Que existan sólo algunos períodos con extensiones similares, tanto en la periodización individual como en la del conjunto. En ese caso se procede a realizar un análisis de los grados de saturación de las intersecciones críticas para determinar si éstas aceptan un tiempo de ciclo común. Bajo estas condiciones se constituirán grupos cuya conformación será variable con la periodización.
- **Etapa 5: Visión global de la periodización**, el objetivo de esta etapa es permitir uniones de grupos que producto de la aplicación del método descrito hayan resultado con períodos similares. Lo que se pretende es obtener una buena coordinación entre los arcos que unen esos grupos, siempre y cuando en la etapa de programación acepten un tiempo de ciclo compatible.

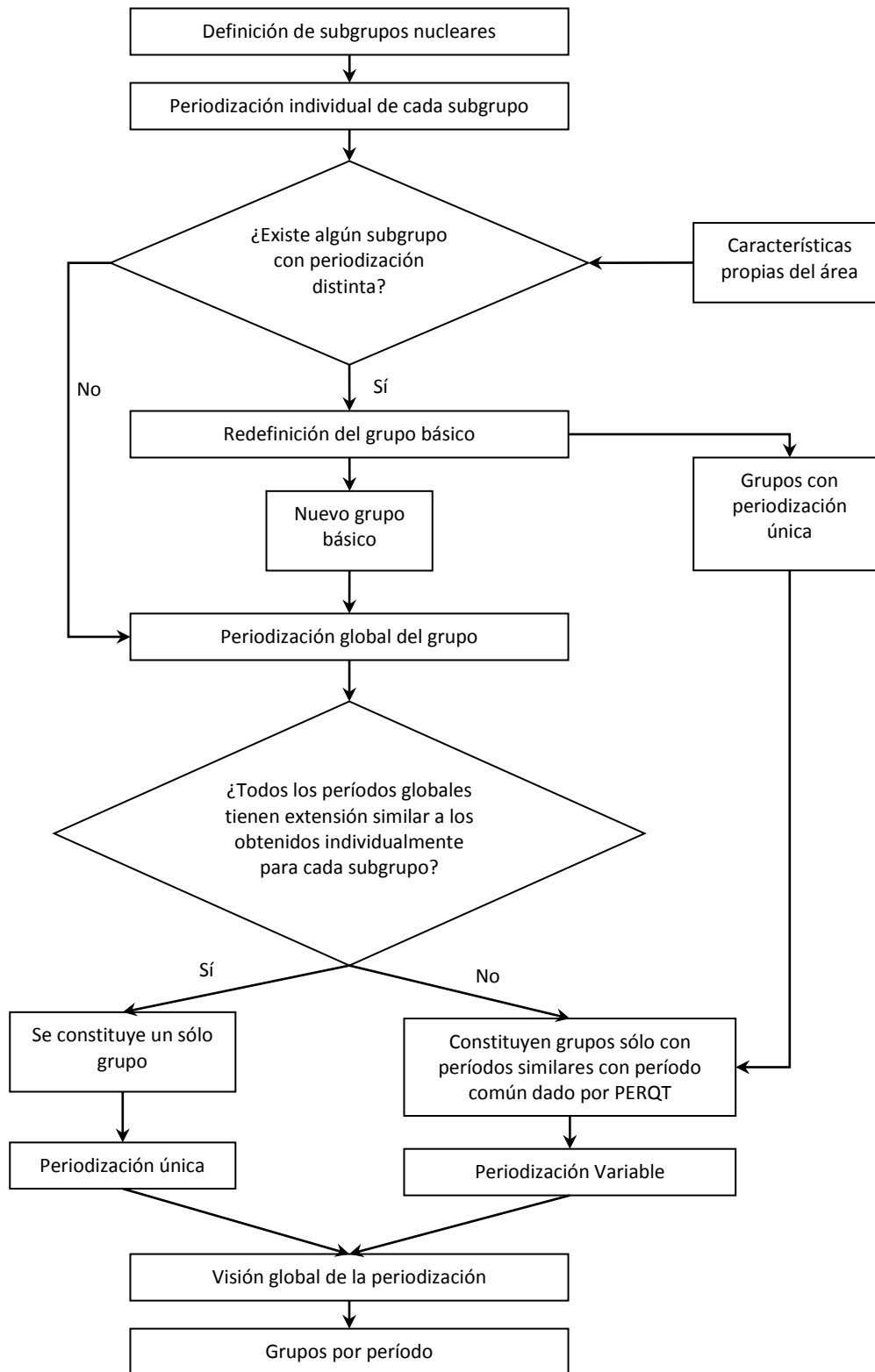
Las siguientes figuras ilustran los pasos a seguir. La Figura 1-1 muestra el procedimiento para la etapa de subdivisión espacial que finaliza con la identificación de los cuatro grupos de intersecciones ya nombrados. La Figura 1-2 describe el proceso de análisis de los grupos básicos que finaliza con la identificación de subgrupos. Por último, la Figura 1-3 muestra la etapa final del proceso en la que se compara el ciclo representativo de cada grupo (intersecciones críticas) con el ciclo óptimo individual de cada intersección. En este proceso los grupos previamente definidos pueden mantenerse o modificarse en la medida de que los tiempos de ciclos sean compatibles o no. Estas modificaciones pueden producirse en determinados períodos y no en otros de modo que las agrupaciones (regiones espacio-tiempo-operación) resultan distintas entre períodos. El resultado final son las redes definitivas conformadas por grupos de semáforos con ciclo común.

Figura 1-1 Criterios para la definición de grupos de semáforos



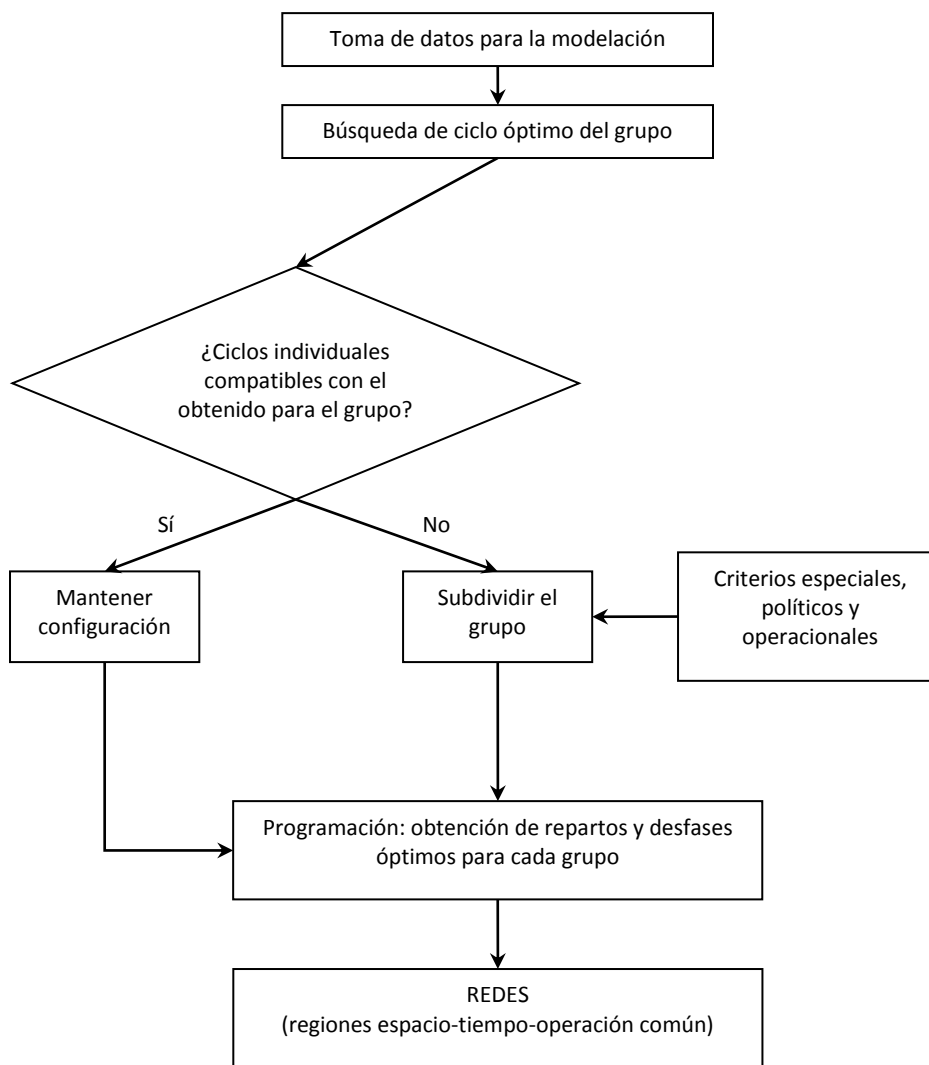
Fuente: Conformación de redes para programación de semáforos. Baeza et al. (1995)

Figura 1-2 Análisis de grupos básicos



Fuente: Conformación de redes para programación de semáforos. Baeza et al. (1995)

Figura 1-3 Programación de grupos y conformación final de redes



Fuente: Conformación de redes para programación de semáforos. Baeza et al. (1995)

El procedimiento de periodización, incluido en los procedimientos recién descritos, se debe realizar con la metodología implementada computacionalmente en el programa PERQT (Hadjes, 1989)² y con el trabajo posterior de Gibson (1995)³ referido al tratamiento de períodos punta, y que se describe más adelante en la sección 1.2.3.

² Hadjes, V. y Gibson, J. (1990) "Un método de periodización para proyectos de vialidad urbana". Actas del VI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Universidad del Cauca, Colombia.

³ Gibson, J. (1995) "Estimación de demoras en intersecciones semaforizadas en períodos punta" Actas del VII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago, Chile.

El método de periodización de PERQT está basado en la linealización por tramos de la función de demora de los movimientos vehiculares en la intersección, en cada intervalo de análisis, y considera tres etapas:

- formación de períodos básicos;
- unión de períodos básicos por tipo de día; y
- unión de períodos básicos entre días.

El programa PERQT tiene dos módulos, uno para periodizar una intersección semaforizada aislada y otro para ejes o redes en que hay que compatibilizar varias intersecciones críticas, que son las más exigentes en materia de tiempo de ciclo y donde se presentan los grados de saturación más altos. Probablemente las intersecciones no críticas admitirían mayores agrupaciones de períodos, pero esto no constituye un problema. El análisis se realiza para una semana representativa de las condiciones habituales de circulación.

El primer paso es determinar cuántas y cuáles intersecciones deben ser consideradas en el análisis. Luego se forman períodos básicos para cada día, primero por intersección y luego combinando intersecciones. Finalmente se procede a la agrupación de períodos disjuntos, dentro de un mismo día o entre días diferentes, para las intersecciones en conjunto.

Las intersecciones elegidas para periodizar deben tener altos grados de saturación y estar relativamente distantes entre sí o bien deben presentar estructuras de flujo claramente diferenciadas. Los períodos deben tener una duración mínima de 1 hora.

1.2 Periodización

1.2.1 Aspectos generales

La periodización consiste en establecer una partición de la(s) semana(s) tipo en períodos diferentes entre sí, pero con razonable homogeneidad interna en relación con los fenómenos que son de interés para la programación de los semáforos.

Una semana tipo corresponde a una en la cual la circulación de los usuarios es representativa de las características de la mayor parte de las semanas del año. Esto ocurre cuando la actividad laboral y estudiantil es normal. En una semana tipo no pueden incluirse días feriados o eventos que alteren significativamente la circulación.

En ciertos casos es necesario definir más de una semana tipo debido a que las características de la circulación varían significativamente durante ciertas épocas del año. Por ejemplo, se pueden definir dos temporadas: normal y verano, y una semana representativa en cada una.

En el ámbito urbano la circulación de los usuarios se produce en tramos relativamente cortos, interrumpidos por intersecciones, cada una con una determinada regulación. En esas condiciones el análisis de la homogeneidad interna de los períodos puede realizarse a partir de la homogeneidad de las demoras pues eso garantiza que también la hay en las otras variables de interés en la programación de los semáforos.

La definición de períodos para la programación de semáforos es una actividad clave en dos aspectos. Primero, es fundamental para el uso de planes de programación prefijados; y segundo, se requiere para la estimación de beneficios de proyectos que contienen intersecciones semaforizadas.

El problema es que los flujos varían sistemáticamente en el tiempo, por lo cual la discretización de éste influye en la determinación del valor medio que caracteriza al flujo del período. A su vez, el flujo promedio influye tanto en la programación del semáforo como en la estimación de las demoras y otros indicadores relevantes.

En vías urbanas existe un patrón característico de variación representado en la semana. La semana tipo o representativa contiene cinco días laborales, en que el patrón de flujo horario es muy similar, un sábado y un domingo con patrones diferentes a los días laborales. Se trata entonces de dividir una semana tipo compuesta por un día laboral, un sábado y un domingo, en períodos consistentemente definidos. Esta consistencia tiene que ver con dos aspectos:

- que el mantener una cierta programación operando durante un período sea una decisión adecuada; y
- que la estimación de demoras para los diversos movimientos a partir de las condiciones promedio del período sea correcta, dado que las demoras guardan una relación no lineal con el flujo y la capacidad.

En algunos casos un día de la semana puede ser atípico, como por ejemplo el viernes en la tarde cerca de un centro comercial, lo cual también debe ser considerado al momento de definir la periodización. Por otro lado, si existe una variación estacional significativa se debe considerar una semana representativa de cada temporada.

Por lo tanto, el objetivo de la periodización es producir una partición de la(s) semana(s) tipo en períodos con las características descritas. Dependiendo de los umbrales de homogeneidad que se fijen, resultarán más o menos períodos.

La semana tipo tiene 7 días de 24 horas. Pero en algunas horas el tráfico tiene niveles muy bajos y también hay fuerte similitud entre los 5 días típicamente laborales (lunes a viernes). Por esto, finalmente se reduce la semana tipo a:

- un día laboral, de 7:00 a 23:00 hrs.;
- sábado, de 9:00 a 23:00 hrs.; y
- domingo de 10:00 a 22:00 hrs.

Estos horarios se pueden ajustar atendiendo a las características particulares de cada caso.

Para periodizar se debe realizar una medición continua de flujos vehiculares, durante todas las horas señaladas previamente, en cada intersección crítica identificada.

Para determinar la programación, una vez hecha la periodización, se debe medir una hora por período. Sin embargo, en los períodos donde el grado de saturación sea mayor que 85% se debe medir durante al menos 1,5 horas de manera que pueda aplicarse el proceso de ajuste para períodos punta descrito en la sección 1.2.3.

1.2.2 Uso de PERQT

La metodología de periodización para programación de semáforos consiste en definir una partición de la semana tipo (de una o más temporadas) en un conjunto de períodos en los que sea razonable utilizar la misma programación. Esto se juzga a partir del error que se comete en la estimación de la demora de los vehículos. La demora es función del flujo vehicular y en la medida que éste varíe la demora varía de

forma no lineal. Como la optimización de las programaciones se realiza utilizando flujos promedio (constantes) en cada período, si dentro de un período el flujo cambia significativamente, la estimación de demora con el flujo promedio estará sesgada.

La metodología define entonces un procedimiento en el cual se identifican agrupaciones de intervalos de tiempo (de 15 minutos cada uno) en los que la demora tiene un sesgo menor a un determinado umbral, predefinido, cuando se estima con el flujo promedio representativo de ese conjunto de intervalos. Esto requiere realizar varios supuestos que simplifican la estimación de capacidad del semáforo, pues de otra forma el problema se vuelve muy complejo ya que la capacidad depende de los flujos promedio del período y eventualmente de la misma programación (pistas cortas).

Este procedimiento está implementado en el programa computacional PERQT. Este programa recibe como información de entrada el patrón temporal de flujo vehicular generado con una medición continua y un modelo simplificado de la intersección.

En el caso de redes en las que consideran los flujos de más de una intersección, el programa realiza un análisis conjunto de las intersecciones. El resultado es una definición de intervalos que pueden ser agrupados para formar los distintos períodos de la red. Generalmente estos resultados deben ser revisados y ajustados para generar la periodización final.

Como mínimo se deben identificar 3 períodos. En ciertas redes a estos períodos se pueden incorporar otros, por ejemplo asociados a centros importantes de atracción/generación de viajes.

Como resultado final del proceso se deben identificar también los horarios (de 1 hora de duración al menos) para la medición de flujos vehiculares representativos de cada período.

A partir de lo descrito, en la tarea de periodización están involucradas las siguientes actividades:

- Desarrollo del catastro operativo.
- Medición continua de flujo vehicular.
- Desarrollo del modelo PERQT.
- Aplicación de PERQT.
- Análisis de sensibilidad y definición final de períodos.

A continuación se detallan aspectos importantes de algunas de estas actividades.

1.2.2.1 Catastro operativo y medición continua de flujo vehicular

Para desarrollar el catastro operativo y la medición continua de flujo vehicular se deben seguir las recomendaciones y requisitos señalados en la sección 3.1 de este anexo y en el MESPIVU.

1.2.2.2 Desarrollo del modelo PERQT

Cada intersección que se utilice para periodizar una red debe ser representada de manera simplificada de acuerdo con los requerimientos de PERQT.

En primer lugar se deben ingresar a PERQT datos generales tales como el número de intersecciones consideradas para la periodización, número de días de medición, horario de inicio de la medición en cada día, número de intervalos (de 15 min.) medidos en cada día.

Luego, para cada intersección considerada se especifican diversos datos de identificación de accesos, operativos y de modelación.

Cada intersección es representada por ramas, las cuales están definidas por las líneas de detención y movimientos que se realizan desde cada una de ellas. Pistas exclusivas para realizar algún tipo de movimiento en particular se definen como una rama independiente.

Además, se debe ingresar al modelo el nombre de cada intersección, número de fases del semáforo, número de ramas, diseño de fases (fases en la que tiene derecho de paso cada rama definida), flujo de saturación por rama, número de movimientos modelados, factores de viraje por movimiento, y la rama a la que pertenece cada movimiento.

En esta representación simplificada la capacidad de cada corriente se asume constante y se expresa como flujo de saturación en unidades de ADE/15 minutos. Se deben utilizar valores típicos del flujo de saturación por pista y factores de equivalencia por tipo de vehículo y movimiento estándares, generados sobre la base del catastro operativo realizado durante la medición continua de flujos.

Finalmente, se ingresan al programa los datos de flujo para cada movimiento y cuarto de hora medidos, para cada día medido y para cada cruce considerado.

1.2.2.3 Aplicación de PERQT

Definido el modelo simplificado de la intersección se procede a ejecutar el modelo PERQT y revisar los resultados que se generen para corregir los errores que pudiesen existir en el ingreso de datos o en el modelo de la intersección.

Una vez que se tenga certeza de que no existen errores en la aplicación de PERQT se procede a realizar un análisis más detallado de los resultados. Este análisis es necesario pues es frecuente que resulte un número bajo de períodos producto de variaciones poco marcadas de los flujos durante parte importante del día, por ejemplo, solamente un período punta mañana y otro para el resto del día. La recomendación en esos casos es llevar a cabo un análisis de sensibilidad reduciendo los flujos de saturación y/o modificando los umbrales de variación admisible de la demora, de manera tal de forzar la generación de más períodos básicos.

Por otra parte, cuando se utilice más de una intersección en el proceso de periodización, también es necesario homogeneizar los períodos determinados de manera que, para todas ellas, todos comiencen y terminen en el mismo instante. Si bien el programa presenta una homogenización basada en su algoritmo interno, el analista puede modificarla si estima que hay una solución más apropiada.

Finalmente, en esta etapa del proceso se debe revisar la extensión de los períodos punta con la metodología que se describe en la sección siguiente.

1.2.3 Verificación de la extensión de períodos punta

En los períodos punta, que se caracterizan por una variabilidad significativa del flujo en lapsos cortos y por tener altos grados de saturación (llegando incluso a la sobresaturación durante ciertos momentos), existe el problema de que los modelos para la estimación de demora no consideran la existencia de una punta marcada dentro de él. Ignorar la presencia de esa punta induce a una subestimación de la demora que puede ser muy sustancial. Además, esos modelos suponen que la cola es nula al inicio del período de análisis. Si esto no ocurre, pierden validez las estimaciones.

A continuación se describe una modificación al método de periodización de PERQT, desarrollada por Gibson (1995), cuyo objetivo es asegurar que se cumplan los supuestos implícitos en los modelos de estimación de demora.

Partiendo de la periodización que entrega el programa PERQT para cada intersección, el procedimiento es el siguiente.

- a) Sea x el grado de saturación de la intersección. Individualizar períodos con $x > 1$. La extensión de estos períodos debe ser alargada hasta que se cumpla $x < 1$, procurando cuidar la simetría y la exigencia de que ningún período tenga menos de una hora de duración.

Para modificar un período cualquiera se pueden aplicar las siguientes acciones:

- i. Añadir (o quitar) un intervalo.
 - ii. Elegir primero el intervalo que deja la punta al centro del período o a la izquierda del centro (simetría interior del período).
 - iii. Si añadir (o quitar) ese intervalo no es suficiente para que se cumpla la condición $x < 1$, se debe repetir el procedimiento pero privilegiando la simetría al añadir (o quitar) un nuevo intervalo (simetría pre-post período).
- b) Correr nuevamente el programa PERQT con los períodos redefinidos para calcular el grado de saturación. Verificar aquellos cuya extensión se haya modificado, directa o indirectamente, cuidando de que ninguno quede con $x > 1$.
 - c) Dados los nuevos valores de x , todos menores que 1, hay que identificar los períodos en que haya intersecciones con $0,85 < x < 1$ y calcular la intensidad de la punta (Z) de cada movimiento crítico (j) de esa o esas intersecciones en esos períodos (i), mediante la siguiente fórmula:

$$Z_{ij} = 2 \left(1 - \frac{ql_{ij}}{qa_{ij}} \right)$$

donde qa_{ij} y ql_{ij} se obtienen del perfil de flujo continuo, considerando que qa representa el flujo medio del movimiento en el período y ql es un flujo representativo del comienzo-final del período para el movimiento, obtenido promediando los flujos del período anterior y posterior durante 3 intervalos en cada caso, como se muestra a continuación:

$$qa_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=i_0}^{i_f} q_j(k)$$

$$ql_{ij} = \frac{1}{6} \left(\sum_{k=i_0-3}^{i_0-1} q_j(k) + \sum_{k=i_f+1}^{i_f+3} q_j(k) \right)$$

donde

$q_j(k)$: es el flujo del movimiento j en el intervalo k (15 minutos)

i_0 : intervalo inicial del período i

i_f : intervalo final del período i

n : es el número de intervalos en el período i ($n = i_f - i_0 + 1$)

- d) Verificar en cada caso que la cola se descargue dentro del período, lo cual se traduce en la siguiente condición para cada movimiento relevante:

$$Z_{ij} \leq 12 \left(\frac{1 - x_{ij}}{x_{ij}} \right)$$

- e) Listar todos los casos de incumplimiento de la condición anterior, especificando el período, movimiento y valor de Z en cada caso.
- f) Analizar la lista de incumplimientos teniendo en cuenta que:
- i. Todo incumplimiento conduce a una revisión de la duración del período respectivo.
 - ii. No obstante, si en cierto período sólo hay un movimiento crítico con problemas y la diferencia entre Z_{ij} y la cota máxima es pequeña, será recomendable no modificar el período nuevamente.

Otras consideraciones para la periodización son las siguientes:

- i. Si el movimiento que no cumple es crítico pero su flujo es poco significativo, se puede mantener la duración del período.
- ii. Si dos o más movimientos críticos no cumplen la condición en cierto período, la duración de éste debe ser revisada.
- iii. Si un movimiento de alto flujo no cumple y, por un margen significativo, la duración del período debe ser revisada.

Este análisis, para cada período, permitirá generar una nueva lista tentativa de períodos candidatos a revisión, que es un subconjunto de lo anterior.

- g) Examinar la nueva lista para ver si hay condicionamiento mutuo entre períodos candidatos a extensión. Cuando lo haya, considerar esos períodos como un grupo e identificar un orden de prioridad entre ellos, según la gravedad del incumplimiento. Los no condicionados quedan como "grupo" individual.
- h) Modificar la extensión para los "grupos" individuales, siguiendo los pasos b) a g).
- i) Para los grupos no individuales, buscar un procedimiento que partiendo del período prioritario del grupo conduzca a la solución más razonable, es decir, que tenga:

- i. Mayor grado de cumplimiento de la condición.
- ii. Respeto de la duración mínima de cada período.
- iii. Resguardo de la simetría.

Luego de aplicar este procedimiento a los períodos punta se obtiene una periodización que es consistente con los supuestos implícitos en los programas de optimización de las programaciones, como T8S.

1.2.4 Duración y cantidad de períodos

En caso de que la periodización arroje un número de períodos inferior a 5, se debe realizar un análisis de sensibilidad con PERQT buscando generar una periodización más desagregada. Para esto se puede reducir el flujo de saturación o aumentar los flujos, para obtener un análisis de sensibilidad de la periodización; a lo más se deben considerar variaciones de un 30 % de cualquiera de ellos. Si en esas condiciones no surgen otros períodos, se debe utilizar la periodización definida por el programa, salvo que éste arroje menos de 3, en cuyo caso se deben generar 3 períodos analizando los histogramas de flujos continuos, con medias móviles de 4 intervalos consecutivos de 15 minutos. Esos períodos corresponden, generalmente, a Punta Mañana, Punta Tarde y Fuera de Punta. La duración mínima de cada período será de 1 hora.

1.2.5 Síntesis del procedimiento de periodización

A modo de síntesis, para realizar la periodización de una intersección semaforizada o una red es necesario realizar al menos las siguientes tareas:

- a) visita a terreno, para conocer las características físicas y operativas de la(s) intersección(es);
- b) selección de la(s) intersección(es) crítica(s) para periodizar;
- c) catastro operativo de las intersecciones críticas, orientado a conocer el uso de pistas, presencia de estacionamientos, paraderos, interferencia peatonal, y otras características que determinen la manera en que funcionan las intersecciones;
- d) mediciones continuas de flujo vehicular, clasificando vehículos por tipo y movimiento;
- e) obtención de periodización inicial, mediante el programa PERQT;
- f) verificación de extensión de períodos punta, según lo indicado en la sección 1.2.3;
- g) análisis de la duración y cantidad de períodos, según lo indicado en la sección 1.2.4;
- h) definición de la periodización final según análisis previos; y
- i) definición de horarios de medición por período para futuras actualizaciones de las programaciones.

2 MODELACIÓN DE REDES

2.1 Introducción

En el ámbito urbano la operación de las intersecciones bajo análisis queda determinada, en parte, por los fenómenos producidos en intersecciones cercanas. Por lo tanto, cuando se requiere predecir impactos derivados de acciones que modifiquen ciertas características de una intersección, como es la programación del respectivo semáforo, es necesaria una perspectiva más amplia que integre una serie de intersecciones cercanas entre sí. La visión que integra lo que ocurre con el tráfico en un área es el análisis de circulación en redes.

En términos generales una red es un conjunto de líneas (arcos) que se conectan entre sí en determinados puntos (nodos) y por donde circula algún elemento (flujo).

En el caso de la programación de semáforos las redes describen los siguientes elementos:

- la infraestructura vial, a través de arcos que representan tramos de vía y nodos que corresponden a las intersecciones;
- los flujos, mediante parámetros que caracterizan el comportamiento de los usuarios;
- la forma de operación, a partir de parámetros que indican el funcionamiento de arcos y nodos, tales como velocidad y flujo de saturación.

La representación de la vialidad y su funcionamiento pueden variar de profundidad según el objetivo que se persiga: si se quiere analizar un fenómeno puntual de poca magnitud se necesita una representación más detallada que si se trata de un fenómeno de gran magnitud.

Debido a la complejidad y magnitud de los problemas matemáticos involucrados en el análisis de redes se han desarrollado diversos programas computacionales para ayudar en su estudio. Algunos ejemplos son T8S y SATURN, que consideran la red en su totalidad, y SIDRA e IRENE, que están orientados a la modelación de nodos: intersecciones y paraderos, respectivamente. En general, los programas para redes analizan con mayor detalle los fenómenos que se producen en los arcos, por lo tanto, si se complementan con los programas orientados a nodos se consigue un modelo más preciso.

2.2 Modelación de elementos de redes

2.2.1 Modelación de arcos

Como las características operativas de los arcos no son las mismas para todos los vehículos de un tramo de vía se requiere tomar una decisión: promediar las características según la composición de tráfico o definir arcos distintos para distintos flujos vehiculares.

Por otra parte, al llegar a la intersección ciertos vehículos tienen comportamientos distintos que originan conflictos concurrentes o direccionales; también existen vehículos que no interactúan con el resto del tráfico. Para incorporar a la modelación estas situaciones es necesario definir un nuevo elemento, denominado línea de detención (LD). La línea de detención actúa como una interfaz entre arcos y nodos y tiene asociado un flujo de saturación o capacidad.

Cada arco puede tener su propia línea de detención, pero también varios arcos pueden compartir una misma línea de detención. Mientras mayor es el número de arcos y líneas de detención, la modelación es más detallada, pero también es más compleja y costosa de generar.

2.2.2 Modelación de nodos

Definidos los arcos y sus líneas de detención, al nodo le corresponde la modelación de la forma de regulación del dispositivo que representa. En intersecciones el nodo indica si se trata de intersecciones de prioridad, semaforizadas o cuellos de botella.

2.2.3 Modelación de cuellos de botella

Un cuello de botella es un estrangulamiento de un tramo de vía producto de variaciones del ancho de la vía, presencia de estacionamientos o paraderos de buses, bloqueo temporal de pistas, etc. Una forma de modelar los cuellos de botella es con un nodo auxiliar, ficticio, que representa una intersección semaforizada con 100% de tiempo de verde, pero con un flujo de saturación menor al del tramo.

2.2.4 Modelación de flujos

El flujo de vehículos en la red se modela desde dos perspectivas:

- desde el punto de vista de la conectividad de la red, especificando las contribuciones de movimientos al flujo total aguas abajo en un arco; y
- desde el punto de vista del nivel de flujos asociado a cada arco.

2.2.5 Extensión de la red

La definición de la red tiene implícita la pregunta de hasta dónde considerar el área de influencia de las acciones e impactos que se quieren estudiar, y cómo incorporar los efectos de red más allá de la zona de influencia.

La primera pregunta cae en el arte de la modelación de redes y se relaciona con los objetivos de cada modelación en particular. La segunda se resuelve definiendo nodos frontera y arcos de entrada a la red más allá de los cuales se supone que los efectos de red (por ejemplo, bloqueos) no se propagan.

En redes orientadas a la programación de semáforos la extensión se define como parte del proceso de conformación de la red, en el cual se establece también la periodización y la programación. Se pueden incorporar nodos adicionales a esa red si se requiere estudiar los arcos que conectan con otras redes.

2.3 Histogramas cíclicos de flujo y dispersión

Cuando existe una intersección semaforizada aguas arriba de la intersección en estudio se produce una variación sistemática en el flujo que llega a esta última. Dicha variación ocurre cíclicamente debido a la forma de operación de los semáforos. Esto invalida el uso de las fórmulas de la componente uniforme de la longitud de cola en intersecciones semaforizadas, ya que éstas se basan en el supuesto que el flujo es constante a lo largo de cada ciclo, sólo sujeto a fluctuaciones aleatorias; lo que se tiene en este caso son llegadas en grupos o pelotones de vehículos. La componente excedente no se ve afectada por la existencia de estos pelotones.

Para modelar este fenómeno de variabilidad del flujo una alternativa es el uso de los histogramas cíclicos de flujo (HCF). Los HCF son una representación detallada del flujo en el tiempo y se asocian a las líneas de detención (LD). Permiten el cálculo correcto de la componente uniforme de la longitud de cola cuando el flujo varía sistemáticamente dentro de un ciclo típico del semáforo. Una vez calculada la cola uniforme se puede obtener fácilmente la componente uniforme de la demora y las detenciones, como se explica más adelante.

Existen tres tipos de HCF, tal como se indica a continuación:

- Histograma de llegada: representa el flujo vehicular, en función del tiempo, que llega a una línea de detención durante un ciclo típico del semáforo. Se denomina $q_{LL}(t)$.
- Histograma de largada: representa el máximo flujo, en función del tiempo, que puede salir de la línea de detención durante un ciclo típico del semáforo. Corresponde a una representación de la capacidad de la línea de detención. Se denomina $q_L(t)$.
- Histograma de salida: representa el flujo, en función del tiempo, que efectivamente sale de la línea de detención durante un ciclo típico del semáforo. Se denomina $q_s(t)$.

En todos los HCF el tiempo de ciclo se divide en intervalos de corta duración (1 a 2 segundos) para captar la variabilidad del flujo a lo largo de un ciclo.

De los tres tipos de HCF, el de largada es el más fácil de construir ya que basta con conocer el flujo de saturación asociado a la LD y la programación del semáforo. Si se supone conocido el histograma de llegada entonces la componente uniforme de la longitud de cola en el intervalo i está dada por:

$$LU(i) = \max\{LU(i-1) + I(q_{LL}(i) - q_L(i)); 0\}$$

donde I es la duración de un intervalo. Si se tienen n intervalos y el tiempo de ciclo es c entonces $I = c/n$.

El primer intervalo para el cual se calcula la longitud de cola es aquel donde comienza el rojo efectivo, para esto se supone que al final del verde efectivo la cola es nula. Lo anterior significa, además, que se asume que no existe sobresaturación sistemática ($x > 1$). Si existiera sobresaturación entonces el histograma de llegada se corrige de la siguiente forma:

$$\tilde{q}_{LL}(i) = \alpha q_{LL}(i)$$

donde $\alpha = \frac{\sum_i q_L(i)}{\sum_i q_{LL}(i)} < 1$.

El histograma de salida se obtiene como:

$$q_s(i) = \min\left\{q_{LL}(i) + \frac{LU(i-1)}{I}; q_L(i)\right\}$$

Si existe sobresaturación entonces se utiliza \tilde{q}_{LL} en vez de q_{LL} .

A partir de la longitud de cola uniforme se obtienen las demoras y detenciones uniformes, tal como se indica a continuación.

Tasa media de demora uniforme

$$DU = \frac{\sum_{i=1}^n LU(i)}{n}$$

donde n es el número de intervalos dentro del ciclo.

Demora media uniforme

$$dU = \frac{DU}{\sum_{i=1}^n q_{LL}(i)}$$

Tasa media de detenciones uniforme

$$HU = \sum_{i \in A} q_{LL}(i)$$

donde A es el conjunto de intervalos en cuyo comienzo la longitud de cola es distinta de cero.

Número medio de detenciones uniforme

$$hU = \frac{HU}{\sum_{i=1}^n q_{LL}(i)}$$

Para obtener el histograma de llegada a la LD bajo análisis se necesita conocer el histograma de salida en la LD aguas arriba y la forma en que se dispersa el pelotón de vehículos a lo largo del arco. Esto último se realiza a través de modelos de dispersión de pelotones. La dispersión se debe a las diferencias de velocidad que existen entre los vehículos: hay vehículos lentos y rápidos lo que produce adelantamientos que cambian la forma del pelotón.

Luego, para modelar la dispersión es necesario conocer la velocidad de circulación en el arco de los distintos vehículos, lo que es equivalente a conocer el tiempo de viaje ya que la longitud de recorrido es fija y conocida. Para incorporar la variabilidad de la velocidad o el tiempo de viaje se utilizan funciones de distribución de esas variables. La relación más elemental que describe la dispersión es entonces:

$$q_{LL}(i) = \sum_{j=1}^i q_s(j)P(t = i - j)$$

donde P es la función de distribución del tiempo de viaje en el arco. La ecuación anterior no considera el carácter cíclico de los HCF, de ahí que una expresión más adecuada de la dispersión es:

$$q_{LL}(i) = \sum_{j=i-n+1}^i q_s(j) \sum_{\epsilon=0}^{\infty} P(t = i - j + \epsilon n)$$

Dependiendo de la forma funcional de P se obtienen distintos modelos de dispersión.

Modelo de dispersión de Robertson corregido

Utilizando una distribución del tiempo de viaje geométrica truncada se obtiene el modelo de dispersión de Robertson corregido (Gibson y Aguirre, 1984)⁴, en el cual se tienen las siguientes expresiones para el histograma de llegadas:

$$q_{LL}(1+T) = \frac{F}{1 - (1-F)^n} \sum_{j=2}^{n+1} q_s(j)(1-F)^{n+1-j}$$

$$q_{LL}(i+T) = Fq_s(i) + (1-F)q_{LL}(i+T-1) \quad i = 2, \dots, n$$

donde

$$F = \frac{1}{1 + \bar{t} - T}$$

Modelo de dispersión de Gibson y Wityk

Utilizando una distribución del tiempo de viaje triangular simétrica se obtiene el modelo de dispersión de Gibson y Wityk, en el cual se tienen las siguientes expresiones para el histograma de llegadas:

$$q_{LL}(1+T) = F \left\{ \sum_{i=1}^{P+1} (P+1-i)[q_s(i-P) + q_s(n+1-P-i)] + \sum_{i=1}^{P+1} q_s(n+i-P) \right\}$$

$$q_{LL}(i+T) = F \left\{ \sum_{j=0}^P q_s(n+i-j) - \sum_{j=P+1}^{2P+1} q_s(n+i-j) \right\} + q_{LL}(i+T-1) \quad i = 2, \dots, n$$

$$F = \frac{1}{(1 + \bar{t} - T)^2}$$

$$P = \bar{t} - T$$

En ambos casos el parámetro F se conoce como factor de dispersión y T y \bar{t} corresponden al tiempo mínimo y promedio de viaje en el arco, respectivamente.

El tiempo mínimo de viaje en arcos de tráfico general está dado por la relación

$$T = \lfloor \beta \bar{t} + 0,5 \rfloor$$

donde β es un parámetro a calibrar. Para arcos de buses la relación es

$$T = \lfloor \gamma \bar{b} + \sigma \bar{t}_r + 0,5 \rfloor$$

donde \bar{b} es el tiempo neto de parada y $\bar{t}_r = \bar{t} - \bar{b}$ el tiempo de recorrido, y γ y σ son parámetros.

⁴ Gibson, J., Aguirre, J.F. (1984). Replanteamiento del modelo de dispersión de tráfico de Robertson. Actas del I Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago.

Valores típicos de los parámetros anteriores son los siguientes:

$$\begin{aligned}\beta &= 0,6 - 0,8 \\ \gamma &= 0,3 - 0,6 \\ \sigma &= 0,8 - 0,85\end{aligned}$$

T8S utiliza por defecto $\beta = 0,65$, $\sigma = 0,7$ y $\gamma = 0$, pero se pueden modificar ingresando los valores ajustados en las tarjetas 30 y 31 de T8S, amplificados por 100 y con dos cifras.

Los tiempos de viaje (\bar{t} , T) se miden en intervalos (valores enteros redondeados) y los histogramas se construyen en unidades de vehículos equivalentes. Además, siempre existe continuidad en el flujo entre líneas de detención.

2.4 Componente excedente en T8S

Para estimar la componente excedente de las demoras y detenciones, T8S calcula una aproximación que combina el efecto de la aleatoriedad y la sobresaturación.

La expresión utilizada para la tasa media de demora aleatoria y por sobre saturación (DAS) es la siguiente:

$$DAS = \frac{QT}{4} \left(x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + 4 \frac{x}{QT}} \right)$$

Donde T , q y Q son la duración del período de análisis, el flujo y la capacidad de la LD, respectivamente. Dadas las unidades en que T8S recibe la información, DAS queda expresada en VEQ-h/h y puede ser interpretada como el número promedio de vehículos que permanece en cola al final del período de verde durante el período T . Por lo mismo, y dados los supuestos del modelo, al inicio del período esa cola es nula y es el doble de DAS al final. Esta expresión entrega resultados similares a los que se obtienen con la formulación indicada en el cuerpo principal del Capítulo 4 del MST.

Como se indica en el Capítulo 5 de este anexo, la variable DAS se utiliza para calibrar el modelo de la situación actual.

La componente aleatoria y por sobresaturación de las detenciones se obtiene de T8S

2.5 Consideraciones de modelación asociadas a programas computacionales

2.5.1 Tipología de vehículos

Cualquiera sea la diferenciación adoptada para los tipos de vehículos en el área de estudio, para fines de modelación hay ciertas restricciones dependientes de los programas computacionales que se utilicen.

En el caso de intersecciones aisladas sólo cabe distinguir entre vehículos livianos y pesados en cada movimiento. Se considerarán vehículos pesados todos los tipos de buses y camiones, el resto serán vehículos livianos. En el caso de SIDRA los flujos deben ingresarse en veh/h con la desagregación ya señalada.

En el caso de redes de semáforos, el modelo T8S admite mayor diferenciación gracias a su capacidad de utilizar hasta 5 arcos compartiendo línea de detención. Cada arco puede representar distintos tipos de vehículos, agrupaciones según el movimiento realizado en la intersección aguas arriba, o distintas líneas de buses según rutas o paraderos utilizados. Sin embargo, normalmente se distingue solamente entre arcos de buses y de tráfico general (incluye a las restantes categorías). Los flujos se ingresan a este programa en unidades de VEQ/h.

En caso de que sea necesaria una mayor desagregación se pueden incorporar a la red los correspondientes arcos. Pero hay que tener presente que una mayor desagregación tiene sentido si se trata de una categoría de vehículos que gravita en la composición del tráfico en la red y tiene una velocidad media sistemática y significativamente distinta de las otras categorías, y de la cual se dispone de datos confiables.

2.5.2 Movimientos, pistas, arcos y líneas de detención

La modelación del tráfico en intersecciones tiene como asunto primordial el estudio del flujo y la capacidad. En el modelo SIDRA se recurre a una representación directa basada en movimientos y pistas (que pueden ser de uso exclusivo o compartido), e incorpora procedimientos internos para asignar el flujo de cada movimiento entre las pistas que están disponibles para ese movimiento. La capacidad se estima para cada pista.

Por su parte el modelo T8S trabaja con arcos y líneas de detención. Las líneas de detención tienen asociada la capacidad y pueden ser compartidas por varios arcos, caso en el cual se supone que hay un mismo grado de saturación para los arcos comprometidos. Esta representación tiene dos desventajas principales:

- El uso de las pistas en el que se basa la definición de líneas de detención compartidas o separadas, rigidiza la simulación en T8S. En SIDRA, la asignación de flujos por pistas que realiza internamente el programa permite detectar casos en los que el uso real probablemente será distinto al supuesto por desequilibrio en los grados de saturación de pistas contiguas. Esto es importante para estudiar casos de subutilización de pistas.
- La estimación de la componente excedente de las demoras sufre sesgo. Cuantas más pistas están incluidas en una línea de detención, más se subestima dicha componente.

Estos dos problemas deben ser sopesados al modelar una red con T8S, tanto desde el punto de vista de la compatibilización con otros programas como de la calidad de la predicción de los impactos. En particular importa que se identifique qué pistas son de uso exclusivo (o casi) para individualizarlas como líneas de detención separadas.

3 MÉTODOS DE MEDICIÓN

La información de base necesaria para la programación de semáforos corresponde básicamente a datos de flujos vehiculares y peatonales, velocidades de circulación y características físico-operativas de la vialidad en el área de estudio. Por otro lado, para el análisis de justificación de semáforos se requiere también medir demoras. A continuación se entregan algunas recomendaciones para su obtención en terreno.

3.1 Mediciones de flujos vehiculares

Los flujos son una medida de los viajes que se realizan en un período y lugar determinados. Pueden entonces referirse a distintos entes físicos que viajan y a diversos contextos espacio-tiempo. Desde el punto de vista del espacio lo que interesa para la programación de semáforos son los flujos de cada intersección analizada, incluidos los peatonales.

Los flujos son relevantes en la optimización de las programaciones y, en consecuencia, deben asignarse suficientes recursos para su medición, de otro modo no puede asegurarse que las programaciones óptimas que se obtengan sean adecuadas a las condiciones de circulación existentes.

En función de lo anterior, en los días y horarios establecidos en la periodización y en cada intersección semaforizada de interés, se deben medir todos los flujos distinguiendo movimiento y tipo de vehículo. La tipología de vehículos aplicable es la que se defina como resultado del análisis de las condiciones de circulación en el área de análisis y debe ser consistente con el procedimiento de estimación de flujos de saturación. A nivel temporal, los conteos se deben agrupar cada 15 minutos.

Además, se deben tener en cuenta los requerimientos señalados en el MESPIVU orientados a asegurar que las mediciones sean realizadas con personal idóneo, adecuadamente dimensionado, y con la supervisión adecuada.

En la programación de ciertas redes puede ser necesario medir flujos vehiculares en intersecciones no semaforizadas, por ejemplo, para generar una modelación más afinada de la dispersión de los pelotones en un arco con intersecciones de prioridad intermedias. En ese caso las mediciones tendrán los mismos requerimientos que en las intersecciones semaforizadas.

3.2 Medición de tiempos de viaje

En el caso de redes la medición de tiempos de viaje es una actividad relevante pues esa variable es determinante en el proceso de dispersión de los pelotones de vehículos, fenómeno que explica la componente uniforme de colas, demoras y detenciones. Mayor importancia tiene entonces esta medición en el caso de redes/períodos con niveles bajos de congestión (que por lo general corresponden a la mayor parte del día), pues en esas situaciones la componente uniforme es mayor que la componente excedente.

En intersecciones aisladas la medición de velocidad tiene menor importancia y basta con asumir valores razonables a partir de la observación en terreno de la operación en cada período.

La recolección de los tiempos de viaje en una red puede realizarse con diferentes métodos, según se describen a continuación, pero siempre debe realizarse de manera consistente con lo que el programa computacional utilizado estime.

3.2.1 Método de persecución de vehículo

En el método de persecución el objetivo es seguir a un vehículo seleccionado al azar tratando de replicar todas sus maniobras entre dos puntos previamente definidos. El acompañante del conductor registra el instante de pasada por cada punto. Como no siempre se conoce el destino de los vehículos, este método es más apropiado para el caso de ejes arteriales, en que normalmente el grueso del tráfico sigue el corredor y hay pocos desvíos laterales, o bien para buses. Conocida la distancia entre los puntos de referencia y el tiempo de recorrido se obtiene la velocidad del vehículo seleccionado.

3.2.2 Método de las patentes

El método de las patentes consiste en disponer observadores en los extremos de un tramo para que registren los instantes de pasada de vehículos escogidos al azar por cada lugar, identificándolos por su patente (o parte de ella). Luego se procesa la información recogida y se obtienen los tiempos de viaje de los vehículos registrados, a través de la diferencia en los instantes de pasada por los extremos del tramo, cuya longitud es conocida.

3.2.3 Método del vehículo flotante

El método del vehículo flotante consiste en la realización de recorridos en el tramo de interés con un vehículo denominado auto-test. Durante cada recorrido el conductor del auto-test trata de mantenerse su posición relativa dentro del pelotón de vehículos. Simultáneamente el acompañante del conductor registra el instante de pasada por distintos hitos previamente definidos. Conocida la distancia entre hitos se obtiene la correspondiente velocidad.

Una alternativa al registro manual de los instantes de pasada es el uso de GPS portátiles que pueden disponerse dentro del auto-test. El GPS puede configurarse para que registre la posición del vehículo y el instante correspondiente a intervalos regulares (por ejemplo, cada 2 segundos). Posteriormente el registro del GPS se procesa para obtener la diferencia de tiempo entre el paso por distintos puntos de interés. La ventaja de esta alternativa es que permite obtener no sólo la velocidad promedio sino que también perfiles de velocidad; incluso es posible identificar las demoras en las intersecciones.

3.3 Medición o estimación de demoras

La demora media corresponde al tiempo adicional de viaje promedio en que incurren los usuarios por la existencia de una regulación en comparación con la situación en que esa regulación no existe. Dentro de la demora media se distinguen dos componentes aditivas, la primera corresponde al tiempo adicional en que se incurre cuando no existen vehículos/usuarios prioritarios (asociada a la variación de la velocidad y chequeo de presencia de vehículos prioritario) y la segunda al tiempo adicional que se ocupa esperando que se descargue la cola que se forme delante del usuario. En intersecciones de prioridad esas componentes se denominan demora geométrica y demora en cola, respectivamente. Las demoras geométrica y en cola son similares a las demoras uniforme y excedente de las intersecciones semaforizadas, en el sentido de que si el grado de saturación es bajo entonces la demora geométrica es mayor que la demora en cola; lo contrario ocurre cuando el grado de saturación es cercano o mayor que 1.

Para el análisis de los casos especiales de justificación de semáforos señalados en el Capítulo 4 del Manual de Señalización de Tránsito, la demora media se puede medir o estimar con un programa computacional. En el primer caso se deben seguir los procedimientos que se indican en las secciones

3.3.1 y 3.3.2 siguientes según corresponda. En el segundo caso se debe utilizar un programa de simulación de tránsito que tenga capacidad para captar los fenómenos y efectos en la demora media que corresponde estudiar, por ejemplo, la formación y dispersión de pelotones de vehículos generada por intersecciones semaforizadas cercanas. Se debe considerar un programa computacional que estime tanto la demora media en cola como la geométrica y calibrar el modelo de tránsito que se construya de manera que reproduzca razonablemente la evolución de la longitud de cola de los movimientos analizados. Ese proceso de calibración debe reportarse como parte del estudio de justificación.

3.3.1 Medición de demora media vehicular

Para cada vehículo la demora (en cola más geométrica) corresponde a la diferencia entre los instantes en que éste se detiene al final de la cola y en que su eje trasero cruza la correspondiente línea de detención.

Para medir la demora de cada vehículo se requieren al menos dos medidores, uno ubicado en la línea de detención y otro en un punto aguas arriba donde se pueda observar el final de la cola. Cada medidor debe registrar los instantes ya señalados (a nivel de segundos) y la placa patente (o parte de ella) para así identificar posteriormente los correspondientes a cada vehículo.

Si no existe cola delante de un vehículo registrado entonces se le asignará una demora equivalente a la geométrica que se indica en el Cuadro 3-1 según el movimiento realizado⁵. Para esto el medidor en la línea de detención debe registrar además el movimiento que realice cada vehículo.

Cuadro 3-1 Demora media geométrica por movimiento en intersecciones de prioridad

	Viraje a la derecha		Viraje a la izquierda		Movimiento directo	
	desde acceso secundario	desde acceso prioritario	desde acceso secundario	desde acceso prioritario	desde acceso secundario	desde acceso prioritario
Demora geométrica (s)	7,8	5,7	10,6	6,5	12,2	0

En el caso de cruces peatonales que inducen demoras excesivas a los conductores, la demora geométrica de los vehículos se asumirá igual a 5 segundos.

La medición de la demora se debe realizar durante las 4 horas de mayor demanda, incluyendo aquellas en las que se hayan detectado los problemas operativos más severos en los movimientos de interés. Durante esas horas se debe registrar la mayor cantidad de vehículos en cada pista que sea relevante analizar, para generar una muestra suficiente para que la estimación de la demora media sea confiable.

Los valores de demora deben registrarse y promediarse en intervalos de 15 minutos para obtener la demora media (geométrica y en cola) representativa de cada uno de esos intervalos y así estudiar el cumplimiento de las condiciones señaladas en el Capítulo 4 del Manual de Señalización de Tránsito.

⁵ Mc Donald, M., Housell, N. y Kimber, R.M. (1984) Geometric delay at non signalized intersections. Special Report SR 810, Transport and Road Research Laboratory.

3.3.2 Medición de demora media peatonal

La medición de demora media peatonal se debe realizar registrando el instante de llegada de un peatón al punto de cruce y el instante en que éste descienda a la calzada. La diferencia entre esos instante corresponde siempre a la demora total de cada peatón pues en este caso no existe un fenómeno de descarga de cola sino que todos lo peatones inician el cruce casi al mismo tiempo.

La medición se debe realizar durante las 4 horas de mayor demanda, incluyendo aquellas en las que se hayan detectado los problemas operativos más severos para los peatones. Durante esas horas se debe registrar el paso de la mayor cantidad de personas de cada acceso del cruce peatonal para generar una muestra suficiente para que la estimación sea confiable.

Los valores deben agruparse y promediarse en intervalos de 15 minutos para obtener la demora media representativa de cada intervalo y así estudiar el cumplimiento de las condiciones señaladas en el Capítulo 4 del Manual de Señalización de Tránsito.

4 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE CAPACIDAD

En este capítulo se detallan los procedimientos para estimar ciertos parámetros que son necesarios para la programación de los semáforos. Principalmente se describe la estimación del flujo de saturación en distintas situaciones y los retardos que determinan el tiempo de verde efectivo.

4.1 Flujo de saturación básico

La capacidad de una pista regulada por un semáforo está dada por $Q = \mu s$ donde μ es la razón de verde efectivo y s el flujo de saturación de la pista. Si bien el flujo de saturación puede ser medido en terreno, cuando eso no es posible, puede ser estimado mediante la siguiente relación:

$$s = \frac{f_a f_p}{f_c} s_b$$

donde f_a , f_p y f_c son factores de corrección por ancho de pista, pendiente de la vía y composición del tráfico, respectivamente, y s_b es el flujo de saturación básico.

El flujo de saturación básico es el flujo de saturación correspondiente a una pista donde solamente circulan autos directos. Estos automóviles directos corresponden a la unidad de referencia para expresar los flujos vehiculares y se denominan Automóviles Directos Equivalentes (ADE).

Según el modelo estimado por Bartel et al (1997)⁶, la expresión para calcular el intervalo de descarga (inverso del flujo de saturación) de los ADE (h_b) es la siguiente:

$$h_b = [1 - 0,0057(A - 3,0)D_{PE}][1,676 + 0,181D_{PD} + 0,126D_{PI} - 0,111D_{PMED} + 0,0062]$$

donde:

- h_b : intervalo de descarga básico (s)
- A : ancho de la pista (m)
- D_{PD} : 1, si el vehículo circula por pista derecha; 0, en otro caso
- D_{PI} : 1, si el vehículo circula por pista izquierda; 0, en otro caso
- D_{PMED} : 1, si es punta mañana; 0, en otro caso
- D_{PE} : es una variable 0-1 para identificar pistas ubicadas en los extremos derecho o izquierdo de la calzada. El ancho de pista solamente tiene efecto para vehículos que circulan por las pistas derecha o izquierda: $D_{PE} = D_{PD} + D_{PI}$

⁶ 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.

Esta formulación del intervalo de descarga puede expresarse como el producto de un factor de corrección f_a dependiente del ancho de la pista (A) y el flujo de saturación básico (s_b), dados por las siguientes expresiones que incluyen aproximaciones:

$$f_a = 1 + 0,058(A - 3,0)D_{PE}$$

$$s_b = 2.141 - 208D_{PD} - 149D_{PI} + 151D_{PMED} - 29D_{PD}D_{PMED} - 22D_{PI}D_{PMED}$$

En el siguiente cuadro se muestran los valores resultantes para el flujo de saturación básico.

Cuadro 4-1 Flujo de saturación básico (ADE/h-pista)

Período	Pista Derecha	Pista Izquierda	Pista Central
Punta Mañana	2.055	2.121	2.292
Otro	1.933	1.992	2.141

A partir de esta formulación del ADE se definen expresiones para calcular los factores de equivalencia que transforman flujos de distintos tipos de vehículos a un flujo equivalente formado solamente por ADE, como se describe a continuación.

4.2 Tratamiento de la heterogeneidad

4.2.1 Heterogeneidad por tipo de vehículo

4.2.1.1 Auto directo en tráfico mixto

El factor de equivalencia para los efectos de calcular la capacidad en intersecciones se obtiene del cociente entre los intervalos promedio de descarga de un cierto tipo de vehículo-movimiento y el correspondiente al ADE.

El efecto del tipo de vehículo y el tipo de movimiento pueden tratarse por separado. Lo que se indica en esta sección se refiere al factor de equivalencia por tipo de vehículo. Esto se logra analizando solamente a los vehículos que realizan una determinada maniobra, que por definición corresponde al movimiento directo.

En función de lo anterior, en el caso del automóvil directo en pistas con tráfico mixto (ADM), es decir, en las que circulan vehículos pesados, el factor de equivalencia (f_{ADM}) está dado por:

$$f_{ADM} = h_{ADM}/h_b$$

donde

$$h_{ADM} = (1 - 0,057(A - 3,0)D_{PE})(1,676 + 0,181D_{PD} + 0,126D_{PI} - 0,111D_{PMED}) \\ + \frac{0,2161}{1 + 34\exp(-20,609 \cdot TP)}$$

$$TP = \frac{q_{PD}}{q_{AD} + q_{PD}}$$

q_{PD} : flujo de vehículos pesados directos en la pista (veh/h)

q_{AD} : flujo de autos directos en la pista (veh/h)

Realizando algunas simplificaciones se obtiene finalmente el factor de equivalencia del ADM mediante la siguiente relación:

$$f_{ADM}(TP) = 1 + \frac{\frac{0,2161}{1 + 34\exp(-20,609 \cdot TP)} - 0,0062}{h_0}$$

donde

$$h_0 = 1,676 + 0,181D_{PD} + 0,126D_{PI} - 0,111D_{PMED} + 0,0062$$

es el intervalo de descarga básico sin considerar el efecto del ancho de pista.

Los valores de f_{ADM} varían entre 1,0 y 1,134 según la posición de la pista en el acceso, el período de análisis y la proporción de vehículos pesados. En el enfoque tradicional un automóvil siempre tiene factor de equivalencia por tipo de vehículo igual a 1.

4.2.1.2 Bus directo

En forma análoga al caso del ADM, el factor de equivalencia para el bus directo resulta igual:

$$f_{BD} = \begin{cases} f_a \frac{2,482}{h_0} & \text{para pistas central o izquierda} \\ f_a \frac{3,125}{h_0} & \text{para pista derecha} \end{cases}$$

donde f_a es el factor de corrección por ancho de pista descrito en la sección 4.2.3.1. El factor f_{BD} es independiente del porcentaje de vehículos pesados en la pista, es decir, la descarga de buses directos no se afecta por la existencia de otros buses en la pista.

Para buses articulados se recomienda que el factor de equivalencia sea el del bus directo amplificado por 1,5.

4.2.1.3 Camión directo

A la fecha no existe un estudio que haya determinado el factor de equivalencia para el camión directo (f_{CD}). Por esta razón se recomienda utilizar como aproximación el factor correspondiente al bus directo en pista central, de esta manera se tendrá para cualquier pista:

$$f_{CD} = \frac{2,482}{h_0}$$

Este factor corresponde a camiones de 2 ejes, que tienen un tamaño similar a los buses utilizados en el trabajo de Gibson y Bartel. Para vehículos de mayor tamaño (más de 2 ejes) se amplificará este factor en función de longitud de los vehículos, tal como se indicó para los buses articulados.

4.2.1.4 Otros tipos de vehículos

Mientras no existan expresiones propias para los factores de equivalencia de otros tipos de vehículos, tales como taxis y taxiscolectivos, se recomienda estimarlos a partir de los señalados previamente aplicando reglas de tres con los factores de equivalencia señalados en el MESPIVU. Para bicicletas, se recomienda usar un factor entre 0,20 y 0,26 según tipo de vehículo y características de la vía.

4.2.2 Heterogeneidad por tipo de movimiento

Como se mencionó en la sección 4.2.1 los efectos del tipo de vehículo y tipo de movimiento se tratan por separado. Se trata a continuación el efecto del tipo de movimiento, para eso se asume que lo que analizan son vehículos livianos.

Los tipos de movimientos que realizan los vehículos desde una pista en una intersección son directo, viraje a la derecha y viraje a la izquierda. Esos movimientos pueden además tener o no interferencia de otros movimientos, que son prioritarios para los primeros.

Para los movimientos directos, por definición, su factor de equivalencia por tipo de movimiento es 1 pues el ADE corresponde a automóviles directos. Para virajes sin oposición el factor de equivalencia (f_v) es función del radio de giro del movimiento (R_g) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$f_v = \begin{cases} 1 + \frac{1,5}{R_g} & R_g < 10 \text{ m} \\ 1 + \frac{150}{R_g^3} & R_g \geq 10 \text{ m} \end{cases}$$

donde R_g se mide en metros y es dependiente de la geometría de la intersección. El factor f_v se refiere a vehículos livianos y, por lo tanto, tiene unidades de ADE/VEQ. Por lo tanto, se puede aplicar multiplicativamente con el factor por tipo de vehículo descrito en la sección 4.2.1 para generar un factor compuesto en unidades de ADE/veh.

Si no es posible medir el radio de giro se podrá utilizar la siguiente función, determinada a partir del trabajo de Herrera y Coeymans (1998)⁷:

$$R_g = 0,98R_r + 0,629A$$

donde

$$R_r = \begin{cases} R_a + \frac{(NP - 1)AP}{2} & \text{viraje a la derecha} \\ R_a + \frac{(NP - 1)AP}{2} + \min(a, b) & \text{viraje a la izquierda} \end{cases}$$

$$A = N - n$$

⁷ Herrera J.C. y Coeymans J. (2002) "Estimación de parámetros de capacidad en pistas con viraje" publicado en las Actas del XII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte.

donde

R_a : radio de la acera, que se medirá de la información planimétrica que esté disponible o se estimará en función de la clasificación que le dé el ingeniero modelador. Esto es, estrecho, normal y amplio, y se utilizarán los siguientes valores por defecto: 4,5 m., 6 m. y 9 m., respectivamente.

NP : número de pistas utilizadas para virar.

AP : ancho total de las pistas utilizadas para virar.

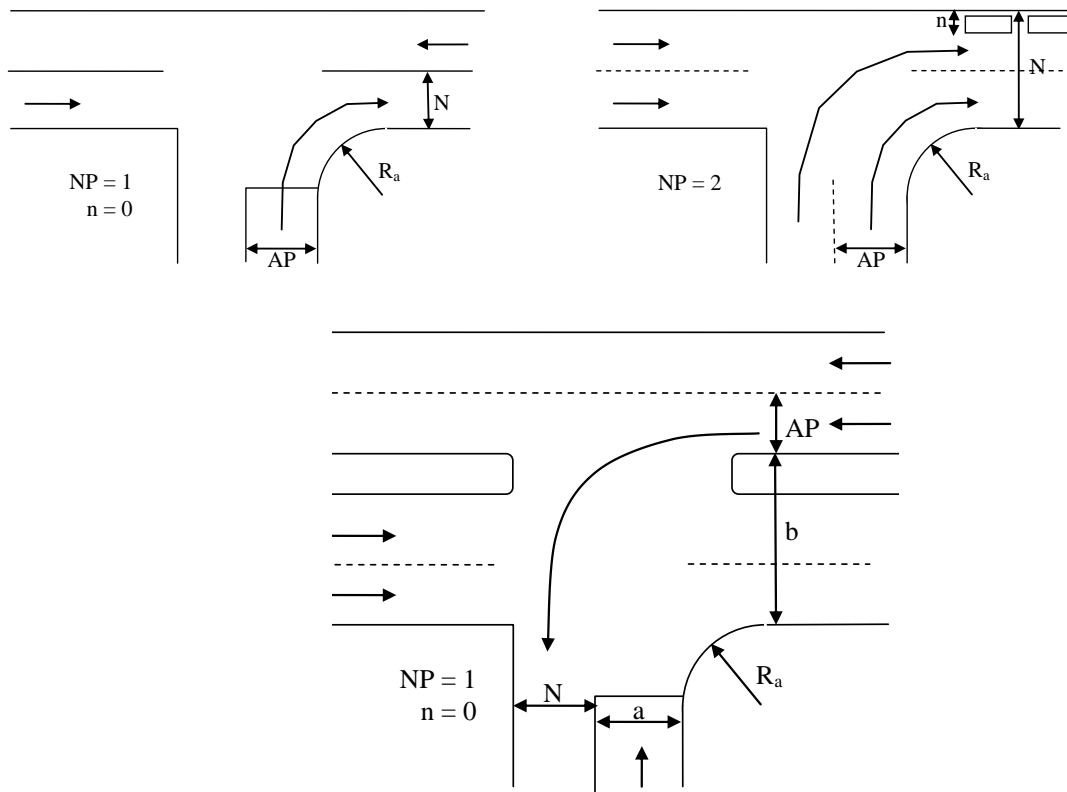
N : ancho total de las pistas que reciben el viraje (suma de los anchos de cada pista).

n : ancho no disponible, que restringe el radio del viraje, por ejemplo, debido a vehículos estacionados.

a : en la vía a la que se accede, es la distancia entre la acera del sentido opuesto y las pistas a las cuales se vira. En el caso de vía unidireccional su valor es igual a cero.

b : en la vía desde la que se accede, es la distancia entre la acera del sentido opuesto y la pista desde la que se vira. En el caso de vía unidireccional su valor es igual a cero.

Todas las distancias señaladas previamente están medidas en metros. En las figuras siguientes se muestran algunos ejemplos en donde se indican las variables involucradas en la función del radio de giro.



Cuando el viraje es con oposición, vehicular o peatonal, el proceso de descarga ya no se atiene al modelo binario (verde efectivo, rojo efectivo) pues se introduce el paso por aceptación de brechas en la corriente opositora, que es prioritaria. Por esta razón no se pueden aplicar factores de equivalencia. En cambio, se deben utilizar métodos analíticos o de simulación especiales que introducen explícitamente el efecto de interacción entre corrientes vehiculares, tal como está implementado en SIDRA.

4.2.3 Heterogeneidad por características geométricas de la pista

Las características geométricas de la pista que afectan el flujo de saturación son el ancho y la pendiente. Los respectivos factores de corrección son los siguientes.

4.2.3.1 Factor de corrección por ancho de pista

Sea A el ancho de la pista en metros, entonces el factor de corrección por ancho de pista (f_a), asociado al flujo de saturación básico descrito en la sección 4.1, está dado por la siguiente expresión:

$$f_a = 1 + 0,058(A - 3,0)D_{PE}$$

Este factor de corrección se activa solamente para pistas extremas (aquellas que están confinadas por una solera) y es adimensional.

4.2.3.2 Factor de corrección por pendiente

Sea p la pendiente en porcentaje, positiva para bajadas y negativa para subidas, en el sentido de circulación; entonces el factor de corrección por pendiente (f_p) es igual a:

$$f_p = 1 + 0,5 \frac{p}{100}$$

Este factor es adimensional y válido para $-15\% \leq p \leq 15\%$. Para pendientes inferiores a 4% (en valor absoluto) se podrá ignorar esta corrección dado que el efecto sobre el flujo de saturación es igual o inferior al 2%.

4.2.4 Flujo de saturación considerando heterogeneidad por tráfico mixto y características de la pista

En el caso general existirán efectos sobre el flujo de saturación producto de la heterogeneidad del tráfico y las características geométricas de la pista. En ese caso el flujo de saturación de la pista (s) está dado por:

$$s = \frac{f_a f_p}{f_c} s_b$$

con

$$f_c = \frac{\sum_i f_{tipo,i} f_{mov,i} q_i}{\sum_i q_i}$$

La variable f_c es el factor de composición del flujo en la pista. Los flujos q_i se expresan en veh/h y s_b se obtiene a partir de lo descrito en la sección 4.1.

Los factores de corrección $f_{tipo,i}$ y $f_{mov,i}$ recogen las diferencias entre la corriente real y la básica, en relación con los tipos de vehículo y movimiento, expresados en VEQ/veh y ADE/VEQ, respectivamente. Los primeros se describieron en la sección 4.2.1, los segundos en la sección 4.2.2.

Considerando que en T8S los flujos se expresan en unidades de VEQ/h, es necesario adaptar la expresión del factor de composición (f_c) indicada recién para que éste quede expresado en ADE/VEQ, tal como sigue:

$$f_c = \frac{\sum_j f_{tipo,j} f_{mov,j} q_j}{\sum_j f_{tipo,j} q_j}$$

donde q_j es el flujo de clase j (tipo-movimiento) en la pista analizada expresado en veh/h y $f_{tipo,j}$ y $f_{mov,j}$ son los factores de equivalencia por tipo de vehículo y tipo de movimiento para la clase j , ya mencionados.

4.3 Estimación de flujos de saturación dependientes de la programación

En las secciones 4.1y 4.2 de este anexo se asumió, implícitamente, que el flujo de saturación es función solamente de características físicas y operativas de la pista analizada. Sin embargo, hay casos donde la programación del semáforo tiene influencia en el proceso de descarga de la cola y, por lo tanto, en el flujo de saturación. En esta sección se tratan dos casos particulares de esta situación: pistas cortas y pistas con paradero de buses.

4.3.1 Pistas cortas

Una pista corta es aquella cuya longitud es inferior a la del tramo de vía en el cual se ubica. En la mayor parte de los casos corresponden a pistas de viraje exclusivo, generadas, por ejemplo, para dar mayor capacidad al acceso y definir una fase especial a ese tipo de movimientos, o bien a pistas en que existe estacionamiento en la calzada hasta cierta distancia de la línea de detención.

La estimación de la capacidad de una pista corta se basa en determinar el tiempo que demoraría en descargarse una cola que ocupe completamente la pista corta y comparar ese tiempo con el verde efectivo correspondiente a la pista. Si la cola demora más tiempo en descargarse entonces la pista operará como pista normal (el tiempo de verde estará completamente saturado), por el contrario, si el tiempo de descarga es menor que el verde efectivo entonces habrá efecto de pista corta y será necesario un procedimiento especial para calcular su capacidad.

Sea entonces ve' (s) el tiempo de descarga de la cola que se formaría en la pista corta durante el período de rojo y que está dado por la siguiente expresión:

$$ve' = \frac{D}{j \cdot s}$$

donde:

D : es la longitud de la pista corta (m)

j : es el espaciamiento promedio de los vehículos en la cola (m/veh)

s : es el flujo de saturación de la pista si fuese una pista normal (veh/s), obtenido como se indica en las secciones 4.1 y 4.2

A partir de estas definiciones es posible demostrar que el flujo de saturación de la pista corta (s_{pc}) está dado por:

$$s_{pc} = \begin{cases} s \frac{ve'}{ve(1 - \frac{ve - ve'}{c})} & \text{si } ve' \leq ve \\ s & \text{si } ve' > ve \end{cases}$$

donde ve (s) es el verde efectivo de la pista corta.

El proceso de cálculo del flujo de saturación es iterativo e involucra los siguientes pasos:

1. Obtener s a partir de la metodología descrita para pistas normales.
2. Calcular ve' , verificando inicialmente que $ve' < ve$. En la primera iteración utilizar el verde efectivo mínimo.
3. Si $ve' > ve$ entonces $s_{pc} = s$.
4. Si no se cumple 3, obtener s_{pc} según la expresión ya indicada y correr T8S en modo equisaturación. Para la primera iteración se sugiere utilizar el tiempo de ciclo actual del semáforo.
5. Volver al paso 2 utilizando ahora el verde efectivo obtenido en el paso 4 (ve). El proceso se detiene en la iteración k cuando $ve_{k+1} \approx ve_k$.

Si con la programación resultante la pista corta queda saturada habrá traspaso de flujo a la pista adyacente. T8S no modela este fenómeno y habrá que recurrir a un ajuste ad-hoc con SIDRA, recalculando el flujo de saturación de la pista adyacente. Esto se trata en el Capítulo 7. Cabe reiterar que el flujo de saturación en T8S debe especificarse en VEQ/h.

4.3.2 Pistas con paraderos de buses

La estimación del flujo de saturación descrita en la sección 4.2 no considera la interferencia de paraderos de buses cercanos a la intersección. Es conocido que la presencia de esos dispositivos produce una disminución del flujo de saturación. Pero hay que tener en cuenta que este efecto es relevante en la medida que el paradero esté cercano a la intersección y que tenga niveles elevados de congestión.

Si un paradero está saturado, produce un efecto equivalente al de una pista corta, cuya extensión abarca desde la LD hasta el primer sitio del paradero. Entonces, se puede hacer la analogía con lo señalado en el punto anterior, donde D será ahora la distancia desde el primer sitio del paradero a la línea de detención aguas abajo, pero con la salvedad que durante el período ve'' el paradero contribuye a la capacidad de la pista con su propia capacidad Q_p , donde $ve = ve' + ve''$.

Con estas consideraciones se llega a que si el paradero está saturado, el flujo de saturación de la pista donde se ubica el paradero está dado por:

$$s_{sat} = \begin{cases} s \frac{ve'}{ve(1 - \frac{ve - ve'}{c})} + Q_p(1 - \frac{ve'}{ve}) & \text{si } ve' \leq ve \\ s & \text{si } ve' > ve \end{cases}$$

donde ve' se calcula con la misma expresión del punto precedente, D es la distancia del primer sitio del paradero a la línea de detención y Q_p es la capacidad del paradero en VEQ/h.

En la condición opuesta, paradero siempre vacío, la pista será normal y su flujo de saturación será s . Suponiendo que hay una variación lineal entre estos extremos, el flujo de saturación de la pista con paradero queda dado por:

$$s_{pa} = s - x_p(s - s_{sat})$$

donde x_p es el grado de saturación del paradero ($x_p = q_p/Q_p$). Nótese que si $ve' \geq ve$, la pista será normal con independencia de x_p . Por otra parte, si $ve' = 0$ (porque $D \approx 0$, paradero en la misma línea de detención) entonces $s_{sat} = Q_p$, como debe ser. Si el paradero está saturado, se impone el valor $x_p = 1$.

Para aplicar estas expresiones se requiere tener una estimación de Q_p y de x_p , sólo cuando $ve' < ve$. El algoritmo es análogo al de la sección 4.3.1. Para estimar Q_p se puede utilizar el software especializado IRENE⁸ o bien aplicar, como aproximación, los valores estimados en Gibson y Fernández (1995)⁹ que se indican en el cuadro siguiente.

Cuadro 4-2 Capacidad de paraderos de buses

Demanda (pax/bus)	Operación ordenada (1)				Operación desordenada (2)
De subida	12	8	4	2	8
De bajada	6	4	2	1	4
Nº de sitios	Capacidad (bus/h)				
2	100	133	167	217	117
3	133	175	208	267	133

(1) Disciplina FIFO y detención única en el sitio más próximo a la salida, (2) disciplina FIAO y detenciones múltiples en cualquier sitio

Para la estimación del grado de saturación del paradero se supondrá que el flujo total de buses que pasa por la pista del paradero se detiene a tomar pasajeros. De igual forma, en aquellos paraderos con paradas divididas, se asumirá que todos los buses que deben detenerse en el paradero efectivamente lo harán.

⁸ Beckett, R. (1990) "Sistema de apoyo al diseño y modelación de paraderos de buses". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Computación. Universidad de Chile y Baeza, I. (1989) "Estimación de la capacidad de paraderos de buses". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

⁹ Gibson, J. y Fernández, R. (1995) "Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad" Apuntes de Ingeniería 18(1), pp. 35-50. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago.

Por otro lado, es necesario considerar que si el paradero está cercano a la intersección, la programación del semáforo puede reducir su capacidad. Para incorporar este efecto del semáforo aguas abajo se deben utilizar los resultados descritos en Gibson (1996) que entregan ponderadores de la capacidad del paradero en función del tiempo de ciclo, razón de verde efectivo y distancia entre el paradero y la línea de detención. Los ponderadores se indican en el Cuadro 4-3.

Lo anterior puede generar una circularidad en el procedimiento, ya que la programación del semáforo (a través del flujo de saturación) y la capacidad del paradero pueden ser mutuamente dependientes. Para resolverla, hay que tomar primero el valor de Q_p sin ninguna reducción y proceder hasta programar el semáforo. Hecho esto, hay que determinar el monto de reducción que corresponde aplicar. Si es mayor a un 10%, hay que iterar. Para ello, se recalcula el flujo de saturación a partir del Q_p reducido y se reprograma el semáforo, repitiendo el paso si es necesario.

Cuadro 4-3 Ponderador de la capacidad del paradero por efecto del semáforo aguas abajo

D (m)		Disciplina de salida de buses desde el paradero					
		FIFO (1)			Adelantamiento permitido		
		Tiempo de ciclo (s)			Tiempo de ciclo (s)		
μ	60	90	120	60	90	120	
0-12	0,38	77	60	59	80	71	68
	0,48	80	72	70	85	81	77
	0,58	84	82	77	89	87	84
	0,68	89	89	85	92	92	90
13-24	0,38	86	72	67	91	83	79
	0,48	87	80	78	93	90	86
	0,58	89	88	85	95	94	92
	0,68	92	92	90	97	95	95
25-36	0,38	98	94	84	99	98	95
	0,48	98	97	92	100	100	97
	0,58	100	98	97	100	100	100
	0,68	100	100	100	100	100	100

μ : razón de verde, D: distancia al paradero (m), (1): sistema sin adelantamiento, el primero que entra es el primero que sale.

4.4 Retardos inicial y final

Otros parámetros relevantes en la estimación de la capacidad de una pista regulada por semáforo son la pérdida inicial y ganancia final (λ_1, λ_2), que determinan el tiempo de verde efectivo a partir del verde del semáforo: $ve = V + \lambda_2 - \lambda_1$.

Los valores encontrados para λ_1 y λ_2 por Gibson et al (1997) son los que muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 4-4 Pérdida inicial y ganancia final por tipo de pista

Tipo de pista	Valor del parámetro (s)		
	λ_1	λ_2	$\lambda_1 - \lambda_2$
Derecha	3,256	1,738	1,518
Izquierda	3,349	2,080	1,269
Central	3,740	2,347	1,393

Se puede apreciar que la diferencia entre estos dos parámetros es estable entre pistas. Por lo tanto, sin cometer mayor error se puede usar $\lambda_1 - \lambda_2 = 1,4$ s. Esto implica que el verde efectivo es más corto que el verde del semáforo en 1,4 s.

4.5 Estimación de flujo de saturación mediante planilla electrónica

El modelo de estimación de flujo de saturación descrito en las secciones 4.1 y 4.2 se basa en datos de flujo vehicular y geometría de cada pista. Como la información de flujos habitualmente se tiene por movimiento y no por pista, se requieren antecedentes adicionales para utilizar ese método de estimación. Una alternativa es suponer que los flujos vehiculares se distribuyen entre las pistas disponibles buscando igualar el grado de saturación de cada una. No obstante, al utilizar este supuesto, y dada la expresión no lineal del factor de equivalencia del ADM, se genera un problema matemático para encontrar los flujos por pista que en ciertos casos no puede ser resuelto analíticamente, requiriéndose en cambio el uso de un método numérico.

Por lo anterior, se desarrolló una planilla electrónica de cálculo que automatiza el proceso de estimación del flujo de saturación según el modelo descrito previamente. La planilla se denomina “Estima-FS.xls” y recibe información de flujos vehiculares por movimiento y tipo de vehículo y características físicas y operativas de cada pista dentro de una línea de detención y entrega el flujo de saturación por pista. En el proceso de estimación se aplican los procedimientos descritos en la sección 4.3 para tratar los casos en que el flujo de saturación depende de la programación.

La planilla puede procesar tantas líneas de detención como defina el usuario y está disponible gratuitamente en el sitio web de la UOCT.

A continuación se entrega la descripción del ingreso de datos y el uso de la planilla.

4.5.1 Datos de entrada

Para cada LD definida en la red de modelación T8S se deben ingresar distintos datos referidos a las características físicas y operativas de las pistas que la componen. Una LD queda representada en una fila de la hoja denominada “Datos y Resultados” de la planilla Estima-FS. Los datos deben provenir del catastro operativo de la red u otra fuente confiable. La información requerida es propia, en algunas variables, de cada período y es la siguiente:

- Código de identificación de la LD
- Número de pistas compartidas en la LD
- Período de análisis: punta mañana=1 u otro=0

- Tiempo de verde efectivo para la LD: inicialmente puede asumirse igual al tiempo mínimo de verde efectivo
- Flujos vehiculares por movimiento y tipo de vehículo (veh/h) en el período de análisis. Se distinguen al menos vehículos livianos, buses y camiones y movimiento directo, viraje a la izquierda y viraje a la derecha.
- Variables geométricas para el cálculo del factor de equivalencia para virajes a la derecha e izquierda, según procedimiento indicado en la sección 4.2.2.
- Características geométricas y operativas de cada pista que forma parte de la LD. Esto incluye: ancho; longitud de pista corta o distancia desde paradero a línea de detención; variables 0-1 que indican si se trata de pista corta, posición de la pista dentro del acceso (derecha, izquierda, extrema) y movimientos permitidos o existentes según tipo de vehículo; % de uso de pista por parte de buses directos; y capacidad de paradero de transporte público (si existe).

La planilla soporta hasta 4 pistas compartidas en cada LD, pero puede ser expandida para considerar más si fuese necesario. Esto requiere modificar las fórmulas y macros que realizan los cálculos. Una alternativa para estudiar líneas de detención con más pistas es modelar el correspondiente acceso con más de una LD, de modo que cada una tenga 4 o menos pistas.

4.5.2 Uso de la planilla

Una vez ingresados los datos necesarios de cada LD en la hoja “Datos y Resultados” se puede realizar el proceso de estimación del flujo de saturación de cada una. Para esto se presiona el botón “Calcular” de la hoja “Cálculos”. Eso activa el proceso automatizado de verificación de errores en el ingreso de datos y de cálculo de equisaturación y factores de equivalencia. Para cada pista se asume que el flujo de saturación básico es el correspondiente según el período del día y la posición relativa de la pista en el acceso.

En líneas de detención cuya capacidad dependa de la programación del semáforo (pistas cortas o con paraderos) se requiere un proceso iterativo según lo descrito en la sección 4.3. Como se explica en esa sección, con la estimación inicial del flujo de saturación se corre T8S y se obtiene la programación óptima, luego el correspondiente verde efectivo se ingresa en la fila respectiva de la hoja “Datos y Resultados” y se calcula nuevamente el flujo de saturación. El proceso se detiene cuando no se observen cambios relevantes en las variables analizadas (programación y flujo de saturación).

En ciertos casos podría ser necesario recurrir a SIDRA para estudiar situaciones complejas, como se explica en el Capítulo 7.

En la hoja “Ayuda” de la planilla se explica brevemente el ingreso de datos y el funcionamiento de la planilla. Además, en celdas relevantes se incluyen comentarios que facilitan el uso y análisis de resultados.

Para utilizar la planilla debe activarse previamente el complemento “Solver” de MS Excel y luego se debe referenciar ese complemento con el menú Herramientas/Referencias del editor de Visual Basic para Aplicaciones de MS Excel. Este procedimiento solamente se debe realizar una vez por cada computador donde se utilice la planilla.

4.5.3 Resultados entregados

A la derecha de los datos ingresados en la hoja "Datos y Resultados" se reportan los resultados de la aplicación del método de estimación de flujo de saturación y una serie de advertencias automáticas para señalar errores en el ingreso de datos o en el procesamiento de los datos. Los resultados se muestran en la misma fila que los correspondientes datos de entrada.

Antes de utilizar los resultados generados por la planilla es necesario revisar los errores o advertencias que se muestren en la hoja "Datos y Resultados". Los errores más frecuentes son incompatibilidades entre los flujos por movimiento y el uso de pistas definido. Por ejemplo, si hay flujo que vira a la derecha debe existir al menos una pista en la LD que permita ese movimiento. Otra situación que debe ser analizada es cuando no es posible lograr una razonable igualdad en los grados de saturación de las pistas que forman la LD. Eso ocurre cuando la magnitud de flujos y el uso de pistas definido son insuficientes para generar una distribución por pista con grados de saturación similares. Ante esa situación se debe revisar el uso de pistas y eventualmente la conformación de la LD pues podría ser incorrecto asumir equisaturación en todas las pistas definidas originalmente como compartidas.

Una vez que se hayan resuelto los problemas detectados, el flujo de saturación de una LD (s_{LD}) será la suma de los flujos de saturación (s_n) de las pistas que la componen.

$$s_{LD} = \sum_{n \in LD} s_n$$

Lo mismo aplica para los flujos vehiculares. La planilla entrega los valores en veh/h y VEQ/h y, por lo tanto, esos últimos pueden ser ingresados directamente a T8S.

5 SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

5.1 Simulación

La exigencia de simular la situación actual tiene como objetivo validar los criterios de modelación y los parámetros empleados para representar la circulación en las intersecciones y vías analizadas. Esto es importante porque la programación de los semáforos descansa en el supuesto que el modelo construido es capaz de representar adecuadamente la operación de los cruces ante cambios en sus programaciones. El contraste de los resultados del modelo con la realidad, y los eventuales cambios que se implementen en él, son fundamentales entonces para lograr suficiente confianza en la calidad de las programaciones que se obtengan.

La simulación de la situación actual se debe realizar para los períodos punta definidos en la periodización. En función del análisis de los resultados en cada uno se identifican y luego implementan los ajustes de la modelación, etapa que se denomina calibración.

5.2 Metodología de calibración

La calibración del modelo de tránsito construido para optimizar las programaciones consiste en comparar las magnitudes observadas de ciertas variables con las estimadas por el modelo, y luego, eventualmente, modificar el modelo para que entregue valores más consistentes con lo observado.

A continuación se describen las variables de calibración, la metodología que se debe utilizar y el procedimiento a seguir.

5.2.1 Variables de calibración

Para calibrar el modelo de tránsito desarrollado se utilizará la longitud de cola vehicular promedio o excedente, según se trate de intersecciones de prioridad o semaforizadas, respectivamente. En el caso de redes se puede incluir también el tiempo de viaje como variable de calibración, pero teniendo precaución de medir el tiempo de viaje que el modelo computacional estime.

Como los datos de flujo se toman cada 15 minutos, los datos de longitud de cola deben agruparse con igual resolución temporal y luego promediarse. La longitud de cola se refiere a cada pista de circulación y se mide en vehículos, especificando su composición.

En intersecciones semaforizadas la longitud de cola excedente representa el número medio de vehículos que quedan en cola al iniciarse el rojo efectivo. Se debe medir en cada ciclo durante el período analizado.

La calibración de intersecciones de prioridad para la programación de intersecciones aisladas o redes de semáforos se realizará cuando esas intersecciones de prioridad sean relevantes para la optimización de las programaciones. La medición en ese caso se debe realizar contabilizando los vehículos en cola en intervalos regulares, por ejemplo, cada 1 minuto durante el período de análisis.

5.2.2 Calibración de intersecciones aisladas

En intersecciones aisladas únicamente se calibra con longitudes de cola en los dos accesos más saturados en cada período punta. No es necesario, pero si conveniente, que se disponga de mediciones en otros accesos. La longitud de cola observada se debe comparar con el valor respectivo predicho por

el modelo de tránsito utilizado. No hay suficiente experiencia para establecer límites rígidos de tolerancia y debe tenerse en cuenta que se trata de variables con alta dispersión para las cuales la muestra es pequeña. En este contexto, se formulan a continuación algunos requerimientos para guiar el proceso.

5.2.2.1 Intersecciones no semaforizadas

En intersecciones no semaforizadas es esencial, en primer lugar, que la evolución temporal de la cola predicha siga la misma tendencia que la observada. Cabe esperar sin embargo, que haya diferencias apreciables (incluso del orden de un 20%) entre valores puntuales sin que ello implique que la modelación es errónea. Es un indicio preocupante que esas diferencias muestren un comportamiento sesgado entre accesos o pistas de un mismo acceso, o bien entre períodos.

5.2.2.2 Intersecciones semaforizadas

En intersecciones semaforizadas no hay posibilidad de contrastar la evolución temporal al interior de cada hora. Por ello conviene utilizar dos indicadores de calibración. El primero, directo, es la máxima extensión de la cola en cada pista; SIDRA entrega una predicción para esta variable. Por otra parte, la cola excedente medida sirve para obtener una estimación del grado de saturación, mediante la siguiente relación:

$$x = \frac{2N_0 \left(1 + \frac{2N_0}{QT}\right)}{1 + 2N_0}$$

donde x es el grado de saturación, N_0 es la cola excedente observada, Q es la capacidad de la pista (veh/h) y T es la duración del período simulado (h). El grado de saturación así obtenido se puede comparar con el valor que entrega SIDRA. Este indicador es más importante que el primero porque es menos afectado por desviaciones del patrón de llegadas con respecto a la aleatoriedad que se supone. La comparación de grados de saturación debe tener en consideración la existencia de un uso compartido de algunas pistas. En este caso, SIDRA predice igual x para todas ellas, pero eso no tiene por qué suceder con la ecuación indicada. Por un lado, interesa que el promedio del estimador entre pistas compartidas, con la debida ponderación, no tenga diferencias superiores a un 5% con el valor predicho. Por otro, estimadores claramente distintos entre pistas compartidas sugieren la presencia de algún fenómeno de subutilización no modelado. La máxima extensión de la cola sirve para corroborar o poner en duda las conclusiones que arroja la comparación de grados de saturación.

5.2.3 Calibración de ejes o redes

En la simulación de una red, T8S genera directamente una predicción de la longitud de cola excedente en cada arco de la red. Es posible entonces hacer una calibración extensiva, pero que debe estar dentro del presupuesto disponible.

En el proceso de calibración el programa T8S se debe utilizar en modo simulación, activando la opción OPTIMISE NONE e ingresando en la tarjeta 31 las programaciones vigentes al momento en que se realizaron las mediciones de tránsito. En caso de dudas sobre la información de programaciones, éstas se deben medir en cada período, incluidos los desfases, en los mismos días en que se midan las restantes variables de tránsito.

Si se trata de la calibración de un eje hay que contemplar al menos dos tramos que incluyan las intersecciones más relevantes. Si se trata de redes, como mínimo se deben contrastar seis rutas interiores homogéneamente distribuidas. Se debe medir la longitud de cola excedente al menos en el acceso más saturado de cada una de las intersecciones semaforizadas considerada en los tramos o rutas.

Luego, la cola excedente observada se compara directamente con la componente de demora aleatoria y por sobresaturación que entrega T8S, ver sección 2.4. Es necesario tener en cuenta que el dato observado está por pista y la estimación de T8S por arco (que puede agrupar a varias pistas); hay que encontrar combinaciones de arcos que se correspondan con pistas y hacer la comparación con los valores debidamente agregados y convertidos a vehículos.

5.3 Desarrollo de la calibración

Las comparaciones recomendadas de colas pueden conducir a una gran cantidad de cifras individuales que cabe esperar presenten un comportamiento variado que debe ser analizado por personal con experiencia en la materia.

No es el propósito de la calibración realizar ajustes en determinadas variables localmente hasta que todas esas cifras se consideren satisfactorias. El proceso debe ser más estructurado. Una mala calibración puede provenir de dos factores: representación errónea de algunos fenómenos o valores inadecuados de algunos parámetros. El primero es de carácter localizado, en cambio el segundo dice relación con un procedimiento más general dada la forma sugerida para especificar capacidades y velocidades.

En consecuencia, conviene empezar por corregir los errores de modelación, sin alterar parámetros. Agotado ese proceso, hay que buscar una sistematización de los problemas remanentes en orden a identificar insuficiencias en el método de estimación de capacidades empleado. Estas pueden remitir a flujos de saturación básicos, pérdidas en la partida o ganancia de amarillo, factores de equivalencia, etc.

6 OPTIMIZACIÓN DE LAS PROGRAMACIONES

6.1 Consideraciones iniciales

El cálculo de programaciones óptimas de semáforos se debe realizar siguiendo el procedimiento en etapas que se describe en las siguientes secciones.

6.1.1 Obtención de información primaria

En esta etapa se deben recopilar los siguientes antecedentes para cada intersección.

- Características geométricas: longitudes de tramos de vía (arcos), anchos de pista, pendientes por acceso (sólo si son significativas) y radios de giro.
- Flujos vehiculares y peatonales por período.
- Tiempos de viaje por arco y período.
- Catastro operativo: en que se indiquen los movimientos autorizados y qué pistas utilizan (por acceso y categoría de vehículo), localización de paradas de buses y estacionamientos, lugares de cruce peatonal, existencia y origen de problemas de bloqueo o subutilización sistemática de ciertas pistas.
- Medición de flujos de saturación, pérdidas iniciales y ganancias finales, para casos en que no sea adecuado utilizar estimaciones debido a la complejidad de los fenómenos que ocurren.
- Diagnóstico y medidas de gestión: tales como rediseños menores, autorización de movimientos, cambios en el uso de pistas, regulación de estacionamientos, paradas de buses, etc., que sean necesarios para generar una situación inicial sin problemas evidentes de subutilización de capacidad. Si se identifican medidas de esta clase, ellas deben incorporarse a la modelación de la red después de terminar la etapa de simulación de la situación actual.

6.1.2 Diseño básico de la programación

La etapa de optimización de las programaciones requiere que previamente se definan el diseño de fases, tiempos mínimos de verde y grados de saturación prácticos en cada fase. Se deben realizar entonces las siguientes actividades:

- Identificación de movimientos críticos.
- Diseño de fases (estructura y secuencia).
- Diseño de entreverdes y verdes mínimos.
- Definición de grados de saturación prácticos por movimiento o por intersección.

Luego se debe llevar a cabo el proceso de periodización y conformación de redes o la periodización para intersecciones aisladas, según sea aplicable, y la correspondiente modelación apoyada por un programa computacional de simulación.

Con estos antecedentes se procede a la optimización de las programaciones, proceso que se describe en la siguiente sección.

6.1.3 Procedimiento general de optimización

A partir del diseño operativo definido y mediante el uso de SIDRA o T8S y el respectivo modelo de tránsito construido, se debe optimizar la programación de los semáforos para cada período de análisis.

En intersecciones aisladas la optimización se debe realizar siguiendo las recomendaciones del respectivo programa computacional utilizado; se recomienda el uso de SIDRA dada su capacidad para analizar situaciones complejas de interacción entre pistas, bloqueos, etc.

Se debe tener en cuenta también que en períodos punta la programación debe obtenerse con los flujos asociados al sub-período punta de manera que sea adecuada a las condiciones de circulación más críticas. Los flujos del sub-período punta están dados por:

$$q_p = (1 + Z/4)q_a$$

donde q_a es el flujo promedio del arco para el período punta completo y Z es la intensidad de la punta para el movimiento, que se calcula como se indica en el punto 1.2.3 de este anexo. Con estos flujos debe determinarse el tiempo de ciclo y los repartos en la intersección. En períodos no punta basta utilizar el flujo promedio de cada uno (q_a).

En el caso de redes se utilizará T8S, siguiendo el procedimiento que se indica a continuación:

- Obtención del ciclo óptimo.
- Iteraciones con SIDRA: para determinar la capacidad en aquellos casos que T8S no puede modelar adecuadamente, ver Capítulo 7.
- Obtención de repartos: la determinación de repartos de tiempo de verde se debe realizar mediante el uso de la rutina EQUISAT de T8S, ya que los mejores repartos son los que establecen condiciones de equisaturación para las ramas críticas de la intersección.
- Obtención de desfases: una vez obtenido el ciclo y los repartos, se deben optimizar los desfases. Para ello se utilizan como desfases iniciales (tarjetas 12, 13, 22 y 23) los entregados por T8S en la corrida de obtención de repartos (inicios de fase en la sección Final Setting del archivo de salida) o bien los de la simulación de la situación actual.
- Análisis de resultados: se deben analizar los resultados obtenidos, verificando grados de saturación, bloqueo de arcos cortos, ejes con prioridad de coordinación (mediante los histogramas de flujos), etc. y realizar los ajustes pertinentes.

Cuando se trata de períodos punta, hay que seguir un procedimiento algo diferente en ciertas etapas, lo que se detalla en la sección 6.2.4 más adelante.

6.2 Procedimiento detallado para redes

Se describe aquí con mayor detalle el proceso de optimización de la programación en redes utilizando T8S. Se presenta el proceso de obtención de ponderadores para el cálculo del indicador de rendimiento y los métodos para determinar el tiempo de ciclo y optimizar desfases.

6.2.1 Ponderadores de demoras y detenciones

El indicador de rendimiento de la red es la variable que T8S utiliza como función objetivo a minimizar para encontrar la programación óptima, definida como aquella que minimiza ese indicador sujeto al diseño operativo definido exógenamente.

El indicador de rendimiento de T8S involucra conjuntamente las detenciones y demoras que se producen en la red y, por lo tanto, los resultados del proceso de optimización no son independientes de la valoración que se haga de cada una. Los ponderadores permiten expresar las demoras y

detenciones en unidades monetarias y se definen a nivel global (aplican a todos los arcos por igual) y para cada arco en particular, si se considera necesario.

En el indicador de rendimiento de T8S hay un ponderador, $PDem$, que multiplica a la tasa media de demora (D) y otro, $PDet$, que lo hace a la tasa media de detenciones completas (H), de cada arco de modelación. Ambos se definen como el producto de dos ponderadores, uno general (W, K) y otro específico del arco i (w_i, k_i), como se muestra en las siguientes relaciones:

$$PDem_i = w_i W$$

$$PDet_i = k_i K$$

Dada esta estructura los ponderadores generales se determinan para el tipo de arco predominante en la red, de modo que el ponderador específico por arco para ellos será 1. Para los restantes arcos hay que obtener valores correspondientes.

6.2.1.1 Ponderadores globales

Los ponderadores globales se deben estimar para cada red en forma independiente y dependen fundamentalmente de la velocidad de operación utilizada para la mayoría de los arcos de vehículos livianos, ya que ellos son considerados como arcos de referencia para derivar los ponderadores de otros tipos de arcos.

Para calcular los ponderadores de las demoras ($PDem$) y las detenciones ($PDet$) se deben utilizar las siguientes expresiones:

$$PDem = TOC \cdot VT + C_{ral} P_{comb}$$

$$PDet = C_{det} P_{comb}$$

donde

TOC : tasa de ocupación de vehículos livianos (pax/veq). La unidad para expresar los flujos vehiculares (veq en este caso) debe ser consistente con la que utilice el modelo de tránsito (T8S en este caso).

VT : valor social del tiempo (\$/pax-h), actualizado por MIDEPLAN

C_{ral} : consumo de combustible en ralenti para vehículos livianos (L/h)

P_{comb} : precio social del combustible (\$/L), actualizado por MIDEPLAN

C_{det} : consumo de combustible por detención completa para vehículos livianos, en L/det, valor que depende de la velocidad de operación sin efecto de intersecciones

Los valores de $PDem$ y $PDet$ así calculados utilizando los parámetros del arco de referencia corresponden a W y K , respectivamente.

El valor de W típicamente varía poco ya que la tasa de ocupación de los vehículos livianos es similar en cualquier período, mientras que K varía en función de la velocidad de los vehículos, la cual en general

es distinta entre períodos. Para utilizar valores de similar magnitud, el valor de K se calcula para 100 detenciones.

Se muestra a continuación un ejemplo de cálculo de los ponderadores globales para velocidades de 50 y 60 km/h, asumiendo los siguientes valores para las variables de necesarias (entre paréntesis se indica la fuente),

TOC : 1,5 pax/veq, supuesto

VT : 981 \$/h (MIDEPLAN, año 2010)

C_{rat} : 1,08 L/h (MESPIVU)

P_{comb} : 313,4 \$/L (MIDEPLAN, gasolina 95 octanos, año 2010)

C_{det} : 0,01252 y 0,01638 L/det para 50 y 60 km/h, respectivamente (MESPIVU)

Cuadro 6-1 Cálculo de ponderadores globales

Variable/Parámetro	Automóviles con $v = 50$ km/h	Automóviles con $v = 60$ km/h
W (\$/VEQ-h)	1.810	1.810
K (\$/det)*	392	513
W/K	4,6	3,5

(*) corresponde a 100 detenciones

Los arcos que no correspondan a vehículos livianos o que difieren significativamente en tasa de ocupación o velocidad de los valores generales, tendrá asociados ponderadores específicos, su cálculo se explica a continuación.

6.2.1.2 Ponderadores a nivel de arcos

Los ponderadores a nivel de arco en T8S pueden aplicarse de dos formas:

- Como ajustes de los ponderadores globales (correspondientes a vehículos livianos) que se aplican a demoras y detenciones debido a diferencias en la velocidad, tasa de ocupación o consumo de combustible.
- Como valores arbitrarios para privilegiar la coordinación de ciertos arcos en la optimización de desfases.

Para determinar el valor de los ponderadores específicos asociados al primer punto recién mencionado, el procedimiento consiste en determinar directamente el valor de P_{Dem} y P_{Det} como se explicó en la sección 6.2.1.1, utilizando los parámetros de tasa de ocupación, velocidad y consumo de combustible correspondientes a cada arco.

Luego se dividen los ponderadores resultantes por los valores de W o K , según corresponda, de donde resultan los valores de w_i y k_i que se deben utilizar. En T8S estos ponderadores se introducen en la Tarjeta 31 amplificados por 100 y redondeados al entero más cercano.

El indicador de rendimiento (IR) que utiliza T8S es entonces

$$IR = \sum_{i=1}^n \left(W w_i D_i + \frac{K}{100} k_i H_i \right)$$

donde n es el número de arcos de la red y D_i y H_i son las tasas medias de demoras y detenciones del arco i , respectivamente.

En el siguiente cuadro se muestra un ejemplo de cálculo de la variación de los ponderadores por arco para distintas tasas de ocupación de los buses (A, B y C). Para los buses se utilizó el valor social del diesel (\$396/L) correspondiente al año 2010.

Cuadro 6-2 Cálculo de ponderadores globales y por arco *

Variables	Ponderadores			
	Autos	Buses A	Buses B	Buses C
TOC (pax/veq)	1,5	15	30	45
VT (\$/pax)	981	981	981	981
CraI (L/h)	1,08	2,22	2,22	2,22
Velocidad (km/h)	50	30	30	30
CDet (L/det)	0,01252	0,01638	0,01638	0,01638
PComb (\$/L)	313	396	396	396
PDem (\$/h)	1.810	15.594	30.309	45.024
PDet (\$/h)	392	649	649	649
W (\$/VEQ-h)	1.810	1.810	1.810	1.810
K (\$/det)	392	392	392	392
w_i	1	8,62	16,75	24,88
k_i	1	1,65	1,65	1,65

(*) arco de referencia: arco de vehículos livianos con velocidad 50 km/h

Se aprecian diferencias significativas en los ponderadores de demoras (w) originadas por la mayor tasa de ocupación de los buses. Las diferencias son relativamente más bajas en el caso del ponderador de detenciones (k).

Los precios sociales utilizados en el cálculo de los ponderadores globales y por arco deben ajustarse para reflejar los cambios que establece anualmente MIDEPLAN.

6.2.1.3 Uso de ponderadores arbitrarios

En los arcos que tienen actividad de paraderos importante y considerando que en ellos el desfase podría ser irrelevante para los buses, se pueden utilizar ponderadores negativos muy bajos (-9999, representa un ponderador nulo) de manera que en el proceso de optimización de desfases tengan menos peso las demoras y detenciones que ocurran en esos arcos.

Para priorizar la coordinación en un determinado eje y/o sentido se pueden utilizar ponderadores positivos elevados (9999, es el máximo admisible) para asignarles así un peso mayor en el indicador de rendimiento a las demoras y detenciones que se produzcan en esos ejes.

El uso de una cierta velocidad de circulación en los arcos de un eje en la etapa de optimización de programaciones, junto con la definición de ponderadores especiales, puede servir para inducir cambios en el comportamiento de los conductores en ese eje, como por ejemplo una disminución de la velocidad con respecto a la observada cuando esta última se considere excesiva.

6.2.2 Obtención del tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo de la red se estima a partir de los resultados de T8S cuando se activa la opción de búsqueda de ciclo (CYOP). Al activar esa opción, el programa realiza una serie de simulaciones con ciclos distintos y estima el valor del indicador de rendimiento asociado a cada uno. También analiza el caso en que las intersecciones operen con ciclo doble. En este proceso se asume que cada intersección opera de manera aislada.

A partir de la información anterior, T8S aplica un procedimiento mejorado de búsqueda de tiempo de ciclo desarrollado por Barrientos et al (1989)¹⁰. Ese método busca un tiempo de ciclo adecuado para la red en su conjunto, identificando además la conveniencia de que ciertas intersecciones operen con ciclo doble. El procedimiento de cálculo es el siguiente.

A partir del tiempo de ciclo (c_{oi}) que minimiza el indicador de rendimiento en cada intersección i (considerada como aislada) se calculan los siguientes valores extremos del tiempo de ciclo:

$$ci_i = \max(0,8c_{oi}, c'_i, c_{min})$$

$$cs_i = \max(1,5c_{oi}, c''_i, c_{max})$$

donde c_{min} y c_{max} son el tiempo de ciclo mínimo y máximo definidos exógenamente y c' y c'' son los tiempos de ciclo mínimos y máximos que producen un indicador de rendimiento que no excede en más de 10% el indicador asociado a c_{oi} .

A continuación las intersecciones son clasificadas en dos grupos, uno que reúne a las intersecciones que pueden operar en ciclo simple (I_1) y otro con aquellas que pueden operar en ciclo doble (I_2). A partir de ellos se construyen dos intervalos de valores del tiempo de ciclo, como se muestra a continuación:

$$N_1 = [\max(ci_i), \min(cs_i)] \quad i \in I_1$$

$$N_2 = [2 \max(ci_i), 2 \min(cs_i)] \quad i \in I_2$$

Por lo tanto, el tiempo de ciclo de la red debe ser un número par que pertenece al intervalo $N_1 \cap N_2$. Sean LI y LS los límites inferior y superior de dicho intervalo, respectivamente. Entonces el tiempo de ciclo recomendado para la red está dado por el número para más cercano a:

¹⁰ Barrientos, R., Fernández, D. y Gibson, J. (1989) "Metodología para la determinación del tiempo de ciclo óptimo en redes de semáforos". Actas del IV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Valparaíso.

$$c = \frac{LS + 2LI}{3}$$

En ciertos casos el método recién descrito no logra encontrar una solución para el tiempo de ciclo porque los intervalos N_1 y N_2 son disjuntos. En ese caso es necesario analizar la conveniencia de separar la red en grupos de intersecciones para los cuales sí exista una solución de tiempo de ciclo. Otra opción es mantener la definición de la red y realizar simulaciones de la red con diferentes tiempos de ciclo (denominadas barridos de tiempo de ciclo), utilizando la configuración de ciclos simples/dobles señalada por T8S o una similar que resulte de modificar alguna de las configuraciones de ciclo simple/doble, particularmente en las intersecciones que no sean críticas. Se selecciona 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 y doble.

Cualquiera sea el caso, el tiempo de ciclo está exógenamente acotado inferior y superiormente de acuerdo con el diseño operativo definido.

Este método entrega tanto un valor para el tiempo de ciclo de la red como la indicación de qué nodos es conveniente que operen en ciclo doble (con la mitad del tiempo de ciclo). Existe una alternativa para estos últimos nodos: que operen con el tiempo de ciclo completo pero duplicando las fases. Esto es más flexible que la operación con la mitad del tiempo de ciclo pues si bien la estructura de fases se duplica, el tiempo de verde asignado a una fase puede ser distinto del de su fase duplicada. Es entonces recomendable preferir esta opción, entendiendo que a los nodos que el algoritmo identifica como con doble ciclo, se les especificará en general con fases duplicadas. Puede haber excepciones por el número de fases resultante o por otras consideraciones que sean relevantes.

6.2.3 Optimización de repartos y desfases

Definidos el tiempo de ciclo y las intersecciones en doble ciclo o fases duplicadas, los repartos y desfases se calculan con T8S. Para los repartos se debe utilizar inicialmente la opción de equisaturación (rutina EQUISAT). La optimización de desfases se realiza al mismo tiempo activando la opción OPTIMIZE=OFFSET.

Si hay nodos con fases duplicadas, es necesario hacer un segundo proceso de optimización. Este tendrá como programación inicial la óptima encontrada previamente y consistirá en una optimización de reparto y desfase (opción OPTIMIZE=FULL) pero estableciendo como nodos a optimizar en la tarjeta 2 de T8S sólo aquellos que tienen fases duplicadas. En todos los casos las opciones señaladas se definen en la tarjeta 1 de T8S.

6.2.4 Tratamiento de períodos punta

En los períodos que se hayan identificado como períodos punta, es decir, aquellos en que las intersecciones críticas operan con altos grados de saturación, hay que introducir algunas modificaciones al proceso de optimización de la programación. La razón es que en esos períodos hay una parte de ellos en que el flujo es significativamente más alto que el promedio (se denomina sub-período punta). Para que la programación sea adecuada a las condiciones más críticas, debe responder a las que ocurren en ese sub-período antes que a la condición promedio del período punta completo.

El flujo de cada arco el flujo en el sub-período punta está dado por:

$$q_p = (1 + Z/4)q_a$$

donde q_a es el flujo promedio del arco para el período punta completo y Z es la intensidad de la punta para el movimiento, que se calcula como se indica en el punto 1.2.3 de este anexo. Con estos flujos debe determinarse el tiempo de ciclo y los repartos en la red, en tanto que los desfases se optimizan con los flujos promedio del período completo. En períodos no punta basta utilizar el flujo promedio de cada uno (q_a) en cada etapa de optimización.

En síntesis, para cada red en un período punta se trabaja con dos conjuntos de flujos por arco. El procedimiento a seguir se resume a continuación, distinguiendo dos casos: ciclo simple (o doble) y fases duplicadas.

6.2.4.1 Intersecciones en ciclo simple o ciclo doble

Para intersecciones que operan ciclo simple o ciclo doble, el procedimiento es el siguiente:

- se calculan los flujos promedio y los del sub-período punta;
- con los flujos del sub-período punta se determina el tiempo de ciclo y los nodos con fases duplicadas o doble ciclo, según lo expuesto en el punto 6.3.2 de este Anexo;
- con los mismos flujos se obtienen los repartos por equisaturación. Si es necesario, se itera con SIDRA según lo expuesto en el punto 7 de este Anexo;
- con los flujos promedio y el tiempo de ciclo y repartos previamente determinados, se optimizan desfases. A este efecto, hay que introducir como programación inicial la resultante de la etapa de equisaturación y usar la opción OPTIMISE=OFFSET.

6.2.4.2 Intersecciones con fases duplicadas

Para intersecciones que operan con fases duplicadas, el procedimiento es el siguiente:

- se calculan los flujos promedio y los del sub-período punta;
- con los flujos del sub-período punta se determina el tiempo de ciclo y los nodos con fases duplicadas o doble ciclo, según lo expuesto en el punto 6.3.2 de este Anexo;
- con los mismos flujos se hace una optimización de repartos para los nodos con fases duplicadas. Esto implica especificar las opciones EQUISAT=1 y OPTIMISE=FULL en la tarjeta tipo 1, en la tarjeta tipo 2 colocar solo los nodos con fases duplicadas e incluir una tarjeta tipo 4 con -1 -1. Si es necesario, se itera con SIDRA según lo expuesto en el punto 7 de este Anexo;
- con los flujos promedio y el tiempo de ciclo y repartos previamente determinados, se optimizan desfases. A este efecto, hay que introducir como programación inicial la resultante de la etapa de optimización de repartos y usar la opción OPTIMISE=OFFSET.

6.2.5 Ajuste e implementación

Una vez hechos los ajustes a las programaciones óptimas derivados de la etapa de análisis y el proceso de sintonía fina descrito en el Capítulo 4 Semáforos del MST, las programaciones se instalan en el controlador o en el sistema centralizado existente, según lo defina la UOCT.

7 INTERACCIÓN SIDRA-T8S

7.1 Aspectos generales

En el análisis de una red de semáforos es posible que surjan situaciones que T8S no pueda simular adecuadamente debido a las simplificaciones y forma de modelación que tiene implícitas ese programa. En esos casos se debe utilizar SIDRA para proveer datos ajustados de ciertos parámetros que luego deben ser incorporados a T8S para generar programaciones más adecuadas de la red. En este contexto, el trabajo de Kausel (1992)¹¹ contiene un detallado procedimiento para superar parte de las limitaciones de T8S para simular intersecciones complejas.

Lo que se menciona a continuación es un extracto del trabajo de Kausel, que está orientado a entregar los elementos para establecer cuándo es necesaria la interacción SIDRA-T8S. La aplicación del método requiere que el modelador conozca en detalle ese trabajo.

Los casos donde es necesaria la interacción son aquellas intersecciones semaforizadas donde la capacidad de una o varias pistas dependen de la programación del semáforo, en los cuales existen además situaciones particulares como subutilización de pistas y traspasos de flujo hacia pistas adyacentes que T8S no puede modelar. Estos casos se indican en el cuadro siguiente, señalando también los datos generados por SIDRA que se utilizarán en cada caso para perfeccionar la modelación T8S.

Cuadro 7-1 Casos de intersecciones semaforizadas donde se requiere interacción SIDRA – T8S

Caso modelado con SIDRA	Características especiales	Datos requeridos de SIDRA
Viraje con oposición desde pista compartida	100% utilización	ve, q, s
	Subutilización	ve, s
Pista corta exclusiva de viraje con o sin oposición	Traspaso de flujo a pista adyacente	ve, q, s
Pista corta compartida con viraje sin oposición	---	ve, q, s
Pista corta compartida con viraje con oposición	No hay traspaso de flujo	ve, q, s
	Traspaso de flujo a pista adyacente	ve, q, s
Ramal de viraje	---	ve, s

¹¹ Kausel, M. (1992) "Compatibilización de los programas SIDRA y Transyt en la modelación de tráfico" Memoria para optar al título de Ingeniero Civil". Universidad de Chile. Disponible en www.uoct.cl

Las situaciones indicadas en el cuadro anterior son de frecuente ocurrencia y, por lo tanto, es necesario definir requerimientos adicionales para evitar aplicar el procedimiento de compatibilización en casos donde la ganancia que se obtiene con la modelación más afinada es baja.

Las consideraciones para seleccionar las intersecciones donde vale la pena aplicar compatibilización SIDRA-T8S son las siguientes:

- En intersecciones utilizadas para periodizar o que determinan el ciclo de la red (intersecciones críticas), donde se dan estas situaciones que afectan a la capacidad, será necesario recurrir a SIDRA para obtener resultados más reales de grado de saturación.
- En intersecciones sujetas a modificaciones entre alternativas con y sin proyecto, que lleven a hacer aparecer o desaparecer los fenómenos que afectan a la capacidad.
- En intersecciones que no son críticas ni están sujetas a modificaciones, pero que presentan situaciones que afectan a la capacidad, será necesario determinar el grado de importancia de los fenómenos y a partir de la experiencia del modelador establecer la conveniencia de compatibilizar la capacidad.

7.2 Compatibilización de la capacidad

Teniendo en cuenta que SIDRA y T8S utilizan distintas expresiones para estimar demoras y detenciones, no es posible lograr compatibilidad para esas variables. El objetivo entonces es lograr compatibilizar la capacidad, de manera que T8S estime el mismo valor que se genere con la modelación SIDRA.

Para lograr esa compatibilidad en primer lugar se debe establecer la correspondencia entre líneas de detención de T8S y las pistas modeladas con SIDRA. Debe verificarse que exista consistencia en cuanto a los arcos que comprende la línea de detención y los movimientos que comparten las pistas, si es el caso. De no ser así, la modelación será corregida.

La compatibilidad se consigue haciendo que la capacidad de la línea de detención sea igual a la suma de las capacidades de las pistas correspondientes, estimadas con SIDRA. Previamente éstas deben ser llevadas a unidades de VEQ/h con los correspondientes factores de equivalencia. Esto involucra ajustes en el flujo de saturación, tiempo de verde efectivo y en los flujos a nivel de pistas.

El procedimiento que se debe seguir en cada una de las intersecciones donde se aplicará el proceso de compatibilización de capacidad se explica a continuación.

Modelación con T8S

A partir de los resultados de la modelación de la intersección con SIDRA se especifica la modelación en T8S en cuanto al uso de líneas de detención exclusivas o compartidas para los movimientos de interés. Los resultados de SIDRA, necesarios para lo anterior, son el tiempo de verde efectivo y la utilización de las pistas, información que SIDRA reporta en sus archivos de salida.

Diseño de fases

El diseño de fases que se utiliza en T8S es el mismo que se utiliza en SIDRA.

Instantes de inicio de fase

Los instantes de inicio de fase que se utilizan en T8S son los mismos que resultan de la modelación SIDRA.

Verde efectivo

Los tiempos de verde efectivo que se utilizan en T8S deben coincidir con los resultantes de la modelación SIDRA. En T8S el verde efectivo queda determinado por los instantes de inicio y fin de fase, la pérdida inicial y ganancia final, y los valores de los retardos inicial y final. Para el cálculo de los retardos se distinguen dos casos según si hay o no bloqueos en la pista (línea de detención). Esta distinción es importante pues los bloqueos generan una disminución del verde efectivo, que puede ser considerable.

Los retardos inicial y final de la línea de detención que se indican en la tarjeta 31 de T8S se especificarán a partir del entreverde (I), retardos de SIDRA (λ_1^S, λ_2^S), la pérdida inicial y ganancia final definidas en la Tarjeta 1 de T8S (λ_1^T, λ_2^T), y los instantes de inicio (IF) y fin (FF) y verde efectivo (ve) de la fase respectiva estimados por SIDRA. Entonces, los valores que se deben incorporar a T8S en la tarjeta 31 son los siguientes.

Cuadro 7-2 Retardos para compatibilizar verde efectivo

Caso	Retardo inicial	Retardo final
Sin bloqueos	$I + \lambda_1^S - \lambda_1^T$	$\lambda_2^S - \lambda_2^T$
Con bloqueos	$FF - IF - ve$	$\lambda_2^S - \lambda_2^T$

Flujos vehiculares

Los flujos vehiculares por pista en veh/h que SIDRA genera deben ser convertidos a unidades de VEQ/h con los respectivos factores de equivalencia por tipo de vehículo. Luego deben ser asignados a las correspondientes líneas de detención, exclusivas o compartidas, definidas en la tarea de modelación descrita previamente.

Flujos de saturación por línea de detención

En forma análoga a los flujos, los flujos de saturación de SIDRA por pista deben ser transformados a VEQ/h y luego asignados a las líneas de detención T8S.

7.3 Procedimiento

El procedimiento para compatibilizar la capacidad entre SIDRA y T8S debe incluir las siguientes actividades:

- 1) Modelar la red con T8S sin considerar la compatibilización con SIDRA y seleccionar el tiempo de ciclo de la red.
- 2) Identificar la(s) intersección(es) que no queda(n) bien modelada(s) con T8S a partir de los casos indicados en el Cuadro 7-1 y las recomendaciones adicionales señaladas en la sección 7.1.

- 3) Modelar con SIDRA la(s) intersección(es) identificada(s) en el punto anterior, cuidando que el diseño de fases y el tiempo de ciclo sean los mismos utilizados en la modelación T8S
- 4) Imponer el(los) reparto(s) determinado con SIDRA en T8S, especificando el verde efectivo y flujo de saturación derivado de SIDRA como se indicó en la sección 7.2.
- 5) Optimizar los desfases de la red con la nueva red de modelación definida.

Si se requiere compatibilizar la capacidad entre SIDRA y T8S en varias intersecciones, será necesario revisar la selección inicial del tiempo de ciclo, ya que para problemas de bloqueos es conveniente utilizar ciclos cortos. Para ello se simulará con T8S la red, con los repartos y flujos de saturación de SIDRA, y se analizará si el Indicador de Rendimiento cambia significativamente con respecto al dado por una simulación con los parámetros previos y repartos por equisaturación. De ser así, una reducción del tiempo de ciclo será normalmente provechosa. Definido el ciclo y los repartos, se realizará la optimización final de desfases.

8 CAPACIDAD DE INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS

Las intersecciones semaforizadas son una fracción pequeña de las intersecciones en una ciudad. Pero, generalmente, son las que presentan mayores niveles de demanda y congestión, pues los criterios de justificación de semáforos se basan en esas variables. Por otro lado, la cercanía entre intersecciones en el ámbito urbano favorece la ocurrencia de interacciones entre cruces semaforizados y no-semaforizados que es necesario tomar en cuenta al momento de programar los semáforos. Por lo mismo, se requiere un método para incluirlas cuando se analizan redes de semáforos que contienen intersecciones de prioridad.

Como la programación de redes de semáforos se realiza con T8S, se debe utilizar el enfoque de modelación de capacidad que incluye ese modelo, y que se basa en relaciones lineales entre la capacidad de un movimiento secundario y los respectivos flujos vehiculares en la vía prioritaria.

En el modelo lineal general, la capacidad de un movimiento secundario (Q) se estima mediante la siguiente relación:

$$Q = X \left(Q_0 + Z - Y \sum_i \alpha_i qp_i \right)$$

donde

$$X = (1 + 0,099[w - 3,55])(1 + X_1[V_I - 120])(1 + X_2[V_D - 150])$$

$$Z = 14W_{BC}X_3$$

$$Y = 1 - 0,0291W$$

- Q : capacidad del movimiento secundario (VEQ/h), corresponde a una cola.
- Q_0 : capacidad máxima del movimiento secundario (VEQ/h). Se produce cuando los flujos prioritarios son nulos.
- α_i : parámetros dependientes de la geometría de la intersección y del movimiento secundario analizado.
- qp_i : flujos que tienen prioridad de paso sobre el movimiento secundario analizado (VEQ/h).
- W_{BC} : ancho del bandejón central, si existe (m).
- W : ancho de la vía prioritaria (m)
- w : ancho de pista en la vía secundaria (m)
- V_I, V_D : visibilidad a izquierda y derecha respectivamente (m)
- X_1, X_2, X_3 : parámetros que dependen del movimiento y del tipo de intersección, como se indica en los siguientes cuadros para intersecciones en "T" y en cruz.

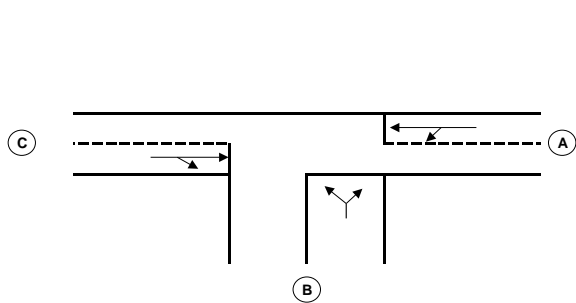
Cuadro 8-1 Valores de parámetros para intersecciones en "T"

Movimiento	X ₁	X ₂	X ₃	Q ₀	α _{A-B}	α _{A-C}	α _{C-A}	α _{C-B}
B-A	0,0009	0	0	796	0	0	0,364	0,167
B-C	0,0009	0,0006	1	661	0,559	0,259	0,364	0,167
A-B	0,0009	0	0	745	0	0	0,364	0,364

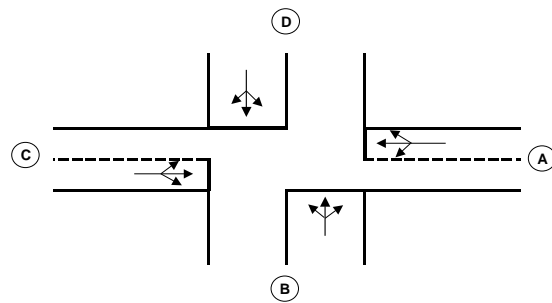
Cuadro 8-2 Valores de parámetros para intersecciones en cruz

Movimiento	X ₁	X ₂	X ₃	Q ₀	α _{A-C}	α _{A-B}	α _{A-D}	α _{C-A}	α _{C-B}	α _{C-D}	α _{D-A}
B-A	0,0009	0	0	796	0	0	0	0,364	0,167	0	0
B-D	0,0009	0,0006	1	723	0,259	0,559	0,259	0,364	0,167	0,364	0
B-C	0,0009	0,0006	1	661	0,259	0,559	0	0,364	0,167	0,364	0,182
A-B	0,0009	0	0	745	0	0	0	0,364	0,364	0,26	0

Intersección en T



Intersección en cruz



T8S utiliza una versión simplificada del modelo general, que fue pensada para simular intersecciones en "T". Ese modelo admite solamente dos movimientos prioritarios y tiene la siguiente forma funcional:

$$F = F_0 - A_1 qp_1 - A_2 qp_2$$

donde

F : capacidad del movimiento secundario (VEQ/h).

F_0 : capacidad máxima del movimiento secundario (VEQ/h). Se produce cuando los flujos prioritarios son nulos.

A_1, A_2 : parámetros.

qp_1, qp_2 : flujos prioritarios que se oponen al movimiento secundario analizado (VEQ/h). Corresponden a dos arcos de modelación T8S.

Las equivalencias T8S – modelo lineal son las siguientes:

$$F_0 = X(Q_0 + Z)$$

$$A_i = X \cdot Y \cdot \alpha_i$$

Es importante tener en cuenta las siguientes particularidades:

- El modelo lineal sea aplica a una cola de vehículos que realiza determinado movimiento, por lo tanto, cuando en el acceso secundario existe más de una pista que comparten LD y los movimientos secundarios ceden el paso a los mismo movimientos prioritarios, los parámetros de la LD compartida, $F_0(total)$, $A_1(total)$ y $A_2(total)$, se calculan como:

$$F_0(total) = F_0(pista\ 1) + F_0(pista\ 2) + \dots$$

$$A_1(total) = A_1(pista\ 1) + A_1(pista\ 2) + \dots$$

$$A_2(total) = A_2(pista\ 1) + A_2(pista\ 2) + \dots$$

- Si existen más de dos arcos prioritarios se deben considerar supuestos y simplificaciones para utilizar solamente dos, dada la limitación de T8S al respecto. Una alternativa es considerar los dos arcos prioritarios con mayor flujo y asignar valores apropiados a A_1 y A_2 a partir de los valores del Cuadro 8-2 de modo que una modelación más cercana a la situación observada.
- Cuando en una pista existen dos movimientos secundarios, uno de los cuales cede el paso a uno de los dos movimientos prioritarios y el otro a los dos movimientos prioritarios, se debe indicar a T8S el porcentaje del flujo secundario (p) que cede el paso solamente al primer flujo prioritario. Internamente T8S calcula la capacidad combinada (F_{comb}) de ambos movimientos como la media armónica ponderada de las capacidades de cada uno (F_{mov}) por separado, como se muestra a continuación:

$$F_{comb} = \left(\frac{p}{F_{mov1}} + \frac{1-p}{F_{mov2}} \right)^{-1}$$

9 REPORTE DE LA JUSTIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE SEMÁFOROS

9.1 Justificación de semáforos

El análisis de justificación de semáforo debe incluir los siguientes contenidos mínimos:

- a) **Introducción:** contiene una descripción de los objetivos del estudio, identifica a la entidad que lo solicitó y al profesional responsable del estudio y señala otros antecedentes generales que se consideren importantes de mencionar.
- b) **Descripción del sitio en estudio:** incluye la identificación (nombre calles, comuna, ciudad, región) y una descripción de la intersección o cruce peatonal donde se realizó el estudio de justificación. Incorpora un esquema en planta, a escala adecuada, de al menos 150 metros aguas arriba y aguas abajo por cada acceso. El esquema debe indicar las actividades educacionales, comerciales, paraderos de buses, y otras que se localizan en esa área y que generan/atraen peatones que utilizan la intersección o cruce.
- c) **Descripción y resultados de la aplicación de medidas alternativas a la semaforización:** identifica y presenta los resultados de la aplicación de medidas alternativas a la semaforización previamente implementadas en el sitio de interés. Este es uno de los aspectos más importantes del estudio de justificación y tiene como objetivo lograr que la semaforización se realice solamente en aquellos casos donde esa sea la opción más efectiva y de menor costo social.
- d) **Diagnóstico operativo y de seguridad de tránsito:** contiene el reporte del diagnóstico operativo y de seguridad de tránsito del sitio en estudio en las condiciones observadas al momento de iniciar el estudio de justificación. En primer lugar, identifica y presenta los resultados de la aplicación de medidas alternativas a la semaforización implementadas para superar las deficiencias de la situación actual. La proposición de estas alternativas debe estar basada en las recomendaciones y normativa aplicable. El diagnóstico de la situación actual debe incluir al menos lo indicado en el documento "Tratamiento de Puntos Negros con Medidas Correctivas de Bajo Costo" de Conaset o aquel que lo reemplace. Como resultado del diagnóstico se debe concluir si las medidas alternativas fueron suficientes para resolver los problemas observados o si es necesario analizar la instalación de un semáforo.
- e) **Identificación de criterios de justificación relevantes:** contiene la identificación de los criterios de justificación que se aplicaron en el estudio de justificación. Esta identificación se debe basar en los resultados del diagnóstico operativo y de seguridad de tránsito.
- f) **Definición de información necesaria, fuentes de información y toma de datos:** identifica los datos necesarios para verificar el cumplimiento de los criterios de justificación seleccionados, las fuentes de información utilizadas (accidentabilidad, estudios de transporte previos) y el proceso de toma de datos, cuando corresponda. En este último caso se debe incluir la identificación de las temporadas y semanas representativas utilizadas, junto con esquemas que muestren las variables utilizadas.
- g) **Verificación del cumplimiento de los criterios de justificación:** contiene el reporte detallado del proceso de verificación del cumplimiento de los criterios de justificación de semáforo. La información de flujos, demoras y accidentabilidad debe reportarse dentro del informe de justificación de forma que permita reproducir fácilmente los análisis del estudio de justificación.

- h) Análisis de casos especiales: incluye el análisis realizado para abordar situaciones especiales que se presenten en el sitio bajo estudio y que pueden generar excepciones a la aplicación de los criterios de justificación generales.
- i) Resultado del estudio de justificación: indica el resultado final del análisis de justificación y el estudio de situaciones especiales. A partir de lo anterior entrega una recomendación fundada sobre la conveniencia de instalar un semáforo o bien señala las alternativas de gestión o seguridad de tránsito más adecuadas si se concluye que dicha instalación no se justifica o es inconveniente.
- j) Anexo flujos y demoras: incluye una copia digital de la información de flujos y demoras recogida en terreno u obtenida de un estudio de transporte validado por la UOCT para ser utilizado en el análisis de justificación. Se deben seguir las especificaciones de la UOCT sobre el contenido y la estructura de los archivos computacionales que contengan los datos utilizados, con el propósito de estandarizar la información y así facilitar la generación de bases de datos que sean de utilidad para futuros análisis que busquen mejorar la gestión de tránsito.
- k) Anexo antecedentes del diagnóstico operativo y de seguridad de tránsito: contiene una copia digital de la información de terreno utilizada como antecedente para el diagnóstico operativo y de seguridad de tránsito, por ejemplo, fotografías, grabaciones de video (reproducibles con un software gratuito), estadísticas de accidentabilidad, etc.

9.2 Modelación de tránsito y conformación de redes

La conformación de redes y la modelación de tránsito para la programación de semáforos debe reportarse en un informe que incluya al menos los siguientes aspectos:

- a) Descripción del área de estudio: incluye la identificación de las intersecciones analizadas (nombre de calles, comuna, ciudad) y antecedentes generales sobre la forma de operación de la vialidad, tales como existencia de pistas de uso especial para buses, uso reversible de vías, funcionamiento de ferias libres, etc.;
- b) Desarrollo del catastro operativo: contiene el reporte de los antecedentes recogidos en el catastro operativo de las intersecciones y tramos de vía. Estos antecedentes se refieren a los diseños de fases y programaciones vigentes en el caso de semáforos existentes, uso de pistas, presencia de estacionamientos, interferencia peatonal, etc. que sirven de base para construir el modelo de tránsito con el cual se optimizan las programaciones. Los antecedentes se deben presentar en fichas para cada intersección, en las que aparezca un esquema de la intersección, sus accesos y el uso de las pistas, junto con los otros antecedentes que se recopilen.
- c) Desarrollo de la conformación de redes o periodización: en el caso de la programación de redes de semáforos incluye la definición de cuáles son las agrupaciones de intersecciones que forman las redes (subdivisión espacial), la periodización, y la definición del tiempo de ciclo y la identificación de las intersecciones que operan en ciclo doble o doble verde (programación). Estas tres etapas están relacionadas entre sí y, por lo tanto, su definición es simultánea. En este sentido la optimización de las programaciones se debe reportar en otro lugar, como se explica más adelante. En el caso de semáforos aislados se debe reportar solamente el proceso de periodización.
- d) Anexo flujos continuos: incluye una copia digital de la información de flujos continuos recogida en terreno. Se deben seguir las especificaciones de la UOCT sobre el contenido y la estructura de los

archivos computacionales que contengan los datos utilizados, con el propósito de estandarizar la información y así facilitar la generación de bases de datos que sean de utilidad para futuros análisis que busquen mejorar la gestión de tránsito.

9.3 Simulación de la situación actual y calibración

El reporte de la simulación de la situación actual y la calibración del modelo de tránsito debe incluir al menos los siguientes aspectos:

- a) Descripción del modelo de tránsito: contiene la descripción de los supuestos aplicados para modelar la capacidad en situaciones normales y casos especiales como paraderos y pistas cortas, incluye un esquema del área de estudio basado en nodos, líneas de detención y arcos para el caso de redes, o un esquema de la(s) intersección(es) aislada(s) que muestre la manera en que opera cada pista y su relación las pistas adyacentes en el sentido de si existe o no interacción entre ellas.
- b) Identificación del programa computacional utilizado: se identifica el software utilizado para simular la operación de la(s) intersección(es) y la justificación de uso en función de sus capacidades para simular los fenómenos presentes en el área de estudio. Lo anterior incluye el caso en que sea necesario realizar la compatibilización de capacidad entre SIDRA y T8S, según se describe en el Capítulo 7.
- c) Desarrollo y resultados de la toma de datos para la calibración del modelo: contiene el reporte de las velocidades, longitudes de cola y otros antecedentes, por período, recogidos para calibrar el modelo de tránsito. Para esto se debe hacer uso de esquemas y gráficos que sirvan para analizar y verificar la consistencia de la información. La información recopilada debe ser consistente con las variables que genera el programa computacional utilizado en la simulación.
- d) Desarrollo y descripción de la calibración del modelo: incluye el reporte de los criterios aplicados para establecer ajustes globales y locales por período, junto con los valores originales y ajustados de los parámetros de modelación modificados, y los indicadores de ajuste resultantes por período; y
- e) Conclusiones del proceso de simulación y calibración: describe la capacidad del modelo de tránsito calibrado para reproducir la situación operativa observada y aspectos a tener en cuenta en la optimización de las programaciones, por ejemplo, el uso conjunto de SIDRA y T8S.

9.4 Optimización de las programaciones

El reporte de la optimización de las programaciones debe considerar al menos los siguientes aspectos:

- a) Aspectos generales: contiene la identificación del programa computacional utilizado en la optimización de las programaciones y la justificación de uso en función de sus capacidades para simular los fenómenos existentes y optimizar las programaciones de la(s) intersección(es) analizada(s). En la mayor parte de los casos se utilizará SIDRA y T8S, no obstante es posible utilizar otros programas siempre que tengan capacidades equivalentes a los anteriores y cuenten con la aprobación de la UOCT.
- b) Desarrollo y resultados de la toma de datos para la optimización de las programaciones: describe el trabajo de terreno realizado para obtener la información de flujos, velocidades y otros antecedentes necesarios para optimizar las programaciones. La información recogida se debe

reportar mediante gráficos y esquemas que faciliten su análisis y verificación de consistencia, por ejemplo, en relación con la continuidad de flujos entre LD. La información se debe presentar también en medios digitales en formato base de datos.

- c) Descripción de la metodología utilizada para determinar las variables de entrada del modelo: describe el proceso de generación de las variables de entrada del programa computacional. Esto incluye, entre otros, los datos de flujo vehicular, atributos de los arcos y nodos y los parámetros de optimización utilizados. Particular importancia se debe asignar al reporte de la compatibilización de capacidad entre SIDRA y T8S que sea necesario realizar.
- d) Análisis de los resultados del proceso de optimización: presenta el análisis de las programaciones óptimas generadas en el sentido de verificar su consistencia y racionalidad y los ajustes introducidos y su fundamentación. Incluye la descripción de las iteraciones realizadas para generar las programaciones más adecuadas en cada período. En el caso de redes se debe reportar tanto la obtención del tiempo de ciclo como la optimización de los desfases.
- e) Definición de programaciones óptimas: contiene el reporte de las programaciones finales obtenidas en el proceso de optimización. Las programaciones se deben presentar en un formato apropiado para su ingreso al sistema centralizado o directamente en los controladores y acompañarse con esquemas que muestren el diseño de fases correspondiente con una clara identificación de los accesos (nombre calles y posición del norte) y movimientos permitidos en cada una de ellas.
- f) Anexo datos para optimización: incluye una copia digital de la información de flujos, velocidades y otras variables recogidas en terreno para optimizar las programaciones en cada período. Se deben seguir las especificaciones de la UOCT sobre el contenido y la estructura de los archivos computacionales que contengan los datos utilizados, con el propósito de estandarizar la información y así facilitar la generación de bases de datos que sean de utilidad para futuros análisis que busquen mejorar la gestión de tránsito.

9.5 Reporte de la implementación y sintonía fina de las programaciones

El reporte de la sintonía fina de las programaciones debe considerar al menos los siguientes aspectos:

- a) Aspectos generales: contiene la identificación de los semáforos o redes revisadas, los períodos analizados y la fecha en que se realizaron las visitas a terreno.
- b) Revisión de las programaciones: describe el trabajo de terreno realizado para revisar el funcionamiento de los semáforos o redes con las programaciones óptimas. Esto incluye el reporte de la instalación de las programaciones en los controladores o en el sistema central, la recopilación de información existente y la inspección general de terreno. En esta etapa se debe considerar la posibilidad de que las programaciones revisadas resulten inapropiadas para las condiciones operativas existentes al momento de la sintonía fina. En ese caso se debe analizar con la UOCT las acciones a seguir pues se estará frente a la necesidad de repetir la optimización de las programaciones.
- c) Diagnóstico operacional y formulación de acciones: describe el resultado del análisis de la operación de los semáforos y/o redes con las programaciones que se revisarán. Este análisis requiere experiencia suficiente en ese tipo de trabajo por parte del personal de terreno y debe

incluir además la información que tenga la UOCT sobre situaciones que sean necesario considerar. Luego describe el conjunto de acciones destinadas a resolver los problemas detectados en cada período.

- d) Ajustes a las programaciones: incluye el reporte de la etapa de ajuste de las programaciones, tanto las realizadas en línea como aquellas realizadas en gabinete. Se debe incluir el proceso iterativo que haya sido necesario de realizar en algunas intersecciones. De particular importancia es la descripción de los cambios operativos que resulten con las programaciones ajustadas. Como resultado final se incluirán cuadros que muestren las programaciones óptimas originales y las que resulten finalmente del proceso de sintonía fina en cada período, destacando claramente los cambios realizados.
- e) Implementación de programaciones a nivel de controlador: describe las actividades realizadas para incorporar las nuevas programaciones en la memoria no-volátil del controlador y en el sistema central de control en caso de que exista.