UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.3.1 Señales Verticales

Según el MTC (2016), las señales verticales son dispositivos instalados al costado o sobre el camino, y tienen por finalidad, reglamentar el tránsito, prevenir e informar a los usuarios mediante palabras o símbolos establecidos.

2.2.3.1.1 Clasificación de las Señales Verticales

- Señales reguladoras o de reglamentación

  Según el MTC (2016), tienen por objeto notificar a los usuarios, las limitaciones, restricciones, prohibiciones y/o autorizaciones existentes que gobiernan el uso de la vía y cuyo incumplimiento constituye una violación a las disposiciones contenidas en el Reglamento Nacional de Tránsito, vigente; así como a otras normas del MTC. Puede ser necesario complementar la señal mediante mensajes, cuando por ejemplo las prohibiciones o restricciones se aplican sólo para ciertos días o períodos.

  - Clasificación de las señales reguladoras o de reglamentación

    Se clasifican en:

    a. Señales de prioridad: Son aquellas que regulan el derecho de preferencia de paso, y son las dos siguientes:

Tabla 3. Señales de Prioridad: (R-1) Señal de Pare, (R-2) Señal de Ceda el Paso.

R-1	**R-2**

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

Señal de Pare

Según el MTC (2016), la señal (R-1) PARE dispone que el conductor de un vehículo se detenga antes de cruzar una intersección, y debiendo determinarse su ubicación de acuerdo al estudio de ingeniería vial antes indicado, puesto que su uso indiscriminado puede afectar negativamente a su credibilidad, y en lugar de ayudar a la seguridad vial en una intersección puede generar inseguridad.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Así mismo, Garber y Hoel (2009) sostienen que una señal de pare se usa cuando se requiere que un vehículo que se aproxima se detenga antes de entrar a la intersección. Las señales de PARE deben usarse solo cuando estén justificadas, ya que el uso de estos signos resulta en inconvenientes considerables para los automovilistas. Las señales de PARE no deben usarse en intersecciones señalizadas (semaforizadas) o en carreteras de autopistas. Las órdenes para las señales de pare sugieren que se pueden utilizar en una carretera (o calle) secundaria cuando se cruza con una carretera (o calle) principal, en una intersección no señalizada, y donde una combinación de alta velocidad, la vista restringida y los accidentes graves indican la necesidad de dicho control.

Los letreros de PARE múltiples requieren que todos los vehículos que se aproximan a la intersección se detengan antes de ingresar. Se usan como medida de seguridad en algunas intersecciones y normalmente se usan cuando los volúmenes de tráfico en todos los enfoques son aproximadamente iguales. Sin embargo, cuando los volúmenes de tráfico son altos, se recomienda el uso de semáforos. También se deben considerar cuando ocurren cinco o más accidentes en una intersección en un período de 12 meses, y estos accidentes pueden evitarse con un control de detención de múltiples vías.

Señal de Ceda el Paso

Según el MTC (2016), la señal (R-2) CEDA EL PASO dispone que el conductor de un vehículo que circula por una vía de menor prioridad, (vía secundaria o auxiliar) permita el paso de otro vehículo que circula por una vía de mayor prioridad (vía principal). Su ubicación está en función de la visibilidad del que circula por la vía de menor prioridad y la distancia necesaria para ceder el paso antes de entrar a una intersección. En caso contrario, debe emplearse la señal (R-1) PARE.

b. Señales de prohibición: Se usan para prohibir o limitar el tránsito de ciertos tipos de vehículos o determinadas maniobras. Se representa mediante un círculo blanco con orla roja cruzado por una diagonal también roja, descendente desde la izquierda formando un ángulo de 45º con la horizontal.

c. Señales de restricción: Se usan para restringir o limitar el tránsito vehicular debido a características particulares de la vía. En general, están compuestas por

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

un círculo de fondo blanco y orla roja en el que se inscribe el símbolo que representa la restricción o limitación.

d. Señales de obligación: Se usan para indicar las obligaciones que deben cumplir todos los conductores. En general, están compuestas por un círculo de fondo blanco y orla roja en el que se inscribe el símbolo que representa la obligación.

e. Señales de autorización: Se caracterizan por estar compuestas por un círculo de fondo blanco y orla verde en el que se inscribe el símbolo que representa la autorización. La orla verde constituye una excepción dentro de las señales de reglamentación, precisando en el caso de la señal de Zona de Estacionamiento de Taxis, se mantiene con el círculo de fondo blanco y orla roja.

- Señales de prevención

  Según el MTC (2016), su propósito es advertir a los usuarios sobre la existencia y naturaleza de riesgos y/o situaciones imprevistas presentes en la vía o en sus zonas adyacentes, ya sea en forma permanente o temporal. Estas señales ayudan a los conductores a tomar las precauciones del caso, por ejemplo, reduciendo la velocidad o realizando maniobras necesarias para su propia seguridad, la de otros vehículos y de los peatones. Su ubicación se establecerá de acuerdo con el estudio de ingeniería vial correspondiente.

  - Clasificación de las señales de prevención

    Según el MTC (2016), se clasifican teniendo en consideración lo siguiente:

    a. Características Geométricas de la vía

    b. Características de la superficie de rodadura: Previenen a los conductores de la proximidad de irregularidades sucesivas en la superficie de rodadura de la vía, las cuales pueden causar daños o desplazamientos que afecten el control de los vehículos. Deben removerse una vez concluya las condiciones que obligaron su instalación. También se utilizan para prevenir la proximidad de reductores de velocidad tipo sonorizadores, bandas sonoras y otros.

    c. Intersecciones con otras vías: Se instalan para prevenir a los conductores sobre la presencia de una intersección a nivel y la posible presencia de vehículos ingresando o haciendo maniobras de giro. Cada señal debe reflejar la geometría

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

de cada intersección. Dependiendo de los flujos vehiculares, la distancia de visibilidad y otros factores, puede requerirse de señales complementarias para cada intersección. En todo caso, cuando la visibilidad es limitada, la señal se debe complementar con una placa que indique la distancia aproximada a la intersección.

d. Características operativas de la vía: Previenen a los conductores de particularidades de la vía, sobre sus características operativas, las cuales pueden condicionar y afectar la normal circulación de los vehículos.

e. Emergencias y situaciones especiales: Tienen por finalidad prevenir a los conductores sobre la existencia o posibilidad de emergencias viales o situaciones especiales, que puedan afectar la normal operación vehicular. En los casos que corresponda, deberán removerse una vez que cambien las condiciones que originaron su instalación.

- Señales de información

  Según el MTC (2016), tienen la función de informar a los usuarios, sobre los principales puntos notables, lugares de interés turístico, arqueológicos e históricos existentes en la vía y su área de influencia y orientarlos y/o guiarlos para llegar a sus destinos y a los principales servicios generales, en la forma más directa posible. De ser necesario las indicadas señales se complementarán con señales preventivas y/o reguladoras.

  Las señales informativas entre otros deben abarcar los siguientes conceptos:

  - Puntos Notables: Centros poblados, ríos, puentes, túneles y otros.
  - Zonas Urbanas: Identificación de rutas y calles, parques y otros.
  - Distancias: A principales puntos notables, lugares turísticos, arqueológicos e históricos.
  - Señalización bilingüe: español e inglés.

2.2.3.2 Señales Horizontales (Marcas en el Pavimento o Demarcaciones)

Según el MTC (2016), está conformada por marcas planas en el pavimento, tales como líneas horizontales y transversales, flechas, símbolos y letras, que se aplican o adhieren sobre el pavimento, sardineles, otras estructuras de la vía y zonas adyacentes. Forma parte de esta

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

señalización, los dispositivos elevados que se colocan sobre la superficie de rodadura, también denominadas marcas elevadas en el pavimento, con el fin de regular, canalizar el tránsito o indicar restricciones. Se emplean para regular o reglamentar la circulación, advertir y guiar a los usuarios de la vía, por lo que constituyen un elemento indispensable para la operación vehicular y seguridad vial.

2.2.3.2.1 Clasificación de Señales Horizontales

- Marcas planas en el pavimento

  Según el MTC (2016):

  - Línea de borde de calzada o superficie de rodadura: Línea continua que tiene por función demarcar el borde de la calzada o superficie de rodadura del pavimento. La línea del borde de calzada es continua, de color blanco cuando por razones de emergencia puede estacionarse en la berma, y de color amarillo cuando está prohibido el estacionamiento.

  - Línea de carril: Tiene por función separar los carriles de circulación de la calzada o superficie de rodadura de vías de dos o más carriles en el mismo sentido. La línea de carril es de color blanco, discontinua o segmentada; puede presentar tramos continuos o una combinación de ambas, por limitaciones de las características geométricas de la vía y su operación, por ejemplo, en el caso de las zonas de aproximación a las intersecciones a nivel.

  - Línea central: Tiene por función separar los carriles de circulación de la calzada o superficie de rodadura de vías bidireccionales. La línea central es de color amarillo, es discontinua o segmentada cuando es permitido cruzar al otro carril para el adelantamiento vehicular, y es continua cuando no es permitido cruzar al otro carril, por limitaciones de las características geométricas de la vía y/o su operación.

  - Líneas de transición por reducción de carriles: Tienen por función guiar al conductor, cuando se reduce el ancho de la calzada de la vía por donde circula, disminuyendo el número de carriles disponibles. Abarca una zona de transición que debe demarcarse con línea central o de eje de transición simple o doble, y línea de borde de las calzadas o superficie de rodadura convergentes, que indiquen claramente la indicada reducción.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Líneas canalizadoras de tránsito: Tienen por función conformar las islas canalizadoras del tránsito automotor en una intersección a nivel. La demarcación será de color blanco o amarillo según corresponda, y se complementará con demarcadores elevados y la señalización vertical correspondiente.

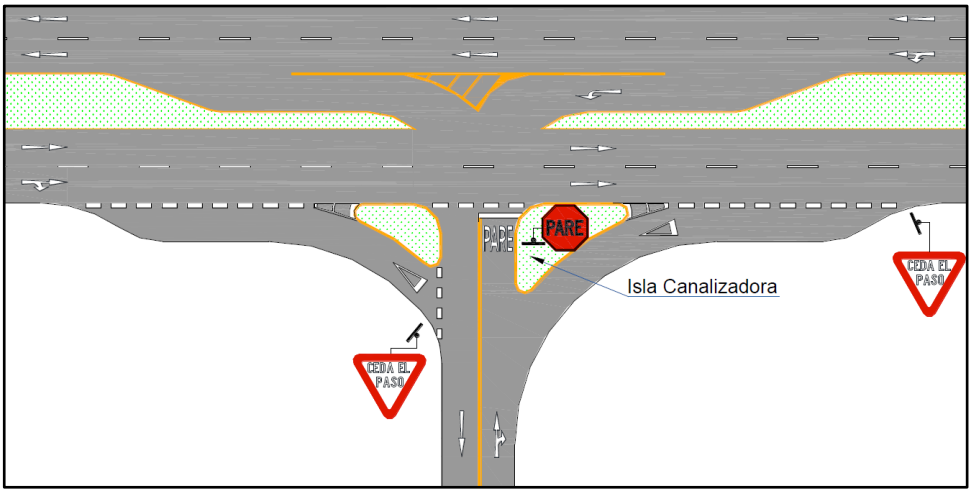


Figura 43. Demarcación en el Pavimento en una Intersección a Nivel.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

- Línea de pare: Es una línea transversal a la calzada o superficie de rodadura que tiene por función indicar al Conductor que debe detener completamente el vehículo, el cual no debe sobrepasar el inicio de la indicada línea. Es una línea continua de color blanco de 0.50 m. de ancho. En el caso de un *paso peatonal* debe ubicarse a una distancia de 1.00 m. antes del mismo; y en otros casos a una distancia mínima de 1.50 m. antes de la esquina o vía que cruza. Debe complementarse con señal vertical de PARE (R-1), y demarcaciones elevadas.

Figura 44. Demarcación de Líneas de Pare en una Intersección a Nivel.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

- Líneas de cruce peatonal: Son un conjunto de líneas paralelas que abarcan el ancho de la calzada o superficie de rodadura de una vía y tienen por función indicar el lugar de cruce o paso peatonal. Las líneas paralelas de cruce peatonal son continuas, de color blanco y de 0.30 m. a 0.50 m. de ancho cada una, cuya separación es del mismo ancho de la línea de cruce peatonal, tendrá como mínimo 2.00 m. de ancho. Se colocan perpendicularmente al flujo peatonal, pudiendo también tener forma diagonal.

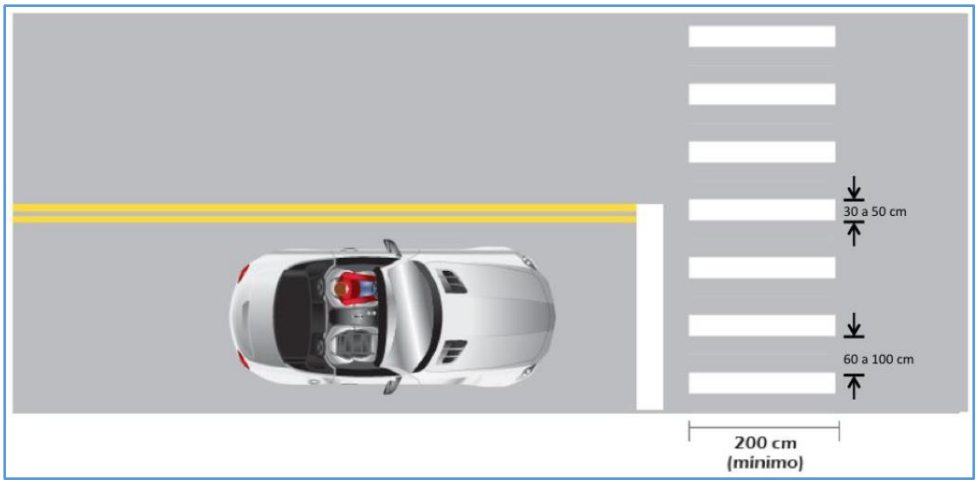


Figura 45. Demarcación de Líneas de Cruce Peatonal en una Intersección a Nivel.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

- Demarcación de espacios para estacionamiento: Son líneas continuas de color blanco de 0.10 m a 0.15 m. de ancho que tienen por función indicar los lugares destinados al estacionamiento vehicular.

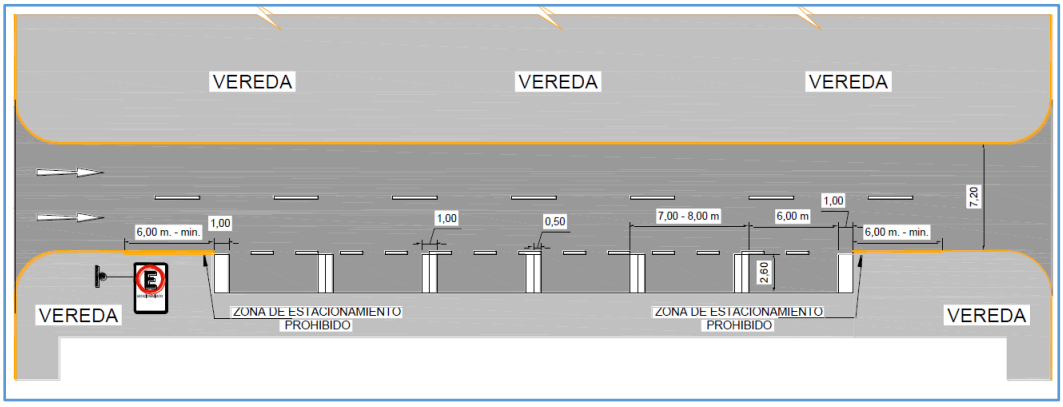


Figura 46. Demarcación en Espacios para Estacionamiento con Dimensiones.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Demarcación de no bloquear cruce en intersecciones: Son un conjunto de líneas paralelas que forman una malla octogonal de color amarillo, que abarca el área de intersección de dos vías y tienen por finalidad prohibir al Conductor detener el vehículo en dicha área de intersección. Esta demarcación debe ser complementada con la señal vertical R-53 No Bloquear Cruce.

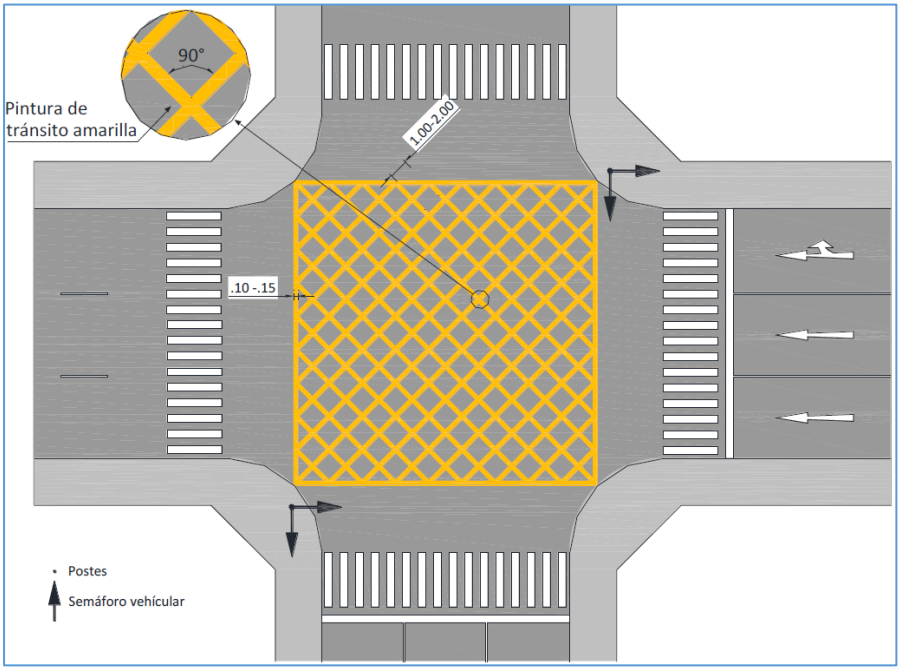


Figura 47. Demarcación en Espacios para Estacionamiento con Dimensiones.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

- Marcas elevadas en el pavimento

  Según el MTC (2016), son delineadores que se colocan en forma longitudinal y transversal en el pavimento, y tienen por función principal complementar las marcas planas en el pavimento. Las marcas elevadas en el pavimento se clasifican en delineadores de piso y delineadores elevados.

  - Delineadores de piso
    - Tachas retrorreflectivas: Son aquellas que cuentan con un material retrorreflectivo en una o dos de sus caras que enfrentan el sentido del tráfico, pero también pueden ser iluminadas internamente en forma continua. En el caso de advertir la presencia de un reductor de velocidad o cruce peatonal, estas tachas podrán ser destellantes o intermitentes.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

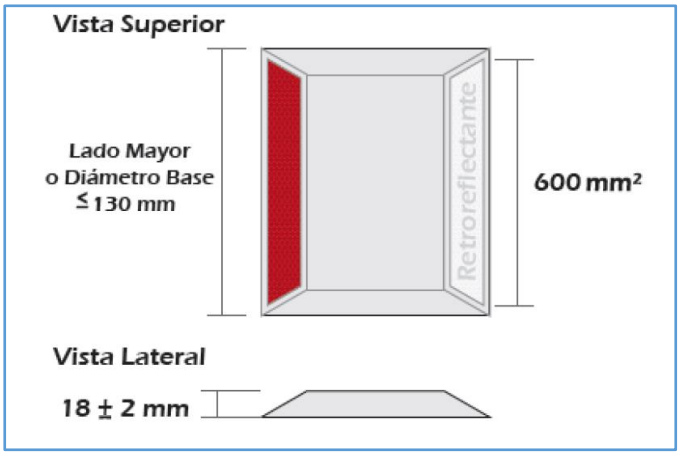


Figura 48. Tacha Retrorreflectiva - Ojo de Gato.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

- Delineadores elevados
  - Postes delineadores: Conocidos también como hitos de arista, se colocan en forma longitudinal al borde de la vía, deben tener materiales retrorreflectivos y pueden ser de sección plana, circular, rectangular, ovalada o en forma de "A".
  - Señal de delineador de curva horizontal (P-61) – Chevron: Delineador conformado por el conjunto de señales tipo Chevron, ubicados en lado exterior de la curva en forma perpendicular a la visual del Conductor, pueden ser simples o dobles.

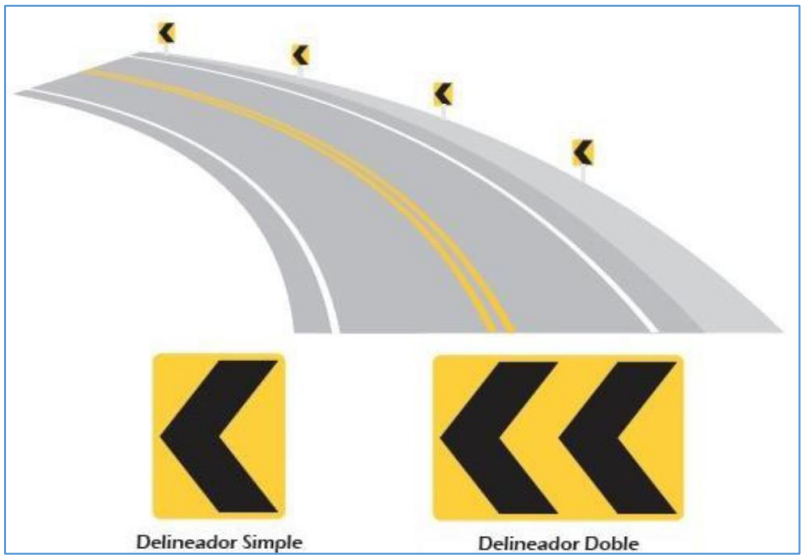


Figura 49. Señales de Delineador de Curva Horizontal "CHEVRON".

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.3.3 Semaforización

Según el MTC (2016), son dispositivos de control del tránsito que tienen por finalidad regular y controlar el tránsito vehicular motorizado y no motorizado, y peatonal, a través de las indicaciones de luces de color rojo, verde y amarillo o ámbar.

- El color rojo prohíbe el tránsito en una corriente vehicular o peatonal por un tiempo determinado.
- El color verde permite el tránsito en una corriente vehicular o peatonal por un tiempo determinado.
- El color amarillo o ámbar dispone al Conductor ceder el paso y detener el vehículo, y no ingresar al cruce o intersección vial.

La regulación y control de la operación de los semáforos se realizan a través de unidades de control de diferentes tipos. Para el caso de un sistema coordinado de semáforos, deberán contar con unidades de control adyacentes o sucesivas interconectadas, que controlan sus funciones básicas a través de una Estación Central o Control Maestro.

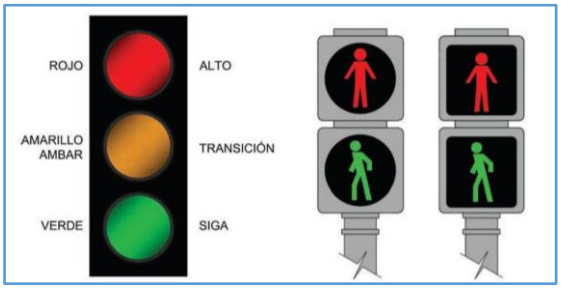


Figura 50. Disposición de Colores (Intervalos) de las Luces de un Semáforo.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

2.2.3.3.1 Elementos que Componen un Semáforo

Según el MTC (2016), un semáforo consta de dos partes (soporte y cabeza), cuyo desarrollo es el siguiente:

- Soporte

  Es la estructura que sujeta la cabeza del semáforo de forma que le permita algunos ajustes angulares, verticales y horizontales. Por su ubicación en la intersección, al lado o dentro de la vía el soporte está compuesto por postes, ménsulas cortas, ménsulas largas sujetas a postes laterales, pórticos, cables de suspensión y postes y pedestales en islas.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

En las siguientes figuras se muestran los soportes de semáforo tipos poste y ménsula:

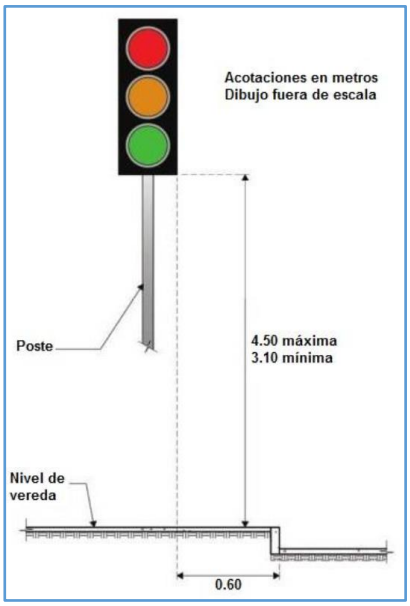


Figura 51. Soporte de Semáforo Tipo Poste.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

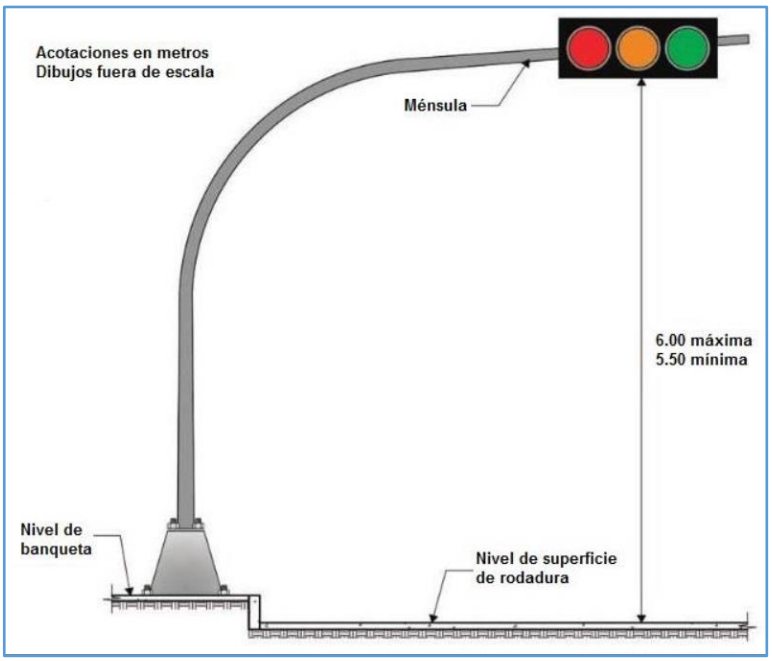


Figura 52. Soporte de Semáforo Tipo Ménsula.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

- Cabeza

  Es la armadura que contiene las partes visibles del semáforo. Cada cabeza contiene un número determinado de caras orientadas en diferentes direcciones.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

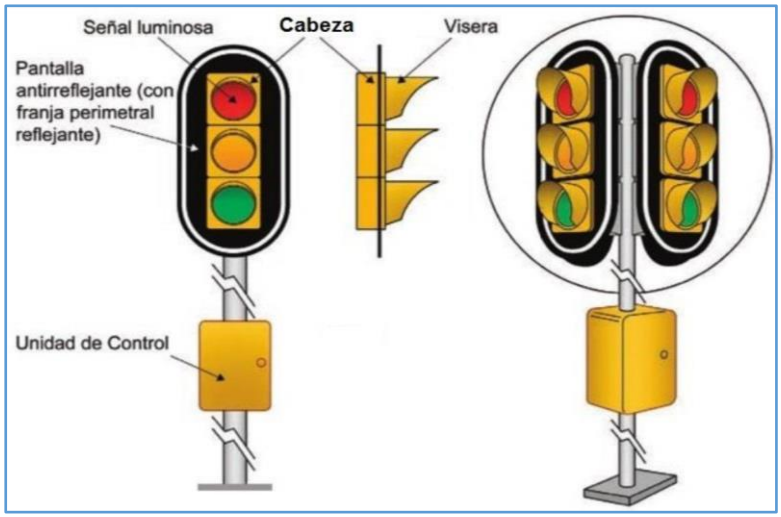


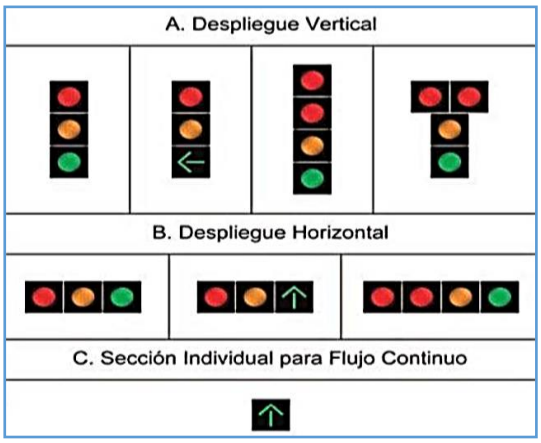
Figura 53. Configuración de la Cabeza de Semáforos.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

A continuación, se describen los elementos principales de la cabeza del semáforo:

- Cara: La cara es el conjunto de módulos luminosos, viseras y placas de contraste (opcional) que están orientados en la misma dirección. Para el control vehicular, las caras tienen de uno hasta un máximo cinco módulos luminosos, para regular los movimientos de circulación. Para el control peatonal, pueden tener dos módulos luminosos.

Tabla 4. Configuración de caras de semáforos.



Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

- Módulo luminoso o carcasa: Es la parte de la cara que emite luces de diferente color, debiendo cada módulo luminoso ser iluminado independientemente, condición

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

esencial para obtener uniformidad en la posición de estas, para darle satisfactoria brillantez y para proporcionar la flexibilidad necesaria en las indicaciones requeridas.

- Visera: Es el componente que va encima o alrededor de cada uno de los módulos luminosos, y tiene por finalidad evitar que los rayos del sol incidan sobre estos y den la impresión de estar iluminados, y además evitar que la señal emitida sea vista desde lugares distintos a los que está enfocada.

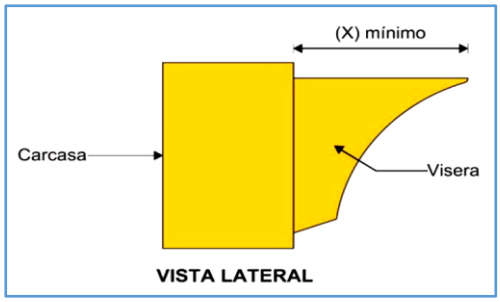


Figura 54. Visera de Semáforo.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

2.2.3.3.2 Unidad de Control (Controlador)

Según el MTC (2016), es un mecanismo electrónico o electromecánico, que tiene por finalidad controlar los cambios de emisión de señales luminosas, a partir de una programación preestablecida, que se clasifica de la siguiente manera:

- Tiempo fijo: Controlador por el cual ninguna fase del ciclo es activa por el tránsito.
- Semi-accionado: Controlador por el cual algunas de las fases de la intersección se activan por el tránsito.
- Totalmente accionado: Controlador por el cual todas las fases de la intersección se activan por el tránsito.

Adicionalmente, puede realizar las siguientes funciones:

- Procesar la información generada por los detectores para ajustar los tiempos a las necesidades de la intersección.
- Recibir y enviar información a una base de control o control maestro con el fin de optimizar el control del tráfico y su operación.
- Conjugar la implementación de programas o planes predefinidos.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Proveer los elementos que garanticen la seguridad de los usuarios evitando señalizaciones conflictivas y reportar a la base de control el tipo de falla que puede presentar.

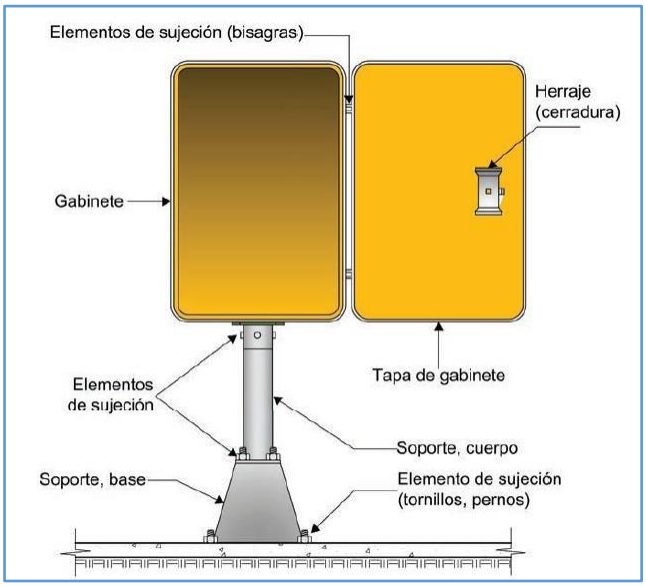


Figura 55. Tipo de Unidad de Control de Semáforo.

Fuente: Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras: (MTC, 2016). Adaptación Propia.

2.2.3.3.3 Estación Central o Control Maestro

Según el MTC (2016), Es el centro de maniobras que distribuye automáticamente las señales de control generadas sobre los circuitos de las unidades de control adyacentes o sucesivas interconectadas de un sistema coordinado de semáforos, y tiene por finalidad optimizar los movimientos del tránsito vehicular y contribuir a la solución de los problemas de congestionamiento.

En las grandes áreas urbanas es común que la distancia entre intersecciones sea corta, y cuando dichas intersecciones son controladas por semáforos, la influencia entre ellas es tan importante que la regulación del tránsito depende mucho más de la coordinación entre semáforos, que de las fases y tiempos de cada intersección en particular.

Los sistemas más utilizados en las en las Estaciones Centrales y Control Maestro son:

- Sistema coordinado simultáneo: En el cual todos los semáforos al mismo tiempo muestran la misma indicación a lo largo de una vía. En todas las intersecciones los tiempos son esencialmente los mismos y las indicaciones cambian simultáneamente, de manera que todos los semáforos indican luz verde en la vía principal y luz roja en las vías secundarias, cambiando alternadamente.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Sistema coordinado alternado: En el cual los semáforos adyacentes o grupos de semáforos adyacentes muestran indicaciones alternas a lo largo de una vía. Existe un sistema alterno simple y un sistema alterno doble y triple, en el primero el desfase es de medio ciclo, mientras que para el segundo el desfase es cero para los semáforos simultáneos, y medio ciclo para los demás.

- Sistema coordinado progresivo: Puede ser limitado o flexible, en el primer caso se fija una duración común a los ciclos y a las indicaciones de la luz verde, que son independientes de acuerdo a las exigencias de cada intersección y de conformidad con un programa de tiempos para permitir la circulación continua o casi continúa de grupos de vehículos. El segundo caso abarca todas las características del primero y algunas adicionales que dependen del tipo de Control Maestro y otros dispositivos.

2.2.3.3.4 Detectores

Según el MTC (2016), son dispositivos capaces de registrar variables del tránsito tales como, volumen, velocidad, presencia de vehículos, sentido de circulación, tipo de tránsito, intervalos o brechas, y otros.

- Los detectores pueden estar empotrados en el pavimento o en su base, ser fijados a la superficie de un pavimento, también pueden colocarse en la calzada o a un costado de la vía.

- Los detectores normalmente forman parte integral de los semáforos accionados por el tránsito, que difieren de los no accionados en que estos últimos no necesitan unidades detectoras. También existen detectores que tiene una aplicación especial como los utilizados para peatones, vehículos de emergencia y ferrocarriles.

- Los detectores de uso común para semáforos accionados por el tránsito son de presión, magnéticos y video-detección.

- Los detectores de presión se instalan en la calzada y funcionan mediante la presión ejercida por las ruedas del vehículo en marcha, pero resultan inoperativas si el vehículo se detiene.

- Los detectores magnéticos se instalan en la calzada y son accionados por la detección de un campo magnético causado por el paso de un vehículo y son de los tipos

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

compensados y no compensados; ambos tipos funcionan aun con vehículos estacionados en la zona de influencia.

- Los detectores de video-detección son accionados por cámaras de detección, y son los que en la actualidad destacan por su versatilidad y precisión, los cuales además de servir para el control automático del tránsito vehicular apoyan en aspectos de seguridad vial.

2.2.4 Volumen de Tránsito

Según Austroads (2015), el volumen es el número de vehículos por unidad de tiempo que pasa un punto dado en una carretera. El volumen puede estar relacionado con un carril, una calzada o una carretera y, en el caso de una carretera, puede incluir el tráfico en una o ambas direcciones. En el análisis de flujo de tráfico, un volumen generalmente se relaciona con una sola dirección de flujo.

Así mismo, Roess, Prassas y McShane (2011) indican que el volumen de tráfico se define como el número de vehículos que pasan por un punto en una carretera, o un determinado carril o dirección de una carretera, durante un intervalo de tiempo especificado. La unidad de medida del volumen es simplemente vehículos, aunque a menudo se expresa como vehículos por unidad de tiempo. Las unidades de tiempo utilizadas con mayor frecuencia son por día o por hora.

Entonces, Cal y Mayor y Cárdenas (2018) definen que el volumen es el número de vehículos (o personas) que pasan por un punto durante un tiempo específico. Se define volumen de tránsito, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado y se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T}$$

Fórmula 1. Volumen de Tránsito.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

Q: vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo).

N: número total de vehículos que pasan (vehículos).

T: periodo determinado (unidades de tiempo).

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.4.1 Clasificación de Volúmenes

2.2.4.1.1 Volumen de Tránsito Absolutos o Totales.

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), es el número total de vehículos que pasan durante un lapso de tiempo determinado. Dependiendo de la duración del lapso de tiempo, se tienen los siguientes volúmenes de tránsito absolutos o totales.

- Volumen de tránsito anual (TA): Es el número total de vehículos que pasa durante un año, en este caso T=1 año.
- Volumen de tránsito mensual (TM): Es el número total de vehículos que pasa durante un mes, en este caso T=1 mes.
- Volumen de tránsito mensual (TS): Es el número total de vehículos que pasa durante una semana, en este caso T=1 semana.
- Volumen de tránsito mensual (TD): Es el número total de vehículos que pasa durante un día, en este caso T=1 día.
- Volumen de tránsito mensual (TH): Es el número total de vehículos que pasa durante una hora, en este caso T=1 hora.
- Tránsito en un período inferior a una hora (Qi): Es el número total de vehículos que pasan durante un período inferior a una hora. En este caso T < 1 hora y donde i, por lo general, representa el período en minutos. Así, por ejemplo, Q_{15} es el volumen de tránsito total en 15 minutos.

En todos los casos anteriores, los períodos especificados, un año, un mes, una semana, un día, una hora y menos de una hora, no necesariamente son de orden cronológico. Por lo tanto, pueden ser 365 días seguidos, 30 días seguidos, 7 días seguidos, 24 horas seguidas, 60 minutos seguidos y períodos en minutos seguidos inferiores a una hora.

2.2.4.1.2 Volúmenes de Tránsito Horarios.

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), con base en la hora seleccionada, se definen los siguientes volúmenes de tránsito horarios, dados en vehículos por hora:

- Volumen horario máximo anual (VHMA)

  Es el máximo volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril o de una calzada durante un año determinado. En otras palabras, es la hora de mayor volumen de las 8,760 horas del año.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD).

  Es el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril o de una calzada durante 60 minutos consecutivos. Es el representativo de los periodos de máxima demanda que se pueden presentar durante un día en particular.

- Volumen horario de proyecto (VHP)

  Es el volumen de tránsito horario que servirá de base para determinar las características geométricas de la vialidad. Fundamentalmente se proyecta con un volumen horario pronosticado. No se trata de considerar el máximo número de vehículos por hora que se puede presentar dentro de un año, ya que exigiría inversiones demasiado cuantiosas, sino un volumen horario que se pueda presentar un número máximo de veces en el año, previa convención al respecto.

Un volumen horario de máxima demanda, a menos que tenga una distribución uniforme, no necesariamente significa que se conserve la misma frecuencia del flujo durante toda la hora. Esto significa que existen períodos cortos dentro de la hora con tasas de flujo mucho mayores a las de la hora misma. Para la hora de máxima demanda, se llama factor de la hora de máxima demanda o factor de hora pico, a la relación entre el volumen horario de máxima demanda VHMD, y el volumen máximo Vmáx, que se presenta durante un período dado dentro de dicha hora. Matemáticamente se expresa como:

2.2.4.2 Variación del Volumen de Tránsito en la Hora de Máxima Demanda

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), en zonas urbanas, la variación de los volúmenes de tránsito dentro de una misma hora de máxima demanda, para una calle o intersección específica, puede llegar a ser repetitiva y consistente durante varios días de la semana. Sin embargo, puede ser bastante diferente de un tipo de calle o intersección a otro, para el mismo período máximo. En cualquiera de estos casos, es importante conocer la variación del volumen dentro de las horas de máxima demanda y cuantificar la duración de los flujos máximos, para así realizar la planeación de los controles del tránsito para estos períodos durante el día, tales como prohibición de estacionamientos, prohibición de ciertos movimientos de vuelta y disposición de los tiempos de los semáforos.

2.2.4.2.1 Factor de Hora Pico (PHF)

Según el TRB (2010), en ausencia de mediciones directas de los volúmenes máximos de 15 minutos (una situación común para los análisis de planificación), se utiliza un PHF para

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

convertir los volúmenes de demanda por hora en un caudal por hora equivalente al volumen máximo de 15 minutos que se mantiene durante una hora completa.

Es un factor empleado en vías urbanas y semiurbanas, en las que pueden producirse congestiones en cortos periodos de tiempo.

Así mismo, Nuñez y Villanueva (2014) indican que de los volúmenes observados se toman los cuatro consecutivos, de periodos de 15 minutos, que formen el mayor volumen horario, este dato será el Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD). Los VHMD y los volúmenes por periodo producen un factor de hora pico (PHF por su denominación en inglés Peak-Hour Factor), que es la relación entre el VHMD y cuatro veces el flujo mayor de los periodos de 15 minutos.

$$PHF = \frac{VHMD}{v_{15} \times 4}$$

Fórmula 2. Factor de Hora Pico.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010, (TRB, 2010).

Donde:

PHF: Factor de Hora Pico.

VHMD: Volumen Horario de Máxima Demanda (vh/h).

V_{15}: Volumen Máximo en un periodo de 15min (vh/15min).

Adicionalmente, Roess, Prassas y McShane (2011) menciona que el valor máximo posible para el PHF es 1.00, que ocurre cuando el volumen en cada intervalo es constante. Durante periodos de 15 minutos, cada uno tendría un volumen de exactamente un cuarto del volumen de la hora completa. Esto indica una condición en la cual virtualmente no hay variación de flujo dentro de la hora. El valor mínimo ocurre cuando todo el volumen por hora ocurre en un intervalo de 15 minutos. En este caso, el PHF se convierte en 0.25, y representa el caso más extremo de variación de volumen dentro de la hora. En términos prácticos, el PHF generalmente varía entre un mínimo de 0.70 para áreas rurales y escasamente desarrolladas a 0.98 en áreas urbanas densas.

2.2.5 Estudios de Volumen de Tránsito

Según Garber y Hoel (2009), los estudios del volumen de tráfico se realizan para recopilar datos sobre el número de vehículos y/o peatones que pasan un punto en una instalación de la carretera

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

durante un período de tiempo específico. Este período de tiempo varía desde tan solo 15 minutos hasta tanto como un año, dependiendo del uso anticipado de los datos.

Así mismo, Cal y Mayor y Cárdenas (2018) indican los estudios sobre volúmenes de tránsito se realizan con el propósito de obtener datos reales relacionados con el movimiento de vehículos y/o personas, sobre puntos o secciones específicas dentro de un sistema vial de carreteras o calles. Dichos datos se expresan con relación al tiempo, y de su conocimiento se hace posible el desarrollo de metodologías que permiten estimar de manera razonable, la calidad del servicio que el sistema presta a los usuarios. Estos estudios varían desde los muy amplios en toda una red o sistema vial, hasta los muy sencillos en lugares específicos tales como en intersecciones aisladas, puentes, casetas de cobro, túneles, etc. Las razones para llevar a cabo los estudios de volúmenes de tránsito son tan variadas como los lugares mismos donde se realizan.

Adicionalmente, Austroads (2018) agrega que lo volúmenes se utilizan para establecer lo siguiente:

- Importancia relativa y rol de una carretera en un sistema de tráfico.
- Variaciones en los niveles de flujo de tráfico en el tiempo.
- Extensión del uso de una instalación en términos de su capacidad para transportar tráfico.
- Distribución de la demanda de viajes en una red.
- Coordinación de señales de tráfico.
- Estimar la carga en pavimentos y puentes de recuentos de vehículos clasificados en ausencia de equipo de pesaje en movimiento.
- Normas y pautas de diseño geométrico de carreteras, anchos de carril, tratamiento auxiliar de giro a la izquierda / tratamiento de canal a la izquierda canalizado y requisitos de tratamiento de giro a la derecha canalizados, etc.
- Analizar la capacidad y los niveles de servicio.
- Registrar el volumen con respecto al tipo de vehículos, por ejemplo, automóviles de pasajeros, camiones de dos ejes o camiones de tres ejes.

2.2.5.1 Método de Medición

2.2.5.1.1 Método Manual

Según Garber y Hoel (2009), el conteo manual involucra a una o más personas que registran vehículos observados usando un contador. Con este tipo de contador, se pueden registrar tanto los movimientos de giro en la intersección como los tipos de vehículos. Tenga en cuenta que,

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

en general, la inclusión de camiones ligeros y camionetas con cuatro neumáticos en la categoría de automóviles de pasajeros no crea ninguna deficiencia significativa en los datos recopilados, ya que las características de rendimiento de estos vehículos son similares a las de los automóviles de pasajeros. Sin embargo, en algunos casos, puede requerirse un desglose más detallado de los vehículos comerciales que requeriría la recopilación de datos de acuerdo con el número de ejes y/o peso. Sin embargo, el grado de clasificación de los camiones generalmente depende del uso anticipado de los datos recopilados.

Así mismo, Cal y Mayor y Cárdenas (2018), los aforos manuales están a cargo de personas, los cuales son particularmente útiles para conocer el volumen de los movimientos direccionales en intersecciones, los volúmenes por carriles individuales y la composición vehicular.

2.2.5.2 Características del Transito

Según Garber y Hoel (2009), las principales desventajas del método de recuento manual son que requiere mucha mano de obra y, por lo tanto, puede ser muy costoso, está sujeto a las limitaciones de los factores humanos y no puede utilizarse durante largos períodos de recuento. Un recuento continuo de tráfico en una sección de una carretera mostrará que el volumen de tráfico varía de hora a hora, de día a día y de mes a mes. Sin embargo, la observación regular de los volúmenes de tráfico a lo largo de los años ha identificado ciertas características que muestran que, aunque el volumen de tráfico en una sección de una carretera varía de vez en cuando, esta variación es repetitiva y rítmica. Estas características de los volúmenes de tráfico se suelen tener en cuenta cuando se planifican recuentos de tráfico para que los volúmenes recogidos en un momento o lugar determinado se relacionen con volúmenes recogidos en otros momentos y lugares.

Así mismo, Cal y Mayor y Cárdenas (2018) indican que los volúmenes de tránsito siempre deben ser considerados como dinámicos, por lo que solamente son precisos para el período de duración de los aforos. Sin embargo, debido a que sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas, es importante tener un conocimiento de sus características, para así programar aforos, relacionar volúmenes en un tiempo y lugar con volúmenes de otro tiempo y lugar, y prever con la debida anticipación la actuación de las fuerzas dedicadas al control del tránsito y labor preventiva, así como las de conservación.

2.2.6 Análisis del Flujo vehicular o Tasa de Flujo

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), mediante el análisis de los elementos del flujo vehicular se pueden entender las características y el comportamiento del tránsito, requisitos básicos para

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

el planeamiento, proyecto y operación de carreteras, calles y sus obras complementarias dentro del sistema de transporte. Con la aplicación de las leyes de la física y las matemáticas, el análisis del flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, lo cual permite determinar el nivel eficiencia de la operación. Uno de los resultados más útiles del análisis del flujo vehicular es el desarrollo de modelos microscópicos y macroscópicos que relacionan sus diferentes variables como el volumen, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento. Estos modelos han sido la base del desarrollo del concepto de capacidad y niveles de servicio aplicado a diferentes tipos de elementos viales.

2.2.6.1 Flujo Vehicular o Tasa de Flujo

Según Teodorović y Janić (2017), miles de conductores y pasajeros que se desplazan de un lugar a otro forman varios flujos de tráfico. Los flujos de calles y autopistas, flujos de bicicletas en calles, flujos de personas en estaciones de metro y centros comerciales, flujos de peatones en cruces de peatones y flujos de aeronaves en las calles de rodaje del aeropuerto varían a lo largo del día, el día de la semana y el mes del año. Los flujos de tráfico son esencialmente diferentes de los flujos en otras áreas de ingeniería. Los flujos de tráfico aparecen como las consecuencias de las decisiones humanas, y están determinados por las reglas del comportamiento humano. Los flujos se expresan en el número de unidades por unidad de tiempo. Las unidades podrían ser automóviles, aviones, peatones, buques o contenedores. La unidad de tiempo podría ser un minuto, una hora, un día, mes o año. Los ingenieros de tráfico utilizan con frecuencia unidades como vehículos por hora, vehículos por día, pasajeros por hora, aviones cada 15 minutos, etc. Los fenómenos de tráfico son muy complejos.

Así mismo, Tapia y Veizaga (2006) indican que la tasa de flujo o flujo es la cantidad de vehículos que pasa por un punto o sección transversal de una vía en un tiempo menor a una hora, se puede expresar en unidades de veh/hora teniendo en cuenta que no representa exactamente el número de vehículos por hora. Por otra parte, el volumen si puede representar una cantidad de vehículos que pasan durante un periodo de tiempo mayor o igual a una hora.

Por su parte, Hoel, Garber y Sadek (2011) reafirman que el flujo se define como el número de vehículos que pasan un punto determinado en una carretera durante un período de tiempo determinado, generalmente una hora (veh/h). Un parámetro de flujo importante es el valor de flujo máximo que se puede esperar razonablemente que una instalación determinada admita. Esto a menudo se conoce como la capacidad (qm) de una sección de carretera.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Cal y Mayor y Cárdenas (2018) sostienen que la tasa de flujo (q) es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. La tasa de flujo es pues, el número de vehículos, N, que pasan durante un intervalo de tiempo específico, T, inferior a una hora, expresada en vehículos por minuto (veh/min) o vehículos por segundo (veh/seg). No obstante, la tasa de flujo, q, también puede ser expresada en vehículos por hora (veh/h), teniendo cuidado de su interpretación, pues no se trata del número de vehículos que efectivamente pasan durante una hora completa o volumen horario, Q. La tasa de flujo, q, se calcula entonces con la siguiente expresión:

$$q = \frac{N}{T}$$

Fórmula 3. Tasa de flujo o flujo.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

.

Donde:

q: Tasa de flujo o flujo. (Veh/h)

N: Número de vehículos. (N)

T: Tiempo específico. (1hora)

2.2.6.2 Intervalo Simple

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), es el intervalo de tiempo entre el paso de dos vehículos consecutivos, generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

2.2.6.3 Intervalo Promedio

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), es el promedio de todos los intervalos simples, h_i, existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en segundos por vehículo (s/veh) y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N-1}$$

Fórmula 4. Intervalo Promedio a.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

$\bar{h}$: Intervalo promedio (s/veh)

N: Número de vehículos (veh)

h_i: Intervalo simple entre el vehículo i y el vehículo i+1

Las unidades del intervalo promedio $\bar{h}$ son las unidades inversas de la tasa de flujo q, por lo que también puede plantearse la siguiente relación:

$$\bar{\mathbf{h}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{q}}$$

Fórmula 5. Intervalo Promedio b.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

$\bar{h}$: Intervalo promedio (s/veh)

q: Tasa de flujo (veh/s)

2.2.6.4 Densidad o Concentración

Según Roess, Prassas y McShane (2011), la densidad también es una medida importante de la calidad del flujo de tráfico, ya que es una medida de la proximidad de otros vehículos, un factor que influye en la libertad de maniobra y la comodidad psicológica de los conductores. Se define como la cantidad de vehículos que ocupan una determinada longitud de carretera o carril, generalmente expresada como vehículos por milla o vehículos por milla por carril. La densidad es difícil de medir directamente, ya que se requiere un punto de observación elevado desde el cual se pueda observar la sección de la carretera bajo estudio.

Así mismo, Hoel, Garber y Sadek (2011) indican que la densidad del tráfico se define como la cantidad de vehículos presentes en una longitud unitaria de carretera en un instante dado en el tiempo. La densidad se expresa típicamente en veh/km.

Por su parte, Austroads (2015) agrega que la densidad (también conocida como concentración) (*k*) es la cantidad de vehículos presentes dentro de una longitud unitaria de carril, calzada o camino en un instante dado de tiempo. La densidad generalmente se expresa como vehículos por kilómetro (veh / km) o, cuando sea apropiado para fines de análisis, vehículos por metro (veh / m).

Cal y Mayor y Cárdenas (2018) sostienen que es el número (*N*) de vehículos que ocupan una longitud específica, d, de una vialidad en un momento dado. Generalmente se expresa en

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

vehículos por kilómetro (veh/Km), ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada:

$$K = \frac{N}{d}$$

Fórmula 6. Densidad o Concentración.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

K: Densidad (veh/Km)

N: Número de vehículos (veh)

d: Longitud especifica (Km)

Según Teodorović y Janić (2017), la densidad del tráfico se expresa en (veh/km). La llamada densidad de atascos describe las condiciones del tráfico cuando los automóviles en una autopista son de parachoques a parachoques. En esta densidad, el tráfico se detiene. Cuando la densidad es extremadamente baja (por ejemplo, a las 3:30 a.m.) no nos preocupamos por otros conductores, ya que estamos prácticamente solos en una autopista. En otras palabras, los otros controladores (si los hay) no influyen en nuestra velocidad. Nuestra velocidad está influenciada exclusivamente por las prestaciones de nuestro vehículo y por los límites de velocidad publicados. Esta velocidad se conoce como velocidad de flujo libre. Con el tiempo, a primera hora de la mañana, la densidad del tránsito aumenta y, en algunos casos, crea un atasco:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

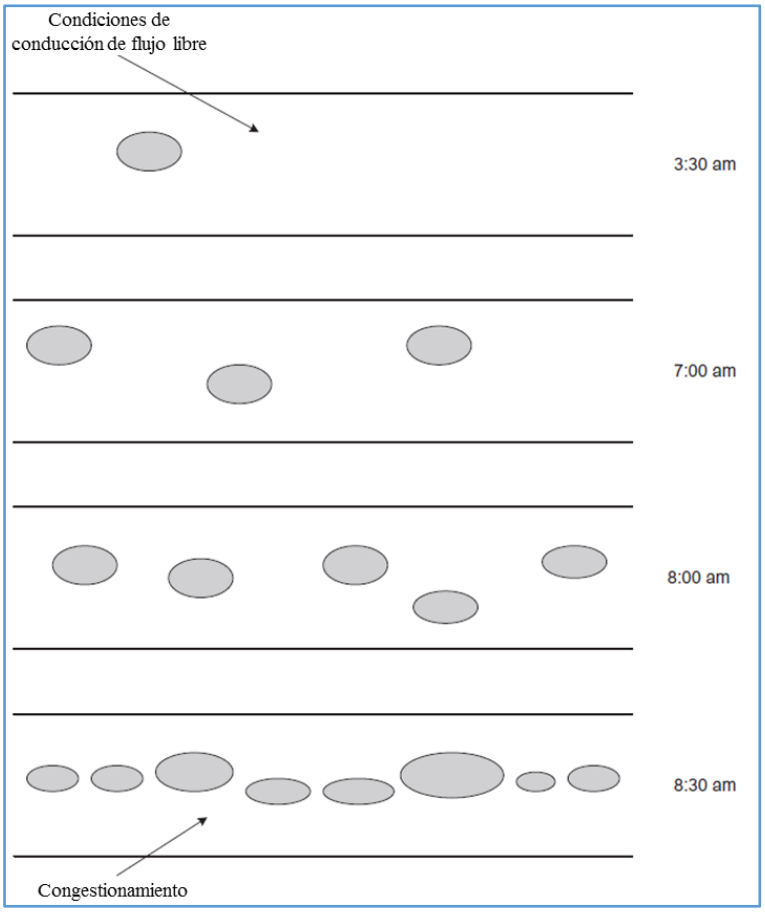


Figura 56. Aumento en la densidad del tráfico durante la madrugada.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling, (Teodorović y Janić, 2017).

2.2.6.5 Espaciamiento Simple

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, usualmente expresada en metros y medida entre sus defensas traseras.

2.2.6.6 Espaciamiento Promedio

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), es el promedio de todos los espaciamientos simples, S_i, existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en metros por vehículo (m/veh) y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_i}{N-1}$$

Fórmula 7. Espaciamiento Promedio a.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2007).

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Donde:

$\bar{S}$: Espaciamiento promedio (m/veh)

N: Número de vehículos (veh)

Si: Espaciamiento simple entre el vehículo i y el vehículo i+1

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), las unidades del espaciamiento promedio (m/veh) son las unidades inversas de la densidad k (veh/ m), por lo que también puede plantearse la siguiente relación:

$$\bar{S} = \frac{1}{k}$$

Fórmula 8. Espaciamiento Promedio b.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

$\bar{S}$: Espaciamiento promedio (m/veh)

K: Densidad o Concentración (veh/m)

2.2.6.7 Ecuación Fundamental del Flujo Vehicular.

Según Tapia y Veizaga (2006), los anteriores conceptos y relaciones fundamentales constituyen el punto de partida para analizar las características del flujo vehicular a través de sus tres variables principales: Flujo (q), velocidad (v) y densidad (k), relacionadas mediante la ecuación del flujo vehicular que, como se demostró, su forma general es:

$$q = v \times k$$

Fórmula 9. Ecuación fundamental del Flujo.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

q: Espaciamiento promedio (m/veh)

v: Velocidad (m/s)

k: Densidad o Concentración (veh/m)

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.7 Velocidad Vehicular

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), el termino velocidad se define como la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo. Es decir, para un vehículo representada su relación de movimiento, generalmente expresada en kilómetros por hora (km/h).

Así mismo, Tapia y Veizaga (2006) manifiestan que, desde la invención de los medios de transporte, la velocidad se ha convertido en el indicador principal para medir la calidad de la operación a través de un sistema de transporte. En un sistema vial la velocidad es considerada como un parámetro de cálculo para la mayoría de los elementos del proyecto. Haciendo un análisis de la evolución de los vehículos actuales en lo que respecta a velocidades alcanzadas por los mismos, se hace necesario el estudio de la velocidad para mantener así un equilibrio entre el usuario, el vehículo y la vía en busca de mayor seguridad. Se define la velocidad como el espacio recorrido en un determinado tiempo.

Por su parte, Pande y Wolshon (2016) indican que la velocidad es el segundo parámetro de tráfico medido con más frecuencia y proporciona una muy buena indicación de la calidad de las operaciones de tráfico en una instalación. Cuanto más cerca esté el flujo de tráfico real o la velocidad individual del vehículo a la velocidad de flujo libre, mejor será la calidad de las operaciones.

Austroads (2015) manifiesta que la velocidad es la distancia recorrida por un vehículo por unidad de tiempo y se expresa típicamente como metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h).

Así mismo, Pande y Wolshon (2016) sostienen que la velocidad es simplemente el inverso del tiempo requerido para recorrer una distancia. La velocidad se puede medir en un punto (o en una distancia muy corta) o en una distancia extendida.

Adicionalmente, Roess, Prassas y McShane (2011) definen la velocidad como una tasa de movimiento en distancia por unidad de tiempo.

El tiempo de viaje es el tiempo necesario para atravesar una sección definida de la carretera.

La velocidad y el tiempo de viaje están inversamente relacionados. Para el caso de una velocidad constante, esta se define como una función de la distancia y el tiempo, expresada por la formula siguiente:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

$$v\frac{d}{t}$$

Fórmula 10. Ecuación de Velocidad Constante.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

v: Velocidad constante (km/h)

d: Distancia recorrida (km)

t: Tiempo transcurrido (h)

2.2.7.1.1 Velocidad Puntual

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), es la velocidad de un vehículo a su paso por un determinado punto de una carretera o de una calle. Como dicha velocidad se toma en el preciso instante del paso del vehículo por el punto, también se le denomina velocidad instantánea.

Añaden Tapia y Veizaga (2006), que se presentan dificultades prácticas para la medición de la velocidad de punto ya que la misma por definición se presenta en un tramo de recorrido bastante corto.

2.2.7.1.2 Velocidad Media Temporal

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018) y Tapia y Veizaga (2006), es la media aritmética de las velocidades del punto de todos los vehículos o parte de ellos, que pasan por un punto especifico de una carretera o calle durante un intervalo de tiempo seleccionado. Se dice entonces que se tiene una distribución temporal de velocidades de punto.

Para datos de velocidades de punto no agrupados, la velocidad media temporal se define como:

$$\overline{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i}{n}$$

Fórmula 11. Velocidad Media Temporal a.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

$\overline{Vt}$: Velocidad media temporal (km/h)

Vi: Velocidad punto del vehículo i (km/h)

n: Número total de vehículos observados en el punto o tamaño de la muestra

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Para datos de velocidades de punto agrupados, la velocidad media temporal se define como:

$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^{m}(f_i v_i)}{n} \qquad n = \sum_{i=1}^{m} f_i$$

Fórmula 12. Velocidad Media Temporal b.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

$\overline{Vt}$: Velocidad media temporal (km/h)

V_i: Velocidad punto del vehículo i (km/h)

f_i: Número de vehículos en el grupo de velocidad i

m: Número de grupos de velocidad

2.2.7.1.3 Velocidad Media Espacial

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), es la medida de las velocidades de punto de todos los vehículos que en un instante dado se encuentran en un tramo de carretera o calle. Se dice entonces que se tiene una distribución espacial de velocidades de punto.

Por su parte, Tapia y Veizaga (2006) agregan que la velocidad media espacial o velocidad media-espacio, es la media aritmética de las velocidades de los vehículos que en un instante dado ocupan un tramo de una vía.

En un espacio o distancia dados, la velocidad media espacial se calcula dividiendo la distancia entre el promedio de los tiempos empleados por los vehículos en recorrerlo. Su fórmula matemática es:

$$\bar{V}e = \frac{d}{\bar{t}} \qquad \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n}$$

Fórmula 13. Velocidad Media Espacial a.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

$\bar{V}e$: Velocidad media espacial (km/h)

d: Distancia dada o recorrida (km)

$\bar{t}$: Tiempo promedio de recorrido (h)

n: Número total de vehículos observados o tamaño de la muestra.

También se expresa mediante la siguiente ecuación:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

$$\bar{v}_e = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1.0}{v_i}\right)}$$

Fórmula 14. Velocidad Media Espacial b.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

$\bar{V}e$: Velocidad media espacial (km/h)

$\bar{V}i$: Velocidad del vehículo i (km/h)

n: Número total de vehículos observados o tamaño de la muestra.

2.2.8 Estudio de Velocidad

Según Garber y Hoel (2009), se realizan estudios de velocidad puntual para estimar la distribución de velocidades de los vehículos en un flujo de tráfico en una ubicación particular en una carretera. La velocidad de un vehículo se define como la velocidad de movimiento del vehículo; generalmente se expresa en millas por hora (mi/h) o kilómetros por hora (km/h). Se lleva a cabo un estudio de velocidad puntual registrando las velocidades de una muestra de vehículos en una ubicación específica. Las características de velocidad identificadas por tal estudio serán válidas solo para el tráfico y las condiciones ambientales que existen en el momento del estudio.

A su vez, Austroads (2018) indican que las características de velocidad determinadas a partir de un estudio de velocidad puntual pueden usarse para:

- Determinar la necesidad de dispositivos de control de tráfico, incluida la zonificación de velocidad
- Evaluar la efectividad de las mejoras de tráfico, en estudios de antes y después
- Ayudar en el diseño de carreteras o intersecciones
- Encontrar relaciones entre velocidades y bloqueos o entre velocidades y características geométricas
- Emprender un análisis económico
- Determinar el rango y la magnitud de las velocidades como base para formular estándares de diseño.

2.2.8.1 Condiciones de Medición

Según Garber y Hoel (2009), cuando se realizan estudios de velocidad, es importante obtener datos imparciales. Esto requiere que los conductores desconozcan que se está realizando un estudio de este tipo.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

El equipo utilizado, por lo tanto, debe ocultarse al conductor, y los observadores que realizan el estudio deben pasar desapercibidos. Dado que las velocidades registradas eventualmente serán sometidas a análisis estadístico, es importante que se registre un número estadísticamente adecuado de velocidades del vehículo.

2.2.8.1.1 Ubicación Espacial

Según Pande y Wolshon (2016), las velocidades medidas o pronosticadas normalmente deberían representar condiciones lo más cercanas posible a las que son típicas en el lugar donde se realizan las mediciones. Para representar las condiciones típicas, la medición de la velocidad se debe realizar de una manera que considere las siguientes condiciones:

- Lejos de las intersecciones y otras características geométricas que influyen en las velocidades.
- Lejos de lugares donde los vehículos se aceleran o desaceleran.

2.2.8.1.2 Ubicación Temporal

Según Garber y Hoel (2009), la hora del día para llevar a cabo un estudio de velocidad depende del propósito del estudio. En general, cuando el propósito del estudio es establecer límites de velocidad publicados, observar tendencias de velocidad o recopilar datos básicos, se recomienda que el estudio se realice cuando el tráfico fluye libremente, generalmente durante las horas de menor actividad. La duración del estudio debe ser tal que se registre el número mínimo de velocidades del vehículo requeridas para el análisis estadístico. Típicamente, la duración es de al menos 1 hora y el tamaño de muestra es de al menos 30 vehículos.

2.2.9 Relaciones Fundamentales

2.2.9.1 Relación Velocidad-Densidad

Según Teodorović y Janić (2017), Al comienzo de nuestra observación matutina, la densidad del tráfico es cercana a cero. En este caso, la velocidad de los vehículos es la velocidad de flujo libre. Lentamente, la densidad del tráfico aumenta. Cuanto mayor sea la densidad del tráfico, menor será la velocidad promedio. Finalmente, una densidad de tráfico muy alta causará un atasco de tráfico. Los vehículos prácticamente no se moverán y la velocidad será igual a cero.

La relación de velocidad-densidad que se muestra en la figura es lineal, es decir:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

$$\bar{V}e = Vf\left(1 - \frac{k}{kj}\right)$$

Fórmula 15. Relación lineal Velocidad-Densidad del Tránsito.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

Donde:

$\bar{V}e$: Velocidad media espacial (Km/h)

k: Densidad (Veh/Km/carril)

Vf: Velocidad media espacial a flujo libre (Km/h)

kj: Densidad de congestionamiento (Veh/Km/carril)

Una relación típica de velocidad-densidad, la velocidad de flujo libre y la densidad de atasco se indican en la figura siguiente.

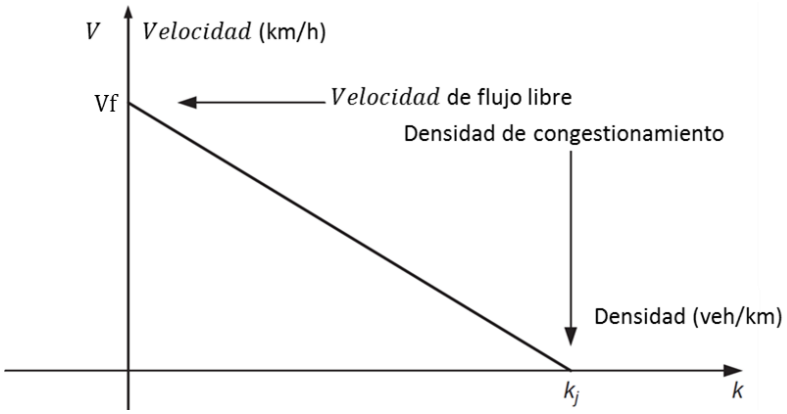


Figura 57. Relación Velocidad-Densidad del Tránsito

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

Según Teodorović y Janić (2017), la relación lineal de velocidad-densidad es una aproximación de la realidad. Esta relación se conoce como el modelo Greenshields. Muchas mediciones de campo mostraron que la relación de velocidad-densidad no es lineal, especialmente en las áreas de densidad de tráfico de baja y alta velocidad. Por otro lado, la relación lineal es sencilla y nos ayuda a comprender mejor los problemas complejos del flujo de tráfico.

2.2.9.2 Relación Flujo-Densidad

La demostración según Teodorović y Janić (2017):

Vamos a multiplicar la densidad k por la velocidad *v*. Si analizamos las unidades, concluimos que estamos multiplicando (veh/km) por (km/h). De esta manera, obtenemos:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

$$\left(\frac{veh}{km}\right)\left(\frac{km}{h}\right) = \left(\frac{veh}{h}\right)$$

Obviamente, las unidades (veh/h) son unidades de flujo. Vemos que podemos obtener unidades de flujo multiplicando unidades de densidad por unidades de velocidad. Esto significa que:

$$q = vk \text{ .....(1)}$$

El flujo es igual a la densidad multiplicada por la velocidad. Usando la relación lineal entre velocidad y densidad, obtenemos:

$$q = vk = vf\left(1 - \frac{k}{kj}\right)k \text{.....(2)}$$

es decir:

$$q = vf\left(k - \frac{k^2}{kj}\right)k \text{ .....(3)}$$

Fórmula 16. Relación Flujo-Densidad del Tránsito

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

Donde:

q: Flujo (veh/h)

k: Densidad (veh/km/carril)

V_f: Velocidad media espacial a flujo libre (km/h)

k_j: Densidad de congestionamiento (veh/km/carril)

De la relación anterior concluimos que el flujo q es la función cuadrática de la densidad k.

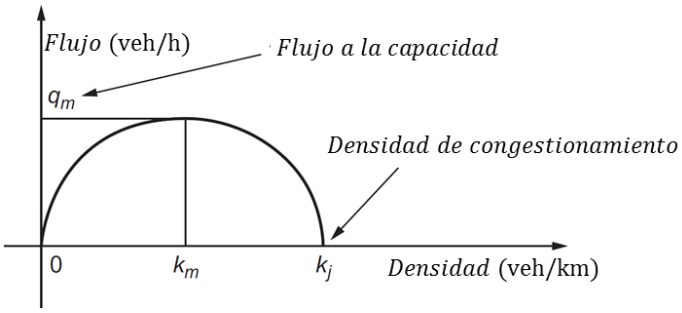


Figura 58. Relación Flujo-Densidad del Tránsito.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

La gráfica de esta función (parábola) se muestra en la figura. A medida que aumenta la densidad, el flujo aumenta desde cero hasta el valor máximo q_m. El valor q_m representa la capacidad de la carretera. Este valor a veces también se denomina capacidad de flujo de tráfico. Obviamente, k_m es la densidad que corresponde a la capacidad de la carretera. También

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

denotamos por v_m la velocidad correspondiente. Con un aumento adicional en la densidad, el flujo comienza a disminuir. Finalmente, a la densidad de atasco, el flujo es igual a cero (todos los vehículos están detenidos y no hay flujo). Es muy importante estudiar adecuadamente la densidad a la capacidad k_m. Esta densidad determina el límite entre las condiciones de tráfico estables (densidades entre cero y k_m) y las condiciones de tráfico inestables (densidades superiores a k_m). Obviamente, los vehículos adicionales que ingresan a la carretera y crean una densidad superior a k_m disminuyen el flujo de la carretera.

Todas las parábolas son simétricas con respecto al eje de simetría. Una parábola intersecta su eje de simetría en un punto llamado vértice de la parábola. En nuestro caso, el vértice de la parábola tiene coordenadas (k_m, q_m). Estas coordenadas se calculan de la siguiente manera. En el flujo máximo, la primera derivada $\frac{dq}{dk}$ debe ser igual a cero, es decir:

$$\frac{dq}{dk}=0 \qquad \text{.....(1)}$$

$$\frac{d\left[V_f\left(k-\frac{k^2}{k_j}\right)\right]}{dk}=0 \qquad \text{.....(2)}$$

$$\frac{d\left[V_f k-V_f\frac{k^2}{k_j}\right]}{dk}=0 \qquad \text{.....(3)}$$

$$V_f-V_f\frac{2k}{k_j}=0 \qquad \text{.....(4)}$$

$$V_f\left(1-\frac{2k}{k_j}\right)=0 \qquad \text{.....(5)}$$

El producto $vf\left(1-\frac{2k}{kj}\right)$ es igual a cero. El primer término de este producto es diferente de cero ya que *vf* es la velocidad de flujo libre. Esto significa que:

$$1-\frac{2k}{k_j}=0 \qquad \text{.....(6)}$$

Al resolver esta ecuación, obtenemos:

$$k_m=\frac{k_j}{2} \qquad \text{.....(7)}$$

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

La densidad que corresponde al flujo máximo (capacidad de la carretera) equivale a la mitad de la densidad de embotellamiento. La velocidad v_m que corresponde al flujo máximo es igual:

$$V_m = V_f\left(1 - \frac{k_m}{k_j}\right) \qquad \text{.....(8)}$$

$$V_m = V_f\left(1 - \frac{(k_j/2)}{k_j}\right) = V_f\left(1 - \frac{k_j}{2k_j}\right) = \frac{V_f}{2} \qquad \text{.....(9)}$$

El flujo a la capacidad q_m es igual a:

$$q_m = V_m k_m \qquad \text{.....(10)}$$

$$q_m = \frac{V_f}{2}\frac{k_j}{2} \qquad \text{.....(11)}$$

$$q_m = \frac{V_f k_j}{4} \qquad \text{.....(12)}$$

El flujo a la capacidad (q_m) es igual a la cuarta parte de la velocidad de flujo libre (v_f) multiplicada por la densidad de atasco k_j.

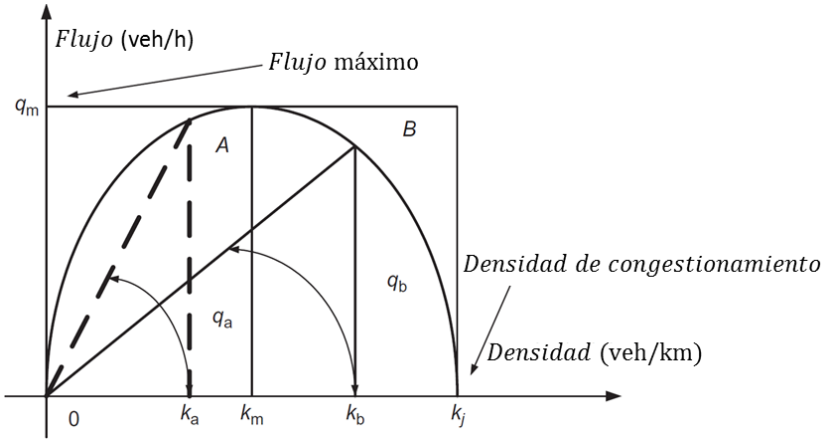


Figura 59. Pendientes que Representan Velocidades.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

Observemos los puntos A y B. Las pendientes correspondientes que se muestran en la figura representan velocidades relacionadas con los puntos A y B. Por ejemplo, la pendiente relacionada con el punto B representa la velocidad media espacial de todos los vehículos tomados en cuenta para calcular la densidad k_b.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.9.3 Relación Velocidad-Flujo

Según Teodorović y Janić (2017), consideramos una relación de velocidad-densidad lineal, es decir:

$$Vf = Vf\left(1 - \frac{k}{kj}\right) \text{.....(1)}$$

Fórmula 17. Relación de Velocidad-Densidad Lineal.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

Usando esta relación, podemos expresar la densidad *k* como una función de la velocidad *v*, es decir:

$$k = k_j\left(1 - \frac{V}{V_f}\right) \qquad \text{.....(2)}$$

$$q = Vk = Vk_j\left(1 - \frac{V}{V_f}\right) \qquad \text{.....(3)}$$

$$q = k_j\left(V - \frac{V^2}{V_f}\right) \qquad \text{.....(4)}$$

La relación entre velocidad y flujo se muestra en:

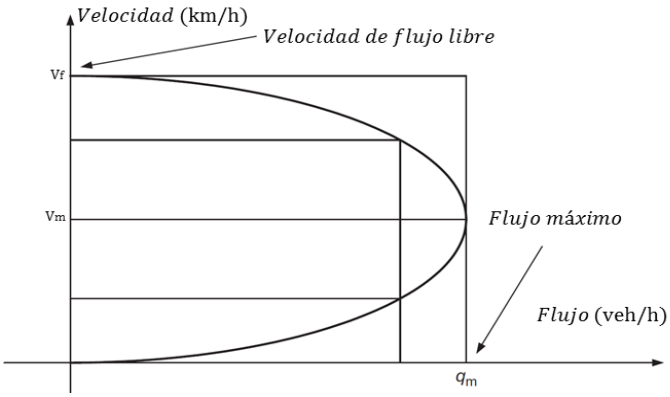


Figura 60. Relación Velocidad-Flujo.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

En este caso, el vértice de la parábola tiene coordenadas (q_m, v_m). Vemos que el valor de flujo específico siempre corresponde a los dos valores de velocidad (excepto en el caso del flujo a la capacidad q_m). Las velocidades en el rango desde la velocidad de flujo libre hasta la velocidad a la capacidad caracterizan condiciones de tráfico estables. Las condiciones inestables del

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

tráfico caracterizan carreteras altamente congestionadas. La velocidad espacial promedio en condiciones de tráfico inestable está por debajo de la velocidad a la capacidad (por debajo de *vm*). Las condiciones de tráfico inestables se describen con frecuencia como un tráfico de "parar y continuar".

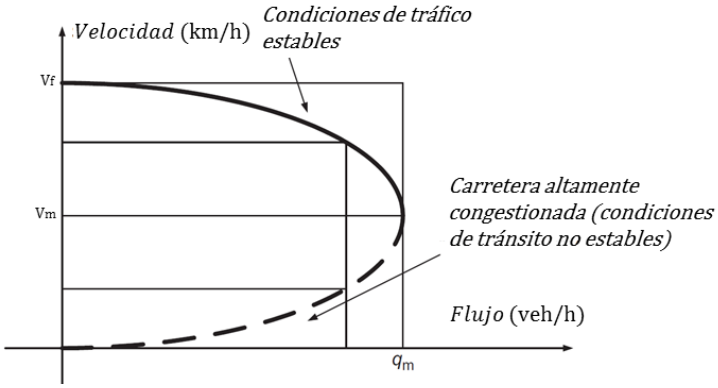


Figura 61. Condiciones de tráfico estables e inestables.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

2.2.9.4 Diagrama Fundamental del Flujo del Tránsito

Según Teodorović y Janić (2017), en la siguiente figura podemos ver las tres variables principales simultáneamente. Esta es la razón por la que los investigadores llaman a este diagrama el diagrama fundamental del flujo de tráfico. Los otros diagramas que usamos para describir el flujo de tráfico muestran solo dos variables principales de tráfico.

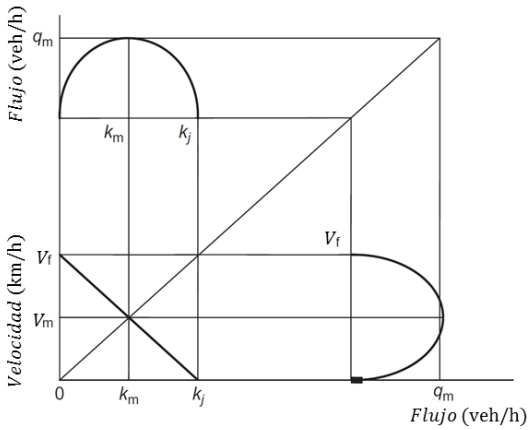


Figura 62. Diagrama fundamental del flujo de tráfico.

Fuente: Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. (Teodorović y Janić, 2017).

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), en la práctica cada una de las relaciones anteriores tienen su uso particular. Así, por ejemplo, la relación velocidad-densidad es el punto de partida de la mayoría de los modelos o enfoques teóricos del flujo vehicular, puesto que para un simple valor de la densidad existe un solo valor de velocidad; esta situación no ocurre en los otros

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

casos. La relación flujo-densidad es la base para el control del tránsito en autopistas, puesto que la densidad o concentración se puede expresar en términos del porcentaje de ocupación de tramos específicos en un momento dado. La relación velocidad-flujo es utilizada principalmente para identificar los niveles de servicio (velocidades) y los niveles de productividad (flujos). Finalmente se puede observar que las regiones correspondientes a flujos de tránsito no congestionados están limitadas por:

$$0 \leq q \leq qm$$

$$Vm \leq V \leq Vf$$

$$0 \leq k \leq km$$

2.2.10 Tiempo de Viaje, Demoras y Colas

Según Austroads (2018), un estudio sobre el tiempo de viaje y la demora mide el tiempo promedio de viaje y recorrido a lo largo de las secciones de una ruta y, al mismo tiempo, recopila información sobre la ubicación, la duración y la causa de las demoras. Un estudio de demora mide el tiempo de demora de detención en puntos específicos, como intersecciones o cruces a nivel de ferrocarril. A partir de los tiempos medidos, se pueden calcular los tiempos medios de viaje y las velocidades de carrera.

2.2.10.1 Tiempo de Viaje

Según Mathew (2014), el tiempo de viaje se puede definir como el tiempo total transcurrido de viaje, incluido el paro y la demora, necesarios para que un vehículo viaje de un punto a otro en una ruta específica bajo la condición de tráfico existente.

Asi mismo, Austroads (2018) indica que el tiempo de viaje ha sido identificado por Austroads como una importante medida de rendimiento del sistema y las agencias de carreteras ahora realizan encuestas de tiempo de viaje regulares. La forma convencional de recopilar datos del tiempo de viaje es que los observadores graben los datos a medida que viajan a través de la red de carreteras. Algunas organizaciones han desarrollado vehículos instrumentados para realizar encuestas de tiempo de viaje e incluyen sistemas de posicionamiento global (GPS) con datos de tiempo y posición.

Por su parte, Roess, Prassas y McShane (2011) refieren que los estudios de tiempo de viaje son muy significativos para una instalación o grupo de instalaciones que forman una ruta. Se busca información sobre el tiempo de viaje entre puntos clave dentro del área de estudio y se usa para

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

identificar aquellos segmentos que necesitan mejoras. Los estudios de tiempo de viaje a menudo se coordinan con observaciones de demora en puntos de congestión a lo largo de la ruta de estudio.

- La información de tiempo de viaje se usa para muchos propósitos, que incluyen:
- Identificar ubicaciones problemáticas en las instalaciones debido a los altos tiempos de viaje y / o retraso.
- Para medir el nivel de servicio arterial, basado en velocidades de viaje promedio y tiempos de viaje.
- Para proporcionar la entrada necesaria a los modelos de asignación de tráfico, que se centran en el tiempo de viaje de enlace como un factor determinante clave de la selección de ruta.
- Proporcionar datos de tiempo de viaje para la evaluación económica de las mejoras de transporte.
- Desarrollar mapas de contorno de tiempo y otras descripciones de la congestión del tráfico en un área o región.

2.2.10.2 Demoras

Según Mathew (2014), la demora se define como el tiempo adicional que los conductores pasan frente a sus expectativas. Es tiempo perdido por el tráfico debido a la fricción del tráfico y los dispositivos de control del tráfico.

Así mismo, Garber y Hoel (2009), indican que el retraso es el tiempo perdido por un vehículo debido a causas que escapan al control del conductor. El retraso operacional es esa parte del retraso causado por la impedancia de otro tráfico. Esta impedancia puede ocurrir como fricción lateral, donde el flujo de la corriente es interferido por otro tráfico (por ejemplo, estacionamiento o desparramamiento de vehículos) o como fricción interna, donde la interferencia está dentro de la corriente de tráfico (por ejemplo, reducción de la capacidad de la autopista).

Por su parte, Roess, Prassas y McShane (2011), mencionan que la demora se refiere a la cantidad de tiempo que se consume al atravesar la intersección: la diferencia entre la hora de llegada y la hora de salida.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.10.2.1 Tipos de Demoras

Las formas de demora más frecuentemente utilizadas se definen de la siguiente manera:

- Demora de tiempo detenido: Según Garber y Hoel (2009), la demora del tiempo detenido se define como el tiempo que un vehículo se detiene en la cola mientras espera pasar a través de la intersección; el promedio del tiempo de demora detenido es el promedio de todos los vehículos durante un período de tiempo específico.

  Según Mathew (2014), es el tiempo en que un vehículo no se está moviendo.

- Demora de aproximación. Según Garber y Hoel (2009), el retraso de aproximación incluye el retardo de tiempo detenido, pero agrega la pérdida de tiempo debido a la desaceleración de la velocidad de aproximación a una parada y la pérdida de tiempo debido a la aceleración de la velocidad deseada. La demora promedio de aproximación es el promedio de todos los vehículos durante un período de tiempo específico.

  Según Mathew (2014), es la demora de viaje encontrada en una aproximación hasta la intersección.

- Demora de tiempo en cola. Según Garber y Hoel (2009), la demora en el tiempo en cola es el tiempo total desde que un vehículo se une a una cola de intersección hasta su descarga a través de la línea STOP a la salida. De nuevo, el retraso promedio de tiempo en cola es el promedio de todos los vehículos durante un período de tiempo específico.

- Demora de tiempo de viaje. Según Garber y Hoel (2009), este es un valor más conceptual. Es la diferencia entre el tiempo de viaje esperado del conductor a través de la intersección (o cualquier segmento de carretera) y el tiempo real requerido. Dada la dificultad de establecer un tiempo de viaje deseado para atravesar una intersección, este valor rara vez se utiliza, excepto como un concepto filosófico.

  Según Mathew (2014), es la diferencia entre el tiempo de viaje real requerido para atravesar un tramo de una calle o autopista y el tiempo correspondiente a la velocidad promedio del tráfico en condiciones no congestionadas. Incluye demora de aceleración y desaceleración además de demora detenida.

- Demoras de control. Según Garber y Hoel (2009), es el retraso causado por un dispositivo de control, ya sea una señal de tráfico o un STOP-sign. Es aproximadamente

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

igual al retardo de tiempo en cola más el componente de retardo de aceleración-deceleración.

- Demora por congestión: Según Mathew (2014), el retraso por congestión es el retraso causado por el efecto de constricción o desaceleración de las intersecciones sobrecargadas, anchuras de calzada inadecuadas, automóviles estacionados, pavimento abarrotado y factores similares.
- Demora fija: Según Mathew (2014), el retraso al que está sujeto un vehículo, independientemente de la cantidad de tráfico e interferencia presentes.
- Demora operacional: Según Mathew (2014), el retraso causado por la interferencia de otro componente del flujo de tráfico. Los ejemplos incluyen el tiempo perdido mientras se espera una brecha en un flujo de tráfico conflictivo, o como resultado de congestión, maniobras de estacionamiento, peatones y movimiento de giro.
- Demora media: Según Garber y Hoel (2009), La demora media es el promedio de demoras de todos los vehículos durante un período de tiempo específico.

2.2.10.2.2 Índice de Congestión

Según el Kansas City Scout traducido al español, el observatorio de la ciudad de Kansas (KCS, 2011), el índice de congestión relaciona el tiempo de recorrido a través del segmento y el tiempo que se emplea en flujo libre mediante la siguiente ecuación:

$$CI = \frac{Tr}{Tl}$$

Fórmula 18. Índice de Congestión.

Fuente: Congestion Index Report. (Kansas City Scout, 2011).

Donde:

CI: Índice de congestión

Tr: Tiempo de recorrido a través del segmento (seg)

Tl: Tiempo de recorrido en condiciones de flujo libre (seg)

El índice de tiempo de viaje se puede entender relacionando el valor con un porcentaje. Si el índice es 1, entonces el tiempo promedio de viaje es el mismo que el tiempo de viaje de flujo libre, lo que significa que no hay congestión. Si el índice de congestión es 1.5 o mayor significa

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

que el tiempo de viaje real es 150% del tiempo de flujo libre, o se tarda 1.5 veces más en recorrer un segmento de lo que sería en condiciones no congestionadas, por lo tanto, existe congestión.

2.2.10.3 Longitud de Cola

Según Austroads (2018), otra medida relevante es la cola o la longitud de la cola. Un vehículo está en una cola cuando el vehículo que está frente a él lo controla en sus acciones o ha sido detenido por un componente del sistema de tráfico. Las colas pueden, por lo tanto, ocurrir en el tráfico que se mueve a lo largo de la carretera abierta, así como en las restricciones en el sistema de tráfico. La agrupación de vehículos es, según la definición anterior, una cola. Las medidas de longitud de cola y retardo están bastante relacionadas y, a menudo, se pueden estimar entre sí para detectar señales de tráfico y otras restricciones de tráfico.

Así mismo, Roess, Prassas y McShane (2011) indican que hacer cola se refiere a la cantidad de vehículos obligados a hacer cola detrás de la línea de parada durante una fase de señal ROJA; las medidas comunes incluyen la longitud de cola promedio o la longitud de cola de un percentil.

2.2.11 Capacidad

Según el TRB (2010), la capacidad de un elemento del sistema es la tasa máxima de flujo por hora sostenible en la que se puede esperar que las personas o los vehículos atraviesen un punto o una sección uniforme de un carril o una carretera durante un período de tiempo determinado bajo la vía, el medio ambiente, el tráfico y condiciones control.

- La capacidad vehicular: Es el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto determinado durante un período específico en las condiciones prevalecientes de la vía, el tráfico y el control. Esto supone que no hay influencia de la operación de tráfico descendente, como las colas que retroceden en el punto de análisis.

Así mismo, Austroads (2018) menciona que la capacidad, es la tasa horaria máxima sostenible a la que se puede esperar razonablemente que personas o vehículos atraviesen un punto o sección uniforme de un carril o carretera durante un período de tiempo determinado bajo la carretera, el medio ambiente, el tráfico y el control condiciones El concepto se aplica igualmente al tráfico vehicular motorizado y al tráfico de bicicletas y peatones.

2.2.11.1 Capacidad para Intersecciones Semaforizadas

Según Garber y Hoel (2009), la capacidad en una intersección señalizada se da para cada grupo de carril y se define como la velocidad máxima de flujo para el grupo de carril sujeto que puede

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

atravesar la intersección bajo el tráfico predominante, la carretera y las condiciones señalizadas. La capacidad se da en vehículos por hora (veh/h) pero se basa en el flujo durante un período máximo de 15 minutos. Por lo tanto, la capacidad se aplica de manera significativa solo a movimientos o enfoques principales de la intersección. Tenga en cuenta también que, en comparación con otras ubicaciones, como segmentos de autopistas, la capacidad de un enfoque de intersección no está tan fuertemente correlacionada con el nivel de servicio. Por lo tanto, es necesario analizar tanto el nivel de servicio como la capacidad por separado cuando se evalúan las intersecciones señalizadas.

Así mismo, Cal y Mayor y Cárdenas (2018) indican que la capacidad en una intersección con semáforo se define para cada acceso, como la tasa de flujo máxima que puede pasar a través de la intersección bajo condiciones prevalecientes del tránsito, de la calle y del semáforo. Se mide en vehículos (vph) con base en flujos que tienen periodos pico de 15 minutos.

2.2.11.2 Capacidad para Carreteras de Dos Carriles

Según Bañón y Bévia (2000), se define capacidad de una sección de carretera como el máximo número de vehículos que tienen una probabilidad razonable de atravesar dicha sección durante determinado periodo de tiempo, normalmente una hora, para unas condiciones particulares de la vía y del tráfico. Dicho de otra forma, es la máxima intensidad capaz de albergar una vía sin colapsarse. La capacidad depende de las propias características de la vía -geometría y estado del pavimento- y del tráfico, especialmente su composición. Además, se deben tener en cuenta las regulaciones de la circulación existente, como limitaciones de velocidad o prohibiciones de adelantamiento, así como las condiciones ambientales y meteorológicas. Estos dos últimos factores no se hallan lo suficientemente estudiados al no influir decisivamente, salvo en casos aislados.

Cal y Mayor y Cárdenas (2018) añade que como los rebases se efectúan en el carril del sentido opuesto, y las oportunidades de lograrlos dependen en gran medida de la magnitud del volumen de tránsito opuesto, la capacidad y los niveles de servicio de las carreteras de dos carriles, en general, se analizan para ambos sentidos.

Así mismo, el TRB (2010) indica que la capacidad de una carretera de dos carriles en condiciones básicas es de 1.700 veh/h en una dirección, con un límite de 3.200 veh/h para el total de las dos direcciones. Debido a las interacciones entre flujos direccionales, cuando se alcanza una capacidad de 1,700 veh/h en una dirección, el flujo máximo opuesto se limitaría a 1,500 veh/h. Sin embargo, las condiciones de capacidad rara vez se observan, excepto en los

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

segmentos cortos. Debido a que la calidad del servicio se deteriora con caudales de demanda relativamente bajos, la mayoría de las autopistas de dos carriles se saturan antes de que la demanda se acerque a la capacidad.

2.2.12 Calidad de Servicio

Según TRB (2010), la calidad del servicio describe qué tan bien funciona una instalación o servicio de transporte desde la perspectiva de un viajero. La calidad del servicio se puede evaluar de varias maneras, incluidos los factores de observación directa perceptibles e importantes para los viajeros (por ejemplo, velocidad o demora), encuestando a los viajeros, rastreando las quejas y cumplidos sobre las condiciones de las carreteras, pronosticando la satisfacción del viajero utilizando modelos derivados del pasado, las encuestas de los viajeros y la observación de cosas que los viajeros no perciben directamente (por ejemplo, el tiempo promedio para solucionar un choque) que afectan a las cosas que pueden percibir (por ejemplo, la velocidad o el tiempo de llegada al trabajo).

La calidad del servicio es una dimensión de la movilidad y el rendimiento general del sistema de transporte. Otras dimensiones para considerar son las siguientes:

- Cantidad de servicio como la cantidad de millas por persona y las horas por persona proporcionadas por el sistema.
- Utilización de la capacidad, incluida la cantidad de congestión experimentada por los usuarios del sistema, la duración física del sistema congestionado y la cantidad de horas que existe la congestión.
- Accesibilidad: por ejemplo, el porcentaje de la población capaz de completar un viaje seleccionado dentro de un tiempo especificado.

2.2.13 Nivel de Servicio (NDS)

Según el TRB (2010), LOS (Level of Service) traducido al español NDS (Nivel de Servicio) es una estratificación cuantitativa de una medida de rendimiento o medidas que representan calidad de servicio. Las medidas utilizadas para determinar el NDS para los elementos del sistema de transporte se denominan medidas de servicio. El HCM define seis niveles de servicio, que van de A a F, para cada medida de servicio, o para la salida de un modelo matemático basado en múltiples medidas de rendimiento. NDS A representa las mejores condiciones operativas desde la perspectiva del viajero y NDS F las peores. Por el costo, el

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

impacto ambiental y otras razones, las carreteras no suelen estar diseñadas para proporcionar las condiciones de NDS A durante los períodos pico, sino más bien para obtener un estado de alerta inferior que refleje un equilibrio entre los deseos de los viajeros individuales y los deseos y recursos financieros de la sociedad. Sin embargo, durante los periodos de poco volumen del día, un elemento del sistema puede operar en NDS A.

El NDS se utiliza para traducir los resultados de rendimiento numérico complejo en un sistema simple A – F representativo de las percepciones de los viajeros sobre la calidad del servicio proporcionado por una instalación o servicio. El resultado de la carta de NDS oculta gran parte de la complejidad del rendimiento de las instalaciones. Esta función está destinada a simplificar la toma de decisiones sobre si el desempeño de las instalaciones es generalmente aceptable y si el cambio en el futuro probablemente sea percibido como significativo por el público en general.

Así mismo Cal y Mayor y Cárdenas (2018) sugiere que es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular, y de su percepción por los motoristas y/o pasajeros. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como velocidad y tiempo de recorrido, la libertad de realizar maniobras, la comodidad, la conveniencia y seguridad vial.

2.2.13.1 Nivel de Servicio de Segmentos de Calles Urbanas

Según el TRB (2010) indica que se utilizan dos medidas de rendimiento para caracterizar el NDS vehicular para una dirección dada de viaje a lo largo de un segmento de calle urbana. Una medida es la velocidad de desplazamiento para vehículos de paso. Esta velocidad refleja los factores que influyen en el tiempo de funcionamiento a lo largo del enlace y la demora en que incurren los vehículos en la intersección del límite. La segunda medida es la relación de volumen a capacidad para el movimiento pasante en la intersección del límite descendente. Estas medidas de desempeño indican el grado de movilidad provisto por el segmento. Los siguientes párrafos caracterizan cada nivel de servicio.

- Nivel de Servicio A: Describe principalmente la operación de flujo libre. Los vehículos están completamente libres de su capacidad de maniobra dentro del flujo de tráfico. El retardo de control en la intersección del límite es mínimo. La velocidad de desplazamiento supera el 85% de la velocidad de flujo libre base (ver página 169), y la relación volumen-capacidad no es superior a 1.0.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Nivel de Servicio B: Describe una operación razonablemente libre. La capacidad de maniobrar dentro del flujo de tráfico está solo ligeramente restringida, y el retardo de control en la intersección del límite no es significativo. La velocidad de desplazamiento se encuentra entre el 67% y el 85% de la velocidad de flujo libre base, y la relación de volumen a capacidad no es mayor que 1.0.

- Nivel de Servicio C: Describe una operación estable. La capacidad de maniobrar y cambiar de carril en las ubicaciones del segmento medio puede ser más restringida que en NDS B. Las colas más largas en la intersección del límite pueden contribuir a velocidades de viaje más bajas. La velocidad de desplazamiento se encuentra entre el 50% y el 67% de la velocidad de flujo libre base, y la relación volumen-capacidad no es mayor que 1.0.

- Nivel de Servicio D: Indica una condición menos estable en la que pequeños aumentos en el flujo pueden causar aumentos sustanciales en el retraso y disminuciones en la velocidad de viaje. Esta operación puede deberse a una progresión adversa de la señal, un volumen alto o una sincronización inadecuada de la señal en la intersección del límite. La velocidad de desplazamiento se encuentra entre el 40% y el 50% de la velocidad de flujo libre base, y la relación de volumen a capacidad no es mayor que 1.0.

- Nivel de Servicio E: Se caracteriza por un funcionamiento inestable y un retraso significativo. Dichas operaciones pueden deberse a alguna combinación de progresión adversa, alto volumen y sincronización inadecuada de la señal en la intersección del límite. La velocidad de desplazamiento se encuentra entre el 30% y el 40% de la velocidad de flujo libre base, y la relación volumen-capacidad no es mayor que 1.0.

- Nivel de Servicio F: Se caracteriza por un flujo a una velocidad extremadamente baja. La congestión es probable que ocurra en la intersección del límite, como lo indica un alto retraso y una extensa cola. La velocidad de desplazamiento es del 30% o menos de la velocidad de flujo libre básica, o la relación volumen-capacidad es mayor que 1.0.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Tabla 5. Niveles de Servicio de Segmentos de Calles Urbanas.

Nivel de Servicio	Velocidad de desplazamiento como un porcentaje de la velocidad de libre flujo base (%)	Nivel de Servicio por proporción de volumen/capacidad	
		≤ 1.0	> 1.0
A	> 85	A	F
B	> 67 - 85	B	F
C	> 50 - 67	C	F
D	> 40 - 50	D	F
E	> 30 - 40	E	F
F	≤ 30	F	F

Nota: Relación de volumen a capacidad de movimiento en la intersección de límite descendente.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

2.2.13.2 Nivel de Servicio de Intersecciones Semaforizadas

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018) el nivel de servicio de una intersección con semáforos se define a través de las demoras, las cuales representan para el usuario una medida del tiempo perdido de viaje, del consumo de combustible, de la incomodidad y de la frustración. Específicamente, el nivel de servicio se expresa en términos de la demora media por vehículo debida a los controles. Las demoras cuantifican el incremento en el tiempo de viaje por la presencia de semáforos, que obligan a los vehículos a detenerse. El nivel de servicio para toda la intersección o para un determinado acceso, se denomina solamente con base en la demora. A su vez, el nivel de servicio de un grupo de carriles se define con base en las demoras y en la relación volumen/capacidad (v/c).

Así mismo el TRB (2010) indica que el Nivel de Servicio se puede caracterizar por la intersección completa, cada acceso de intersección y cada grupo de carril. El retardo de control solo se utiliza para caracterizar NDS para la intersección completa o un acceso. La demora de control y la relación de volumen a capacidad se utilizan para caracterizar NDS para un grupo de carril. La demora cuantifica el aumento en el tiempo de viaje debido al control de la señal de tráfico. También es una medida sustituta de la incomodidad del conductor y el consumo de combustible. La relación volumen-capacidad cuantifica el grado en que la capacidad de una fase es utilizada por un grupo de líneas. Los siguientes párrafos describen cada NDS.

- El Nivel de Servicio A: Describe las operaciones con un retardo de control de 10 s/veh o menos y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen/capacidad es baja y cualquiera de las progresiones es excepcionalmente favorable o la duración del ciclo es muy corta. Si se debe a una progresión favorable, la mayoría de los vehículos llegan durante la indicación verde y viajan a través de la intersección sin detenerse.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- El Nivel de Servicio B: Describe las operaciones con retardo de control entre 10 y 20 s/veh y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen/capacidad es baja y cualquiera de los dos es muy favorable o la duración del ciclo es corta. Más vehículos paran que con NDS A.

- El Nivel de Servicio C: Describe operaciones con retardo de control entre 20 y 35 s/veh y una relación de volumen/capacidad no mayor que 1.0. Este nivel se suele asignar cuando la progresión es favorable o la duración del ciclo es moderada. Las fallas del ciclo individual (es decir, uno o más vehículos en cola no pueden salir debido a una capacidad insuficiente durante el ciclo) pueden comenzar a aparecer en este nivel. El número de vehículos que se detienen es significativo, aunque muchos vehículos aún pasan por la intersección sin detenerse.

- El Nivel de Servicio D: Describe las operaciones con retardo de control entre 35 y 55 s/veh y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen/capacidad es alta y cualquiera de las progresiones es inefectiva o la duración del ciclo es larga. Muchos vehículos se detienen y se notan fallas en los ciclos individuales.

- El Nivel de Servicio E: Describe operaciones con retardo de control entre 55 y 80 s/veh y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen/capacidad es alta, la progresión es desfavorable y la duración del ciclo es larga. Las fallas del ciclo individual son frecuentes.

- El Nivel de Servicio F: Describe operaciones con un retardo de control superior a 80 s/veh o una relación de volumen/capacidad superior a 1.0. Este nivel se asigna normalmente cuando la relación volumen/capacidad es muy alta, la progresión es muy pobre y la duración del ciclo es larga. La mayoría de los ciclos no pueden borrar la cola.

Un grupo de carriles puede incurrir en un retraso de menos de 80 s / veh cuando la relación de volumen a capacidad excede de 1.0. Esta condición suele ocurrir cuando la duración del ciclo es corta o la progresión de la señal es favorable, o ambas cosas. Como resultado, tanto la demora como la relación volumen/capacidad se consideran cuando se establece el grupo de carril NDS. Una relación de 1.0 o más indica que la capacidad del ciclo se utiliza completamente y representa una falla desde la perspectiva de la capacidad (de la misma manera que la demora en exceso de 80 s / veh representa una falla desde la perspectiva de la demora).

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Tabla 6. Niveles de Servicio en Intersecciones Semaforizadas.

Nivel de Servicio	Demora del control (s/veh)	Nivel de Servicio por proporción de volumen/capacidad	
		≤ 1.0	> 1.0
A	≤ 10	A	F
B	> 10 - 20	B	F
C	> 20 - 35	C	F
D	> 35 - 55	D	F
E	> 55 - 80	E	F
F	> 80	F	F

Nota: Para las evaluaciones basadas en la aproximación y en la intersección, el NDS se define únicamente por el retardo de control.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010). Adaptación Propia.

2.2.13.3 Nivel de Servicio de Intersecciones Controladas por Dos Señales de Pare (TWSC)

Según el TRB (2010) una configuración típica de este tipo es una intersección de cuatro tramos, donde una calle (la calle principal) no está controlada, mientras que la otra calle (la calle secundaria) está controlada por señales de PARE.

Figura 63. Intersección Controlada por Dos Señales de Pare (TWSC).

Fuente: Global Street Design Guide: Designing Cities Initiative, (NACTO, 2016). Adaptación Propia.

La otra configuración típica es una intersección de tres accesos, donde el enfoque de una sola calle menor (es decir, el vástago de la configuración en T) se controla mediante una señal de PARE. Los accesos a las calles menores pueden ser calles públicas o caminos privados.

Figura 64. Intersección Controlada por Dos Señales de Pare (TWSC).

Fuente: Global Street Design Guide: Designing Cities Initiative, (NACTO, 2016). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

El Nivel de Servicio para una intersección TWSC está determinado por el retardo de control calculado o medido. Para los vehículos motorizados, el NDS se determina para cada movimiento de la calle menor (o movimiento compartido) así como para los giros a la izquierda de la calle principal utilizando los criterios dados en la Tabla 7. El NDS no se define para la intersección en su totalidad o para los accesos de las calles principales por tres razones principales:

- Se supone que los vehículos que atraviesan la calle principal experimentan un retraso cero.
- La cantidad desproporcionada de vehículos que atraviesan la calle principal en una intersección típica de TWSC sesga el promedio ponderado de todos los movimientos, lo que resulta en un retraso promedio general muy bajo para todos los vehículos.
- La baja demora resultante puede enmascarar importantes deficiencias de NDS para movimientos menores. Como muestra la Tabla 7, el NDS F se asigna al movimiento si la relación volumen/capacidad para el movimiento supera 1.0, independientemente del retardo de control.

Los criterios NDS para las intersecciones TWSC son algo diferentes de los criterios utilizados para las intersecciones semaforizadas, principalmente porque las percepciones de los usuarios difieren entre los tipos de instalaciones de transporte. La expectativa es que una intersección señalizada esté diseñada para transportar volúmenes de tráfico más altos y presentará un mayor retraso que una intersección no semaforizada. Las intersecciones no semaforizadas también se asocian con una mayor incertidumbre para los usuarios, ya que los retrasos son menos predecibles que en las señales, lo que puede reducir la tolerancia al retraso de los usuarios.

Tabla 7. NDS en Intersecciones Controladas por Dos Señales de PARE (TWSC).

Nivel de Servicio	Demora del control (s/veh)	Nivel de Servicio por proporción de volumen/capacidad	
		≤ 1.0	> 1.0
A	≤ 10	A	F
B	> 10 - 15	B	F
C	> 15 - 25	C	F
D	> 25 - 35	D	F
E	> 35 - 50	E	F
F	> 50	F	F

Nota: Los criterios de NDS se aplican a cada carril en un enfoque determinado y a cada enfoque en la calle menor. NDS no se calcula para aproximaciones de calles principales o para la intersección en su conjunto.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.13.4 Nivel de Servicio de Carreteras de Dos Carriles

Según el TRB (2010) y Cal y Mayor y Cárdenas (2018) las medidas de efectividad que se utilizan para describir la calidad de servicio son la velocidad media de viaje (ATS), la demora porcentual en seguimiento (PTSF) y porcentaje de la velocidad a flujo libre (PFFS).

1. La velocidad media de viaje (ATS) refleja la movilidad, al dividir la longitud del segmento de carretera entre el tiempo medio de viaje de todos los vehículos que circulan por el segmento en ambas direcciones durante el periodo de estudio.
2. El porcentaje de tiempo consumido en seguimiento (PTFS) representa la libertad para maniobrar y el confort y conveniencia del viaje. Es el porcentaje de tiempo total de viaje que los vehículos deben viajar en pelotones, detrás (siguiendo) de los vehículos más lentos debido a la incapacidad de realizar maniobras de rebase. Como esta demora es difícil de medir, se considera el porcentaje de vehículos que viajan a intervalos menores a 3 segundos como una medida indicativa de la demora porcentual en seguimiento.
3. El porcentaje de velocidad de flujo libre (PFFS) representa la capacidad de los vehículos para viajar en o cerca del límite de velocidad establecido.

Las medidas primarias del nivel de servicio para las carreteras de los carriles Clase I, donde se espera una alta movilidad, son la velocidad media de viaje (ATS) y el porcentaje del tiempo consumido en seguimiento (PTSF). Para las carreteras de Clase II, donde la velocidad de viaje no es lo más importante, pero si la accesibilidad, el nivel de servicio se basa únicamente en el porcentaje del tiempo consumido en seguimiento (PTSF). Finalmente, para las carreteras Clase III, donde no se esperan altas velocidades limite, el nivel de servicio se basa en el porcentaje de la velocidad a flujo libre (PFFS).

En la siguiente tabla se presentan los niveles de servicio para carreteras de dos carriles Clase I, Clase II y Clase III:

Tabla 8. Niveles de Servicio para Carreteras de Dos Carriles Clase I, Clase II y Clase III.

Nivel de Servicio	Clase I		Clase II	Clase III
	Velocidad media de viaje ATS (km/h)	% de tiempo consumido en seguimiento PTSF	% de tiempo consumido en seguimiento PTSF	% de la velocidad a flujo libre PFFS
A	> 88	≤ 35	≤ 40	> 91.7
B	> 80 - 88	> 35 - 50	> 40 - 55	> 83.3 - 91.7
C	> 72 - 80	> 50- 65	> 55 - 70	> 75 - 83.3
D	> 64 - 72	> 65 - 80	> 70 - 85	> 66.7 - 75
E	≤ 64	> 80	> 85	≤ 66.7

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Debido a que las expectativas del conductor y las características de operación en las tres categorías de autopistas de dos carriles son bastante diferentes, es difícil proporcionar una definición única de las condiciones de operación en cada NDS.

Dos características, sin embargo, tienen un impacto significativo en las operaciones reales y en las percepciones de servicio del conductor:

- Capacidad de paso: Dado que las maniobras de adelantamiento en autopistas de dos carriles se realizan en la dirección opuesta del flujo, la capacidad de pasar está limitada por el flujo opuesto y por la distribución de las brechas en el flujo opuesto.
- Demanda de aprobación: A medida que aumentan los pelotones y el PTSF en una dirección determinada, aumenta la demanda de maniobras de adelantamiento. A medida que más pilotos queden atrapados en un pelotón detrás de un vehículo de movimiento lento, desearán hacer más maniobras de adelantamiento.

Tanto la capacidad y la demanda de adelantamiento están relacionadas con las tasas de flujo. Si el flujo en ambas direcciones aumenta, se establece una tendencia difícil: a medida que aumenta la demanda, se reduce la capacidad de adelantamiento.

2.2.13.4.1 Nivel de Servicio A

Los automovilistas experimentan altas velocidades de operación en carreteras de Clase I y poca dificultad para adelantar. Los pelotones de tres o más vehículos son raros. En las carreteras de Clase II, la velocidad se controlaría principalmente por las condiciones de la carretera. Se esperaría una pequeña cantidad de pelotón. En las carreteras de Clase III, los conductores deben poder mantener las velocidades de operación cercanas o iguales a la velocidad de flujo libre (FFS) de la instalación.

2.2.13.4.2 Nivel de Servicio B

La demanda que adelanta y la capacidad de adelantamiento están equilibradas. En ambas carreteras Clase I y Clase II, el grado de formación de pelotones se hace notable. Algunas reducciones de velocidad están presentes en las autopistas de clase I. En las carreteras de Clase III, es difícil mantener el funcionamiento de la velocidad de flujo libre (FFS), pero la reducción de velocidad es aun relativamente pequeña.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.13.4.3 Nivel de Servicio C

La mayoría de los vehículos viajan en pelotones. Las velocidades son notablemente reducidas en las tres clases de carreteras.

2.2.13.4.4 Nivel de Servicio D

El pelotón aumenta significativamente. La demanda de adelantamiento es alta en las instalaciones de Clase I y II, y la capacidad de adelantamiento se aproxima a cero. Un alto porcentaje de vehículos ahora viajan en pelotones, y el PTSF es bastante notable. En las carreteras de Clase III, la caída de la FFS ahora es significativa.

2.2.13.4.5 Nivel de Servicio E

La demanda se está acercando a su capacidad. Pasar en carreteras Clase I y II es prácticamente imposible, y PTSF es más del 80%. Las velocidades están seriamente reducidas. En las carreteras de Clase III, la velocidad es inferior a dos tercios de la FFS.

El límite inferior de este NDS representa la capacidad.

2.2.13.4.6 Nivel de Servicio F

El Nivel de Servicio F existe siempre que el flujo de la demanda en una o ambas direcciones exceda la capacidad del segmento. Las condiciones operativas son inestables y existe una gran congestión en todas las clases de carreteras de dos carriles.

2.2.14 Conceptos Básicos Según el HCM 2010 (TBR, 2010)

2.2.14.1 Definiciones

- Puntos: Los puntos son lugares a lo largo de una instalación donde (a) las corrientes de tráfico en conflicto se cruzan, se unen o se desvían; (b) un único flujo de tráfico está regulado por un dispositivo de control de tráfico; o (c) hay un cambio significativo en la capacidad del segmento (por ejemplo, caída de carril, adición de carril, puente angosto, mejora significativa, inicio o final de un área de influencia de rampa). Algunos puntos, como los terminales de rampa de intercambio, pueden en realidad tener una longitud física significativa asociada, como lo sugiere el Anexo 2-1 (a). Para el análisis de instalaciones urbanas, los puntos se consideran de longitud cero, todo el retraso se produce en el punto. Para el análisis de las instalaciones de la autopista, los puntos se utilizan para definir los puntos finales de los segmentos, pero no tienen medidas de rendimiento o capacidad asociadas, ya que se calculan a nivel de segmento.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Segmentos: Un segmento es la longitud de la carretera entre dos puntos. Los volúmenes de tráfico y las características físicas generalmente permanecen iguales a lo largo de un segmento, aunque pueden producirse pequeñas variaciones (por ejemplo, cambios en los volúmenes de tráfico en un segmento como resultado de un camino de entrada de bajo volumen). Los segmentos pueden o no ser direccionales.
- Acceso: Es un conjunto de carriles en una intersección que acomoda todos los movimientos de giro a la izquierda, a través y de giro a la derecha desde una dirección determinada (Norte, sur, este, oeste).
- Número de carriles: Cantidad de carriles de una vía.
- Grupo de carriles: Un carril o conjunto de carriles designados para análisis separados.
- El tipo de elemento del sistema y su entorno de desarrollo.
- Anchos de carril: Es la distancia lateral entre las marcas en el pavimento para un carril determinado.
- Velocidad de diseño: Velocidad base de la carretera.
- Longitud de Tramo: Medida de la longitud del segmento la carretera para el análisis.
- Longitud de rebase restringido: Es el porcentaje de las zonas donde no se permite el rebase de vehículos en un mismo carril y sentido.
- Densidad del punto de acceso: Es el número total de puntos de acceso a ambos lados de la carretera, dividido por la longitud del segmento.
- Período de análisis: Es un período de tiempo único (por ejemplo, el pico de 15 minutos de la hora pico) durante el cual se realiza un análisis de capacidad en un elemento del sistema.
- Duración del ciclo: Es el tiempo transcurrido entre los finales de dos terminaciones secuenciales de un intervalo determinado. Para señales coordinadas, esto se mide utilizando el intervalo de fase coordinada verde. Es una secuencia completa de fases de un semáforo.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Split: Es el segmento de la duración del ciclo asignado a cada fase o intervalo que puede ocurrir. En una unidad controladora activada, es el tiempo en el ciclo asignado a una fase: la suma de los intervalos de cambio verde, amarillo y rojo para una fase.
- Tiempo verde: Es la duración de la indicación verde para un movimiento determinado en una intersección semaforizada.
- Tiempo verde efectivo: Es el tiempo durante el cual un movimiento de tráfico determinado o un conjunto de movimientos puede proceder a la tasa de flujo de saturación; es igual al tiempo de split menos el tiempo perdido.
- Tiempo perdido del ciclo: Es el tiempo durante el cual la fase de un movimiento está activa y el acceso no es utilizado efectivamente por ese movimiento; es la suma del tiempo perdido de despeje y el tiempo perdido de puesta en marcha.

2.2.14.2 Condiciones Base

Muchos de los procedimientos en el manual HCM 2010 proporcionan una fórmula o presentaciones tabulares o gráficas simples para un conjunto de condiciones estándar específicas, que deben ajustarse para tener en cuenta las condiciones prevalecientes que no coinciden. Estas condiciones estándar se denominan condiciones de base.

Las condiciones de la base suponen un buen clima, condiciones de pavimento buenas y secas, usuarios que están familiarizados con el elemento del sistema y sin impedimentos para el flujo de tráfico.

Además, Cal y Mayor y Cárdenas (2018), indica que una condición base o ideal es una condición óptima estándar especifica de referencia, que deberá ser ajustada para tener en cuenta las condiciones prevalecientes o reales.

2.2.14.2.1 Condiciones Base para Carreteras de Dos Carriles

Las condiciones básicas para las carreteras de dos carriles son la ausencia de factores geométricos, de tránsito o ambientales restrictivos. Las condiciones de base no son las mismas que las condiciones típicas o predeterminadas, y ambas pueden reflejar restricciones comunes. Las condiciones de base están más cerca de lo que pueden considerarse condiciones ideales (es decir, las mejores condiciones que se pueden esperar dado el diseño normal y la práctica operativa). Las condiciones de base para carreteras de dos carriles son las siguientes:

- Ancho de carril mayor o igual a 12 pies (3.6576 metros).

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Hombros libres más anchos o iguales a 6 pies (1.8288 metros).
- No hay zonas de no paso.
- Todos los vehículos de pasajeros en el flujo de tráfico.
- Terreno llano.
- No hay impedimentos para el tránsito (por ejemplo, señales de tráfico, vehículos que giran).

El tráfico puede funcionar idealmente solo si los carriles y los hombros son lo suficientemente anchos como para no restringir las velocidades. Se ha demostrado que los carriles más estrechos que 12 pies (3.6576 metros) y los hombros más estrechos que 6 pies (1.8288 metros) reducen las velocidades, y también pueden aumentar el porcentaje de tiempo empleado en el seguimiento (PTSF).

La longitud y la frecuencia de las zonas de no adelantar son el resultado de la alineación de la carretera. Las zonas de no adelantar pueden estar marcadas por líneas centrales de barrera en una o ambas direcciones, pero cualquier segmento con una distancia de visión de adelanto inferior a 1000 pies (304.8 metros) también debe considerarse una zona de no adelantar.

En una carretera de dos carriles, puede ser necesario pasar por el carril de flujo opuesto. Es la única forma de llenar los huecos que se forman frente a los vehículos que se mueven lentamente en el flujo de tráfico. Las restricciones en la capacidad de pasar aumentan significativamente la velocidad a la que se forman los pelotones en el flujo de tráfico, ya que los automovilistas no pueden pasar vehículos más lentos frente a ellos.

2.2.14.3 Condiciones de la Carretera

Las condiciones del camino incluyen elementos geométricos y otros. En algunos casos, influyen en la capacidad de un elemento del sistema; en otros, pueden afectar una medida de rendimiento como la velocidad, pero no la capacidad de la carretera o el caudal máximo. Los factores de la carretera incluyen los siguientes:

- Número de carriles.
- El tipo de elemento del sistema y su entorno de desarrollo.
- Anchos de carril.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Anchos de bermas y holguras laterales.
- Velocidad de diseño.
- Alineaciones horizontales y verticales.
- Disponibilidad de carriles de giro exclusivos en las intersecciones.

En general, a medida que aumenta la severidad del terreno, se reducen las tasas de flujo de capacidad y servicio. Esto es importante para las carreteras rurales de dos carriles, donde la severidad del terreno puede afectar las capacidades operativas de vehículos individuales en el flujo de tráfico y restringir las oportunidades para pasar vehículos de movimiento lento.

2.2.14.4 Condiciones del Terreno

- Terreno general: un tramo de carretera extendido que contiene una serie de mejoras y degradaciones en las que ningún grado es lo suficientemente largo o lo suficientemente inclinado como para tener un impacto significativo en la operación del segmento general.
- Terreno a nivel: cualquier combinación de grados y alineación horizontal o vertical que permita que los vehículos pesados se mantengan a la misma velocidad que los automóviles de pasajeros, que generalmente contienen grados cortos de no más del 2%.
- Terreno ondulado: cualquier combinación de calidades y alineación horizontal o vertical que haga que los vehículos pesados reduzcan su velocidad sustancialmente por debajo de los automóviles de pasajeros, pero que no haga que los vehículos pesados funcionen a velocidades de rastreo durante un período de tiempo significativo o en intervalos frecuentes.
- Terreno montañoso: cualquier combinación de pendientes y alineación horizontal y vertical que haga que los vehículos pesados operen a velocidad de rastreo para distancias significativas o en intervalos frecuentes.

2.2.14.5 Condiciones del Tráfico

Las condiciones de tráfico que influyen en las capacidades y los niveles de servicio incluyen el tipo de vehículo y el carril o la distribución direccional.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.14.5.1 Tipo de Vehículo

La entrada de vehículos pesados (una categoría que incluye camiones pequeños y camionetas) en el flujo de tráfico afecta la cantidad de vehículos que pueden ser atendidos. Los vehículos pesados son vehículos que tienen más de cuatro neumáticos que tocan el pavimento.

Camiones, autobuses y vehículos recreativos (RV) son los tres grupos de vehículos pesados a los que se hace referencia en los métodos de este manual. Los vehículos pesados afectan negativamente al tráfico de dos maneras:

- Son más grandes que los automóviles de pasajeros y ocupan más espacio en la carretera
- Tienen capacidades de operación más deficientes que los automóviles de pasajeros, particularmente con respecto a la aceleración, la desaceleración y la capacidad de mantener la velocidad en las actualizaciones.

El segundo impacto es más crítico. La incapacidad de los vehículos pesados para mantener el ritmo de los vehículos de pasajeros en muchas situaciones crea grandes brechas en el flujo de tráfico, que son difíciles de llenar al pasar las maniobras. Las colas también pueden desarrollarse detrás de un vehículo pesado de movimiento lento. Las ineficiencias resultantes en el uso del espacio vial no se pueden superar por completo. Este efecto es particularmente perjudicial en las pendientes sostenidas y pronunciadas, donde la diferencia en las capacidades operativas es mayor, y en las autopistas de dos carriles, donde el paso requiere el uso del carril de viaje opuesto.

Los vehículos pesados también pueden afectar las operaciones de descensos, especialmente cuando las pendientes son lo suficientemente pronunciadas como para requerir la operación en una marcha baja. En estos casos, los vehículos pesados deben operar a velocidades más lentas que los automóviles de pasajeros, formando de nuevo brechas y colas detrás en el flujo de tráfico.

Los camiones cubren una amplia gama de vehículos, desde camionetas pick-up con carga ligera y camiones de panel hasta los camiones de carbón, madera y grava más pesados. Las características operativas de un camión individual varían en función del peso de su carga y el rendimiento de su motor.

Los autobuses interurbanos tienen un rendimiento relativamente uniforme. En general, los autobuses de tránsito urbano no son tan poderosos como los autobuses interurbanos; sin

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

embargo, su impacto más severo en el tráfico se debe a la descarga y recogida de pasajeros en la carretera.

El modo de autobús es operado por vehículos con neumáticos de goma que siguen rutas y horarios fijos a lo largo de las carreteras. El modo bus ofrece una considerable flexibilidad operativa. El servicio puede abarcar desde autobuses locales que paran cada dos o tres cuadras a lo largo de una calle, hasta paradas limitadas cada ½ a 1 milla (1.60934 km), hasta servicios expresos que viajan a lo largo de una carretera sin detenerse. Los autobuses pueden detenerse en el carril de viaje (en línea) o en un carril de estacionamiento o retirada (fuera de línea). Las paradas en línea reducen la demora del autobús, pero pueden aumentar la demora del vehículo y la bicicleta. Debido a que los autobuses suelen transportar más personas que los vehículos que se detuvieron detrás de ellos, las paradas en línea pueden ayudar a reducir el retraso general de las personas

2.2.14.5.2 Distribución Direccional y de Carril

Dos características de tráfico, además de la distribución de los tipos de vehículos, afectan la capacidad, las tasas de flujo del servicio y los NDS: distribución direccional y distribución de carriles. La distribución direccional tiene un impacto dramático en la operación de carreteras rurales de dos carriles, donde se logran condiciones óptimas cuando la cantidad de tráfico es aproximadamente igual en cada dirección. Los análisis de capacidad para autopistas de varios carriles se centran en una sola dirección de flujo. Sin embargo, cada dirección de la carretera se diseña generalmente para acomodar el flujo máximo en la dirección pico. Por lo general, el tráfico pico de la mañana ocurre en una dirección y el tráfico pico de la tarde ocurre en la dirección opuesta. La distribución de carriles es otro factor en las instalaciones de varios carriles. Normalmente, el carril derecho transporta menos tráfico que otros carriles.

2.2.14.5.3 Porcentaje de Vehículos Pesados

Un vehículo pesado se define como cualquier vehículo con más de cuatro neumáticos que tocan el pavimento. Los autobuses locales que paran dentro del área de intersección no están incluidos en el conteo de vehículos pesados. El porcentaje de vehículos pesados representa el recuento de vehículos pesados que llegan durante el período de análisis dividido por el número total de vehículos para el mismo período. Este porcentaje se proporciona para la misma ubicación en el segmento representado por la tasa de flujo del segmento medio.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.14.5.4 Tasa de Parada de Autobús Local

La tasa de parada del bus representa el número de buses locales que detienen y bloquean el flujo de tráfico en un grupo de movimiento dentro de los 250 pies (76.2 metros) de la línea de parada (ascendente o descendente), según se mide durante el período de análisis. Un autobús local es un autobús que se detiene para descargar o recoger pasajeros en una parada de autobús. La parada puede estar en el lado cercano o en el lado lejano de la intersección. Si existen más de 250 buses/h, entonces debe usarse un límite práctico de 250. El recuento se divide por la duración del período de análisis para producir un caudal por hora.

2.2.14.5.5 Tasa de Maniobra de Estacionamiento en la Calle

La tasa de maniobra de estacionamiento representa el conteo de maniobras de estacionamiento influyentes que se producen en un tramo de intersección, medido durante el período de análisis. Se produce una maniobra influyente directamente adyacente a un grupo de movimiento, dentro de una zona que se extiende desde la línea de parada hasta un punto a 250 pies (76.2 metros) aguas arriba de ella. Una maniobra se produce cuando un vehículo entra o sale de un puesto de estacionamiento. Si existen más de 180 maniobras/h, entonces debe usarse un límite práctico de 180. En una vía bidireccional, las maniobras se cuentan solo para el lado derecho en una vía. En una vía unidireccional, las maniobras se cuentan por separado para cada lado de la vía. El recuento se divide por la duración del período de análisis para producir un caudal por hora.

2.2.14.5.6 Modos Operativos de Giro

- Giro permitido: Es un giro a la izquierda o a la derecha en una intersección señalizada que realiza un vehículo durante un tiempo en el ciclo en el que el vehículo no tiene el derecho de paso.
- Giro protegido: Los giros a la izquierda o a la derecha en una intersección señalizada que realiza un vehículo durante un tiempo en el ciclo en el que el vehículo tiene el derecho de paso.
- Giro protegido más permitido: Protección compuesta de giro a la izquierda en una intersección señalizada que muestra la fase protegida antes de la fase permitida.

En general, el modo operativo utilizado para un movimiento de giro a la izquierda también se utiliza para el movimiento de giro a la izquierda opuesto. Por ejemplo, si se permite un movimiento de giro a la izquierda, también lo es el movimiento de giro a la izquierda opuesto. Sin embargo, este acuerdo no es obligatorio.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.14.5.7 Proporción de Vehículos que Llegan Durante la Indicación Verde

La proporción de vehículos que llegan durante la indicación verde *P* se calcula como el recuento de vehículos que llegan durante la indicación verde dividido por el número de vehículos que llegan durante todo el ciclo de la señal. Es un valor promedio que representa las condiciones durante el período de análisis.

2.2.14.5.8 Pelotón y Relación de Pelotón

Un pelotón es un grupo de vehículos o peatones que viajan juntos como un grupo, ya sea de forma voluntaria o involuntaria debido al control de la señal, geometría u otros factores.

La relación de pelotón se usa para describir la calidad de la progresión de la señal para el grupo de movimiento correspondiente. Se calcula como la tasa de flujo de la demanda durante la indicación *verde* dividida por la tasa de flujo de la demanda promedio. Los valores para la relación de pelotón típicamente varían de 0.33 a 2.0. La siguiente tabla proporciona una indicación de la calidad de la progresión asociada con los valores de proporción de pelotón seleccionados.

Tabla 9. Relación Entre el Tipo de Llegada y la Calidad de la Progresión

Relación de Pelotón	Tipo de Llegada	Calidad de Progresión
0.33	1	Muy pobre
0.67	2	No favorable
1.00	3	Llegadas aleatorias
1.33	4	Favorable
1.67	5	Altamente favorable
2	6	Excepcionalmente favorable

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

Para los movimientos de giro a la izquierda protegidos o permitidos que operan en un carril exclusivo, la relación de pelotón se utiliza para describir la calidad de la progresión durante la fase de giro asociada (es decir, el período protegido). Por lo tanto, la relación del pelotón se basa en el caudal durante la indicación verde de la fase de giro a la izquierda.

Para los movimientos de giro a la izquierda permitidos que operan en un carril exclusivo, la proporción de pelotón se usa para describir la calidad de progresión durante el período permitido. Por lo tanto, la relación del pelotón se basa en el caudal de giro a la izquierda durante la indicación verde de la fase que proporciona la operación permitida.

Para movimientos de giro a la derecha permitidos o protegidos que operan en un carril exclusivo, la proporción de pelotón se usa para describir la calidad de progresión durante el período permitido (incluso si se proporciona una operación de giro a la derecha protegida

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

durante la fase complementaria de giro a la izquierda en la calle transversal). Por lo tanto, la relación del pelotón se basa en el caudal de giro a la derecha durante la indicación verde de la fase que proporciona la operación permitida.

Para los movimientos pasantes servidos por carriles exclusivos (no hay carriles compartidos en la aproximación), la proporción del pelotón para el grupo de movimiento pasante se basa en el caudal pasante durante la indicación verde de la fase asociada.

Para todos los movimientos servidos por fases divididas, la proporción del pelotón para un grupo de movimiento se basa en su caudal durante la indicación verde de la fase común.

Para las aproximaciones de intersección con uno o más carriles compartidos, se calcula una relación de pelotón para el grupo de movimiento compartido en función del caudal de todos los carriles compartidos (más el de cualquier carril exclusivo que también se atiende) durante la indicación verde de Fase común.

La relación de pelotón para un grupo de movimiento se puede estimar a partir de datos de campo con la siguiente ecuación:

$$R_p = \frac{P}{(g/C)}$$

Fórmula 19. Tasa de Flujo de Saturación.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

Donde:

R_p: Relación de pelotón

P: Proporción de vehículos que llegan durante la indicación verde

g: Tiempo de verde efectivo (s)

C: Longitud de ciclo (s)

Los valores del tipo de llegada varían de 1 a 6. En los párrafos siguientes se proporciona una descripción de cada tipo de llegada para ayudar al analista a hacer una selección.

- El Tipo de llegada 1 se caracteriza por un pelotón denso de más del 80% del volumen del grupo de movimiento que llega al inicio del intervalo rojo. Este tipo de llegada a menudo se asocia con segmentos cortos con una progresión muy pobre en la dirección de desplazamiento del sujeto (y posiblemente una buena progresión en la otra dirección).

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- El Tipo de llegada 2 se caracteriza por un pelotón moderadamente denso que llega a la mitad del intervalo rojo o un pelotón disperso que contiene del 40% al 80% del volumen del grupo de movimiento que llega a lo largo del intervalo rojo. Este tipo de llegada a menudo se asocia con segmentos de longitud media con progresión desfavorable en la dirección de desplazamiento del sujeto.

- El tipo de llegada 3 describe una de dos condiciones. Si las señales que delimitan el segmento están coordinadas, entonces este tipo de llegada se caracteriza por un pelotón que contiene menos del 40% del volumen del grupo de movimiento que llega en parte durante el intervalo rojo y en parte durante el intervalo verde. Si las señales no están coordinadas, entonces este tipo de llegada se caracteriza por los pelotones que llegan a la intersección del sujeto en diferentes puntos en el tiempo durante el transcurso del período de análisis para que las llegadas sean efectivamente aleatorias.

- El Tipo de llegada 4 se caracteriza por un pelotón moderadamente denso que llega a la mitad del intervalo verde o un pelotón disperso que contiene del 40% al 80% del volumen del grupo de movimientos que llega a lo largo del intervalo verde. Este tipo de llegada a menudo se asocia con segmentos de longitud promedio con una progresión favorable en la dirección de desplazamiento del sujeto.

- El tipo de llegada 5 se caracteriza por un pelotón denso de más del 80% del volumen del grupo de movimiento que llega al inicio del intervalo verde. Este tipo de llegada a menudo se asocia con segmentos cortos con una progresión altamente favorable en la dirección de desplazamiento del sujeto y un número bajo a moderado de entradas de calles laterales.

- El tipo de llegada 6 se caracteriza por un pelotón denso de más del 80% del volumen del grupo de movimiento que llega al inicio del intervalo verde. Este tipo de llegada solo se produce en segmentos muy cortos con una progresión excepcionalmente favorable en la dirección de desplazamiento del sujeto y entradas de calles laterales insignificantes. Está reservado para rutas en redes de señal densa, posiblemente con calles de una sola vía.

2.2.14.6 Condiciones de Control

Para las instalaciones de flujo interrumpido (intersecciones y calles urbanas), el control del

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

tiempo durante el cual se permite que los flujos de tráfico específicos se muevan es crítico para la capacidad, las tasas de flujo del servicio y el nivel de servicio. El tipo de control más crítico es la señal de tráfico (semáforo). El tipo de control en uso, la fase de señal, la asignación de tiempo verde, la duración del ciclo y la relación con las medidas de control adyacentes afectan todas las operaciones.

Las señales de PARE y de CEDA PASO también afectan la capacidad, pero de una manera menos determinista. Una señal de tráfico designa los tiempos en que se permite cada movimiento; sin embargo, una señal de PARE en una intersección controlada por PARE de dos vías solo designa el derecho a la calle principal. Los automovilistas que viajan por la calle menor deben detenerse para encontrar brechas en el flujo de tráfico principal. La capacidad de los enfoques menores, por lo tanto, depende de las condiciones del tráfico en la calle principal. Un control de parada total requiere que los conductores se detengan e ingresen en la intersección en rotación. La capacidad y las características operativas pueden variar ampliamente, dependiendo de las demandas de tráfico en los distintos enfoques.

Otros tipos de controles y regulaciones pueden afectar significativamente la capacidad, las tasas de flujo del servicio y los NDS. El estacionamiento restringido en la acera puede aumentar el número de carriles disponibles en una calle o autopista. Las restricciones de giro pueden eliminar conflictos en las intersecciones, aumentando la capacidad. Los controles de uso del carril pueden asignar espacio de la carretera a los movimientos de los componentes y pueden crear carriles reversibles. Las rutas de una sola vía pueden eliminar los conflictos entre los giros a la izquierda y el tráfico opuesto.

2.2.14.6.1 Tipos de Control del Semáforo

En general, dos tipos de unidades controladoras de señales de tráfico están en uso hoy en día. En términos generales, se clasifican como prefijados o se activan de acuerdo con el tipo de control que proporcionan. Estos dos tipos de control se describen a continuación:

- El control pretendido consiste en una secuencia fija de fases que se muestran en orden repetitivo. La duración de cada fase es fija. Sin embargo, la duración del intervalo verde se puede cambiar según la hora del día o la semana para adaptarse a las variaciones del tráfico. La combinación de una secuencia de fase fija y la duración produce una longitud de ciclo constante.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- El control activado consiste en una secuencia de fase definida en la que la presentación de cada fase depende de si la fase está en la memoria o si el movimiento de tráfico asociado ha presentado una solicitud de servicio a través de un detector. La duración del intervalo verde está determinada por la información de demanda de tráfico obtenida del detector, sujeta a los límites mínimo y máximo preestablecidos. La terminación de una fase activada requiere una llamada de servicio desde un movimiento de tráfico en conflicto. Una fase activada se puede omitir si no se detecta una demanda.

2.2.14.6.2 Plan de Fases del Semáforo

Los controladores activados modernos implementan la eliminación de señales mediante el uso de una estructura de doble anillo que permite la presentación simultánea de una indicación verde en dos fases. Cada fase sirve a uno o más movimientos que no entran en conflicto entre sí. Los primeros controladores utilizaron una estructura de un solo anillo en la que todos los movimientos no conflictivos se asignaron a una fase común, y su duración fue dictada por el movimiento que necesita más tiempo. De las dos estructuras, la estructura de doble anillo es más eficiente porque permite que el controlador adapte la duración de la fase y la secuencia a las necesidades de los movimientos individuales. La estructura de doble anillo se usa típicamente con ocho fases; sin embargo, hay más fases disponibles para la fase compleja de la señal. La estructura de anillo doble de ocho fases se muestra en la figura siguiente. El símbolo Φ representa la palabra *fase* y el número que sigue al símbolo representa el *número de fase*.

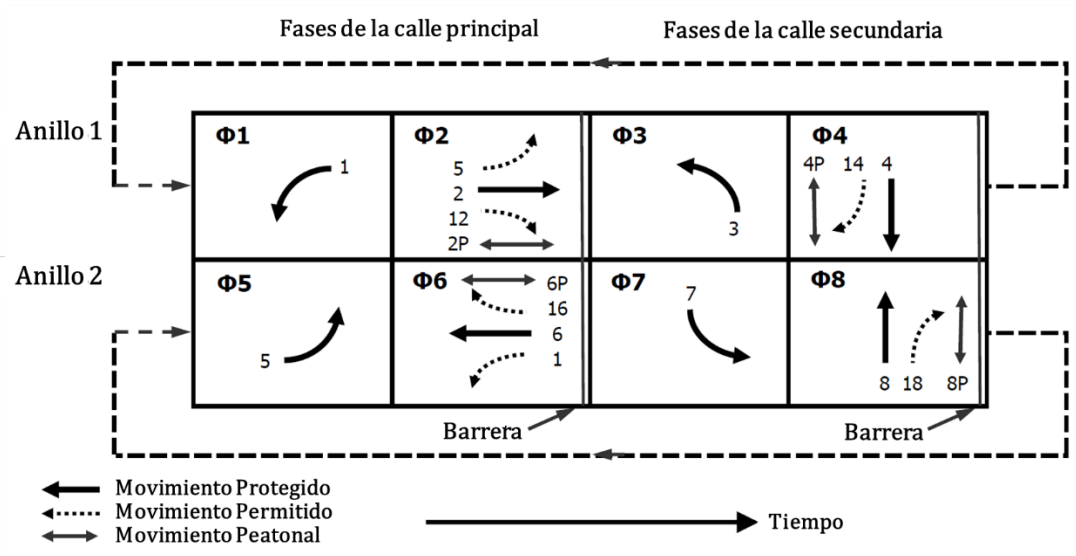


Figura 65. Estructura de Doble Anillo con Asignaciones de movimiento Ilustrativas.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.14.7 Volumen y Tasa de Flujo

El volumen y la tasa de flujo son dos medidas que cuantifican el número de vehículos que pasan por un punto en un carril o carretera durante un intervalo de tiempo determinado. Estos términos se definen de la siguiente manera:

2.2.14.7.1 Volumen

La cantidad total de vehículos que pasan por un punto o sección determinada de un carril o carretera durante un intervalo de tiempo determinado; se puede utilizar cualquier intervalo de tiempo, pero los volúmenes se expresan normalmente en términos de períodos anuales, diarios, por hora o por hora.

Otra definición, es el número total de vehículos u otros usuarios de la vía que pasan por un punto o sección determinada de un carril o calzada durante un intervalo de tiempo determinado, a menudo 1 h.

2.2.14.7.2 Tasa de Flujo Vehicular

La velocidad por hora equivalente a la que los vehículos pasan por un punto o sección de un carril o carretera durante un intervalo de tiempo determinado de menos de 1 h, generalmente 15 min.

El volumen y la tasa de flujo son variables que ayudan a cuantificar la demanda, es decir, el número de ocupantes o conductores del vehículo (generalmente expresado como el número de vehículos) que desean usar un elemento del sistema dado durante un período de tiempo específico, generalmente 1 hora o 15 minutos.

2.2.14.7.3 Tasa de Flujo Peatonal

La tasa de flujo peatonal se basa en el recuento de peatones que viajan a lo largo del segmento del sujeto durante el período de análisis. Se toma una cuenta separada para cada dirección de viaje a lo largo del lado del segmento. Cada recuento se divide por la duración del período de análisis para producir un caudal direccional por hora. Estas tasas se agregan para obtener la tasa de flujo peatonal para ese lugar.

2.2.14.8 Velocidad

La velocidad se define como una tasa de movimiento expresada como distancia por unidad de tiempo. Para caracterizar la velocidad de un flujo de tráfico, se debe usar un valor representativo, ya que se puede observar una amplia distribución de velocidades individuales

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

en el flujo de tráfico. Varios parámetros de velocidad pueden aplicarse a un flujo de tráfico. Entre ellos se encuentran los siguientes:

2.2.14.8.1 Velocidad Media de Viaje

Una medida de flujo de tráfico basada en el tiempo de viaje observado en una longitud conocida de la carretera. Es la longitud del segmento dividida por el tiempo de viaje promedio de los vehículos que atraviesan el segmento, incluidos todos los tiempos de demora detenidos. También es igual a la velocidad media del espacio.

La velocidad media espacial siempre es menor o igual que la velocidad media temporal, pero la diferencia disminuye a medida que aumenta el valor absoluto de la velocidad. Basado en el análisis estadístico de los datos observados, esta relación es útil porque las velocidades medias temporales son generalmente más fáciles de medir en el campo que las velocidades medias en el espaciales.

Para la mayoría de los procedimientos de HCM que usan la velocidad como medida de servicio, la velocidad promedio de viaje (o su equivalente, velocidad media del espacio) es el parámetro definitorio. En las instalaciones de flujo ininterrumpido que funcionan con un flujo no saturado, la velocidad de viaje promedio es igual a la velocidad de funcionamiento promedio.

La velocidad media espacial se recomienda para los análisis de HCM. Las velocidades se miden mejor observando los tiempos de viaje a lo largo de una carretera conocida

2.2.14.8.2 Velocidad Media Espacial o Velocidad Media de Viaje

Un término estadístico que denota una velocidad promedio basada en el tiempo de viaje promedio de los vehículos para recorrer una longitud de la carretera. Se denomina velocidad media espacial porque el tiempo de viaje promedio es el promedio del tiempo que cada vehículo pasa en el segmento o espacio de la carretera definido.

2.2.14.8.3 Velocidad Media Temporal

La media aritmética de las velocidades de los vehículos observada pasando un punto en una carretera; También se le conoce como la velocidad puntual promedio. Las velocidades individuales de los vehículos que pasan por un punto se registran y promedian aritméticamente.

2.2.14.8.4 Velocidad de Flujo Libre (FFS)

La velocidad promedio de los vehículos en un segmento determinado, medida en condiciones de bajo volumen, cuando los conductores son libres de conducir a la velocidad deseada y no

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

están limitados por la presencia de otros vehículos o dispositivos de control de tráfico en sentido descendente (es decir, señales de tráfico, rotondas, o señales de PARE).

- Medición directa de campo: Se prefiere la medición directa de campo en el segmento de la carretera en cuestión. Las mediciones deben tomarse sólo en la dirección en análisis; Si se analizan ambas direcciones, se hacen mediciones separadas en cada dirección. Cada medición direccional debe basarse en una muestra aleatoria de al menos 100 velocidades de vehículo. El FFS se puede medir directamente como la velocidad media en condiciones de baja demanda (es decir, el caudal de dos vías es inferior o igual a 200 veh / h). Si el segmento de análisis no se puede observar directamente, entonces se pueden usar mediciones de una instalación similar (misma clase de autopista, mismo límite de velocidad, entorno similar, etc.).

2.2.14.8.5 Velocidad de Aproximación

La velocidad de aproximación es una velocidad de flujo libre a la que los vehículos pasarían sin obstáculos a través de la intersección si la señal fuera verde durante un período prolongado y el volumen fuera ligero. Esta velocidad se puede obtener conduciendo a través de la intersección varias veces cuando la señal es verde y no hay cola. La velocidad de aproximación se registra en una ubicación en sentido ascendente que se ve menos afectada por el funcionamiento de la intersección señalizada del sujeto, así como la de cualquier otra intersección señalizada.

2.2.14.8.6 Velocidad Media de Funcionamiento

Es una medida de flujo de tráfico basada en la observación de los tiempos de viaje de los vehículos que atraviesan un tramo de carretera de longitud conocida. Es la longitud del segmento dividida por el tiempo promedio de ejecución de los vehículos que atraviesan el segmento. El tiempo de funcionamiento incluye solo el tiempo durante el cual los vehículos están en movimiento.

2.2.14.8.7 Velocidad de Diseño (FFS)

Medición directa de campo

Se prefiere la medición de campo directo en el segmento de la carretera en cuestión.

Las mediciones deben tomarse sólo en la dirección en análisis; Si se analizan ambas direcciones, se hacen mediciones separadas en cada dirección. Cada medición direccional debe basarse en una muestra aleatoria de al menos 100 velocidades de vehículo. El FFS se puede

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

medir directamente como la velocidad media en condiciones de baja demanda (es decir, el caudal de dos vías es inferior o igual a 200 veh / h).

Si el segmento de análisis no se puede observar directamente, entonces se pueden usar mediciones de una instalación similar (misma clase de autopista, mismo límite de velocidad, entorno similar, etc.).

2.2.14.9 Densidad

La densidad es el número de vehículos que ocupan una longitud determinada de un carril o carretera en un instante particular. Para los cálculos en este manual, la densidad se promedia a lo largo del tiempo y generalmente se expresa como vehículos por milla (veh / mi) o vehículos de pasajeros por milla (pc / mi).

La densidad es un parámetro crítico para las instalaciones de flujo ininterrumpido porque caracteriza la calidad de las operaciones de tráfico. Describe la proximidad de los vehículos entre sí y refleja la libertad de maniobra dentro del flujo de tráfico.

2.2.14.10 Flujo de Intersección Señalizada (con Semáforo)

La fuente más importante de interrupciones fijas en una instalación de flujo interrumpido son las señales de tráfico. Una señal de tráfico detiene periódicamente el flujo para cada movimiento o conjunto de movimientos. El movimiento en un conjunto dado de carriles es posible solo por una porción del tiempo total, porque la señal prohíbe el movimiento durante algunos períodos. Solo el tiempo durante el cual la señal es efectivamente verde está disponible para el movimiento. Por ejemplo, si un grupo de carriles en una intersección señalizada recibe un tiempo verde efectivo de 30 s de un ciclo total de 90 s, solo está disponible 30/90 o 1/3 del tiempo total para el movimiento en los carriles de los sujetos. Por lo tanto, el flujo en los carriles puede ocurrir solo por 20 minutos de cada hora. Si los carriles pueden acomodar un caudal máximo de 1,500 veh / h con la señal verde durante una hora completa, realmente pueden acomodar un caudal total de solo 500 veh / h, ya que solo un tercio de cada hora está disponible como verde.

Cuando la señal se vuelve verde, se debe considerar la dinámica de iniciar una cola de vehículos detenida. La figura 66 muestra una cola de vehículos detenidos en una señal. Cuando la señal se vuelve verde, la cola comienza a moverse. El avance entre los vehículos se puede observar cuando los vehículos cruzan la línea de parada de la intersección. El primer avance sería el tiempo transcurrido, en segundos, entre el inicio del verde y las ruedas delanteras del primer

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

vehículo que cruza la línea de parada. El segundo avance sería el tiempo transcurrido entre los parachoques delanteros (o ruedas) de los vehículos primero y segundo que cruzan la línea de parada. Los avances posteriores se miden de manera similar.

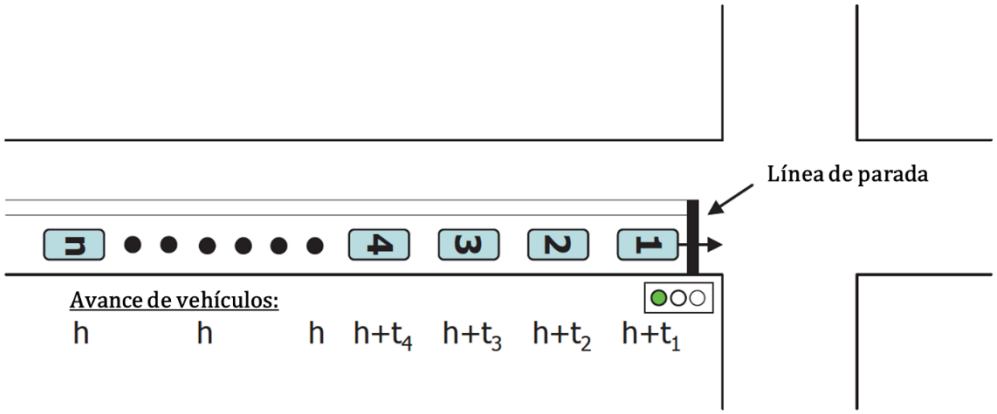


Figura 66. Caminos de Aceleración en una Intersección Señalizada

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

El conductor del primer vehículo en la cola debe observar el cambio de señal a verde y reaccionar al cambio soltando el freno y acelerando a través de la intersección. Como resultado, el primer avance será comparativamente largo. El segundo vehículo en la cola sigue un proceso similar, excepto que el período de reacción y aceleración puede ocurrir mientras el primer vehículo comienza a moverse.

El segundo vehículo se moverá más rápido que el primero cuando cruce la línea de parada, porque tiene una distancia mayor sobre la cual acelerar. Su avance será generalmente menor que el del primer vehículo. Los vehículos tercero y cuarto siguen un procedimiento similar, cada uno de los cuales logra un avance ligeramente más bajo que el vehículo anterior. Después de cuatro vehículos, el efecto de la reacción de arranque y la aceleración se ha disipado. Los vehículos sucesivos luego pasan la línea de parada en un avance más constante hasta que el último vehículo en la cola original haya pasado la línea de parada.

En la figura 66, este progreso promedio constante, denotado como *h*, se logra después de cuatro vehículos. Los avances de aceleración para los primeros cuatro vehículos son, en promedio, mayores que *h* y se expresan como $h + t_i$, donde t_i es el avance incremental para el *i* vehículo debido a la reacción de arranque y la aceleración. A medida que aumenta de 1 a 4, t_i disminuye.

La figura 67 muestra una trama conceptual de los avances. El HCM recomienda utilizar el quinto vehículo después del comienzo de un verde como punto de partida para las mediciones de flujo de saturación.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

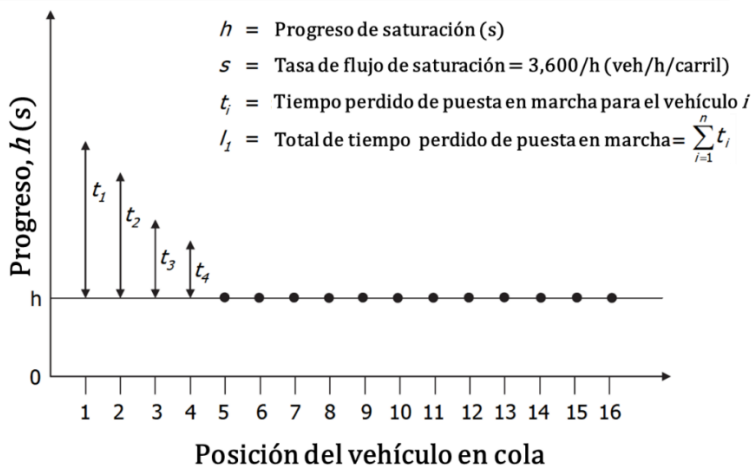


Figura 67. Concepto de Tasa de Flujo de Saturación y Tiempo Perdido

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

El valor h representa el avance de saturación, estimado como el avance promedio constante entre los vehículos después del cuarto vehículo en la cola y continuando hasta que el último vehículo que estaba en la cola al comienzo del *Verde* haya despejado la intersección.

El punto de referencia en el vehículo utilizado para medir los avances es generalmente el parachoques delantero, aunque los ejes delanteros a veces se usan en estudios que utilizan contadores de tubos para obtener los datos.

2.2.14.10.1 Tasa de Flujo de Saturación

La tasa de flujo de saturación se define como la tasa de flujo por carril en la que los vehículos pueden pasar a través de una intersección señalizada. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{3{,}600}{h}$$

Fórmula 20. Tasa de Flujo de Saturación.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

Donde:

S: Tasa de flujo de saturación (Veh/h)

h: Progreso de saturación (s)

La tasa de flujo de saturación representa el número de vehículos por hora por carril que podría pasar a través de una intersección señalizada si se mostrara una señal verde durante toda la hora, el flujo de vehículos nunca se detiene y no hay grandes avances.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Cada vez que se detiene un flujo, debe comenzar de nuevo, con los primeros cuatro vehículos experimentando la reacción de arranque y los avances de aceleración que se muestran en la figura 57. En esta figura, los primeros cuatro vehículos en la cola encuentran avances más largos que la saturación avance, *h*. Los incrementos, t_i, se llaman tiempos de inicio perdidos.

El tiempo total perdido para el arranque de los vehículos es la suma de los incrementos, calculados mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$l_1 = \sum_{i=1}^{n} t_i$$

Fórmula 21. Total, de Tiempo Perdido de Puesta en Marcha.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

Donde:

l_1: Tiempo perdido de puesta en marcha total (s)

t_i: Tiempo perdido para el vehículo i en cola (s)

n: Ultimo vehículo en cola

Cada parada de una corriente de vehículos es otra fuente de tiempo perdido. Cuando un flujo de vehículos se detiene, la seguridad requiere un tiempo de autorización antes de que se permita que un flujo de tráfico en conflicto entre en la intersección. El intervalo en el que ningún vehículo usa la intersección se denomina *tiempo perdido*, l_2. En la práctica, los ciclos de señal proporcionan esta autorización a través de intervalos de cambio, que pueden incluir indicaciones de separación en amarillo o rojo, o ambas cosas. Los conductores generalmente no pueden observar todo este intervalo, pero usan la intersección durante una parte de él.

La relación entre la tasa de flujo de saturación y los tiempos perdidos es crítica. Para cualquier carril o movimiento dado, los vehículos utilizan la intersección a la tasa de flujo de saturación durante un período igual al tiempo verde disponible más el intervalo de cambio menos los tiempos de arranque y de despeje. Debido a que el tiempo perdido se experimenta con cada inicio y parada de un movimiento, la cantidad total de tiempo perdido durante una hora está relacionada con el tiempo de la señal. Por ejemplo, si una señal tiene una duración de ciclo de 60 s, comenzará y detendrá cada movimiento 60 veces por hora, y el tiempo perdido total por movimiento será de 60 (l1 + l2).

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Como lo indica la relación entre la duración del ciclo y el tiempo perdido, la capacidad de una intersección aumenta a medida que aumenta la duración del ciclo. Sin embargo, el aumento de capacidad se puede compensar en cierta medida por la observación de que el avance de saturación, *h*, puede aumentar si la longitud de una indicación verde continua aumenta. Los aumentos de capacidad debidos a ciclos más largos a menudo también se compensan con el aumento de la demora que generalmente resulta de ciclos más largos, como se explica a continuación. Otras características de intersección, como los carriles de giro, también pueden compensar la capacidad reducida que resulta de ciclos cortos. Los ciclos más largos aumentan el número de vehículos en las colas y pueden hacer que el carril de giro a la izquierda se desborde, reduciendo la capacidad al bloquear los carriles de paso.

Existe una fuerte relación entre el retraso y la duración del ciclo. Para cada intersección hay un pequeño rango de longitudes de ciclo que resultará en el retardo promedio más bajo para los automovilistas. Sin embargo, la demora es una variable compleja afectada por muchas variables además de la duración del ciclo.

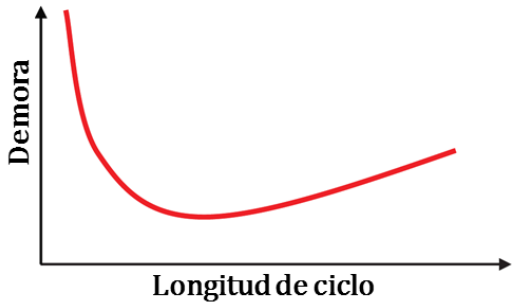


Figura 68. Relación de la Longitud de Ciclo Generalizado y Retraso.

Fuente: Highway Capacity Manual 2010. (TRB, 2010)

2.2.14.11 Flujo en Intersección Controlado por Señal de PARE y CEDA EL PASO

El conductor en la calle menor o el conductor que gira a la izquierda de la calle principal en una intersección controlada por PARE de dos vías se enfrenta a una tarea específica: seleccionar un espacio en el tráfico a través del cual ejecutar el movimiento deseado. El término brecha se refiere al intervalo de tiempo (brecha de tiempo) y la distancia correspondiente para una velocidad dada (brecha de espacio) entre los vehículos de la calle principal que entran en una intersección sin signo, medida desde el parachoques trasero hasta el parachoques delantero. El término *aceptación de brecha* describe la finalización del movimiento de un vehículo en una brecha.

La capacidad de un acceso de calle menor depende de dos factores:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- La distribución de las brechas disponibles en el flujo de tráfico de la calle principal, y
- Los tamaños de separación requeridos por los conductores en otras corrientes de tráfico para ejecutar los movimientos deseados.

La distribución de las brechas disponibles en el flujo de tráfico de la calle principal depende del volumen total en la calle, su distribución direccional, el número de carriles en la calle principal y el grado y tipo de organización en el flujo del tráfico.

Los tamaños de separación requeridos por los conductores de movimientos menores dependen del tipo de maniobra (izquierda, de frente, derecha), el número de carriles en la calle principal, la velocidad del tráfico en la calle principal, las distancias de visión, la cantidad de tiempo que el vehículo de movimiento menor ha estado esperando, y las características del conductor (vista, tiempo de reacción, edad, etc.).

Para facilitar la recopilación de datos, los avances (parachoques delantero a parachoques delantero) generalmente se miden en lugar de brechas, ya que solo se requiere la mitad de los datos (es decir, solo se deben registrar las posiciones de los parachoques delanteros, en lugar de las posiciones de los parachoques delanteros y traseros). El avance crítico es el intervalo de tiempo mínimo entre los parachoques delanteros de dos vehículos sucesivos en el flujo de tráfico principal que permitirá la entrada de un vehículo de calle menor. Cuando más de un vehículo de menor importancia utiliza una brecha en la calle principal, el intervalo de tiempo entre los dos vehículos de menor importancia se denomina avance de seguimiento. En general, el avance de seguimiento es más corto que el avance crítico.

En una intersección controlada con PARE en todos los sentidos, todos los conductores deben detenerse por completo. La decisión de proceder se basa en parte en las reglas de la carretera, que sugieren que el conductor a la derecha tiene el derecho de paso, pero también es una función de la condición del tráfico en los otros accesos. El avance de la salida para el acceso sujeto se define como el tiempo entre la salida de un vehículo y el del siguiente detrás de él. Un avance de salida se considera un avance de saturación si el segundo vehículo se detiene detrás del primero en la línea de alto. Si solo hay tráfico en un acceso, los vehículos pueden partir tan rápido como los conductores pueden acelerar y despejar la intersección de manera segura. Si el tráfico está presente en otros accesos, el progreso de saturación en el enfoque del sujeto aumentará, dependiendo del grado de conflicto entre los vehículos.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.14.12 Demoras

La demora es una medida de rendimiento importante para los elementos del sistema de flujo interrumpido. Hay varios tipos de demora, pero la *demora de control* (la demora provocada por la presencia de un dispositivo de control de tráfico) es la principal medida de servicio en el HCM para evaluar el NDS en las intersecciones señalizadas y no señalizadas.

La demora de control incluye la demora asociada con la desaceleración de los vehículos antes de una intersección, el tiempo empleado en detenerse en una intersección, el tiempo que se tarda cuando los vehículos avanzan en la cola y el tiempo necesario para que los vehículos aceleren a la velocidad deseada.

2.2.14.12.1 Demora de Control

La demora provocada por la presencia de un dispositivo de control de tráfico.

2.2.14.12.2 Demora Geométrica

Retraso causado por características geométricas que causan que los vehículos reduzcan su velocidad en la negociación de un elemento del sistema (por ejemplo, el retraso experimentado cuando una calle arterial da un giro brusco, lo que causa que los vehículos disminuyan la velocidad).

2.2.14.12.3 Demora del Incidente

El tiempo de viaje adicional experimentado como resultado de un incidente, en comparación con la condición de no incidente.

2.2.14.12.4 Demora del Tráfico

Retraso resultante de la interacción de los vehículos, lo que hace que los conductores reduzcan su velocidad por debajo de la velocidad de flujo libre.

2.2.14.12.5 Demora Total

La suma de las demoras de control, geométrica, incidente y demora de tráfico.

2.2.14.13 Parámetros de Servicio para Carreteras de Dos Carriles

Las expectativas de los viajeros y las condiciones de viaje en autopistas de dos carriles son diferentes de las de otras instalaciones de flujo ininterrumpido. El cambio de carril y el paso son posibles solo frente al tráfico que se aproxima. La demanda de pases aumenta rápidamente a medida que aumentan los volúmenes de tráfico, y la capacidad de pases en el carril opuesto

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

disminuye a medida que aumentan los volúmenes. Por lo tanto, en las carreteras de dos carriles, a diferencia de otros tipos de instalaciones de flujo ininterrumpido, el flujo de tráfico normal en una dirección influye en el flujo en la otra dirección. Los automovilistas deben ajustar sus velocidades de viaje a medida que aumenta el volumen y disminuye la capacidad de pasar.

Se desea una carretera segura, pero la operación a alta velocidad no se espera ni se desea. Por estas razones, se utilizan tres medidas de servicio para autopistas de dos carriles: porcentaje de tiempo de seguimiento, velocidad de viaje promedio y porcentaje de velocidad de flujo libre.

2.2.14.13.1 Porcentaje de Tiempo Empleado en Seguimiento

El porcentaje de tiempo empleado de seguimiento representa la libertad de maniobra y la comodidad y conveniencia de viajar. Es el porcentaje promedio de tiempo de viaje que los vehículos deben viajar en pelotones detrás de vehículos más lentos debido a la incapacidad de pasar. El porcentaje de tiempo empleado en el seguimiento es difícil de medir en el campo. Sin embargo, el porcentaje de vehículos que viajan con avances de menos de 3 s en una ubicación representativa se puede usar como una medida sustituta.

2.2.14.13.2 Velocidad de Viaje Promedio

La velocidad de viaje promedio refleja la movilidad en una carretera de dos carriles: es la longitud del segmento de la carretera dividida por el tiempo de viaje promedio de todos los vehículos que atraviesan el segmento en ambas direcciones durante un intervalo designado.

2.2.14.13.3 Porcentaje de Velocidad de Flujo Libre

El porcentaje de la velocidad de flujo libre representa la capacidad de los vehículos para viajar a un porcentaje de la velocidad de flujo libre definido.

2.2.14.13.4 Medidas de Desempeño Para el Flujo en Carreteras

Medidas de desempeño

Las siguientes son medidas de desempeño clave que se utilizan para evaluar la operación de carreteras de flujo ininterrumpido:

- La densidad: Se define típicamente por el número promedio de vehículos (o equivalentes de automóviles de pasajeros) por kilómetro de carril de la carretera. Cuanto más densas son las condiciones del tráfico, más cerca están los vehículos y más difícil es para los vehículos cambiar de carril o mantener una velocidad constante. La densidad se utiliza con frecuencia para evaluar autopistas y autopistas de varios carriles.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- La velocidad: Refleja la rapidez con que los automovilistas pueden viajar por una carretera. La velocidad a la que un conductor viajaría a lo largo de una carretera de flujo ininterrumpido en condiciones de bajo volumen se conoce como la velocidad de flujo libre. Los conductores experimentan retraso cuando su velocidad de viaje es menor que la velocidad de flujo libre, que es el resultado de demandas de tráfico que se aproximan o exceden la capacidad de la carretera. La velocidad se utiliza para evaluar todo tipo de carreteras de flujo ininterrumpido.

- El porcentaje de tiempo empleado en el seguimiento: Es una medida específica para autopistas de dos carriles. Representa la libertad de maniobra y la comodidad y conveniencia del viaje. Es el porcentaje promedio de tiempo de viaje que los vehículos deben viajar en pelotones detrás de vehículos más lentos debido a la incapacidad de pasar.

- La proporción de volumen a capacidad (v/c): Refleja qué tan cerca está funcionando una carretera a su capacidad. Por definición, el volumen de tráfico que usa una carretera no puede exceder la capacidad de la carretera. Por lo tanto, la relación v/c es en realidad una relación demanda/capacidad (d/c). Sin embargo, la relación v / c es el término usado históricamente. Una relación v/c que excede de 1.00 indica que más vehículos exigen usar una carretera de la que se puede acomodar. Los volúmenes observados representan solo el número de vehículos que pueden pasar por una parte de la carretera en las condiciones existentes; estos volúmenes pueden verse limitados por cuellos de botella en otros lugares a lo largo de la carretera. En contraste, los volúmenes de demanda representan el número de vehículos que se observarían en ausencia de cuellos de botella. Los análisis que no toman en cuenta los volúmenes de demanda pueden dar como resultado un pronóstico de mejores condiciones futuras de lo que realmente ocurriría.

2.2.14.14 Parámetros de Servicio para Segmentos Urbanos

La medida de servicio para el modo de automóvil en una calle urbana es el porcentaje de la velocidad de flujo libre base. Los automovilistas que viajan por las calles arteriales esperan poder viajar en o cerca del límite de velocidad establecido entre las intersecciones y tienen que detenerse solo con poca frecuencia. A medida que aumenta la demora debido a los dispositivos de control de tráfico y a otros usuarios de la vía (por ejemplo, los vehículos detenidos en un carril de tránsito esperando para girar, los autobuses que paran para servir a los pasajeros o los cruces de peatones) aumentan la velocidad promedio y el LOS percibido.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.14.15 Parámetros de Servicio para el Flujo en Intersecciones de Calles Urbanas

La demora de control es la medida de servicio del automóvil para las intersecciones de calles urbanas.

La medida de servicio para el modo automóvil en todas las intersecciones de calles urbanas, incluidas las intersecciones señalizadas, las intersecciones con todos los accesos controlados por señales de PARE, las intersecciones con dos accesos controladas por señal de PARE, es la demora de control.

El retardo de control es una medida del malestar, la frustración, el consumo de combustible y el aumento del tiempo de viaje del conductor. Depende de una serie de variables, que son diferentes dependiendo de si la intersección está señalizada o no señalizada. A medida que aumenta el retraso en el control, los problemas empeoran. El retardo de control máximo permitido para un NDS dado en las intersecciones no semaforizada es menor que para las intersecciones semaforizadas debido a las diferentes expectativas del conductor. La expectativa de los conductores es que una intersección semaforizada esté diseñada para transportar mayores volúmenes de tráfico y experimentar un retraso mayor que una intersección no semaforizada.

2.2.14.15.1 Medidas de Desempeño para Intersecciones Urbanas

Las siguientes son medidas de desempeño clave que se utilizan para evaluar la operación de vehículos motorizados en carreteras de flujo interrumpido:

- La demora de control: Es la demora en la que se incurre debido a la presencia de un dispositivo de control de tráfico. Incluye la demora asociada con la desaceleración de los vehículos antes de una intersección, el tiempo empleado en detenerse en la aproximación, el tiempo empleado para que los vehículos se muevan a través de una cola y el tiempo necesario para que los vehículos aceleren a su velocidad deseada una vez a través de la intersección.

- La velocidad: Refleja la rapidez con que los conductores pueden atravesar una sección de la calzada, incluidos los efectos de los dispositivos de control de tránsito, los retrasos debidos al giro de los vehículos en las intersecciones y las calzadas, y las demandas de tráfico en la calzada.

- La cantidad de paradas: Refleja la frecuencia con la que los automovilistas deben detenerse mientras viajan por una calle urbana debido al control de tráfico, los vehículos que giran, los cruces de peatones a mitad de cuadra y factores similares.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- La longitud de la cola: Refleja hasta qué punto el tráfico retrocede como resultado del control de tráfico (por ejemplo, una cola de una señal de tráfico) o un vehículo detenido en el carril de viaje mientras espera para hacer un giro. La puesta en cola es tanto una medida operativa importante como una consideración de diseño: las colas que son más largas que la longitud de almacenamiento disponible pueden crear varios tipos de problemas operativos.

- La proporción de volumen a capacidad (v/c): Refleja qué tan cerca está funcionando una intersección a su capacidad. Por definición, el volumen de tráfico que usa una intersección no puede exceder la capacidad de la intersección. Por lo tanto, la relación v/c es en realidad una relación demanda/capacidad (d/c). Sin embargo, la relación v/c es el término usado históricamente. Una relación v/c que excede de 1.00 indica que más vehículos exigen usar una intersección de la que se puede acomodar. Los volúmenes observados representan solo el número de vehículos que pueden pasar por una parte de la intersección en las condiciones existentes; estos volúmenes pueden verse limitados por cuellos de botella en otros lugares a lo largo de las calles urbanas. En contraste, los volúmenes de demanda representan el número de vehículos que se observarían en ausencia de cuellos de botella. Los análisis que no toman en cuenta los volúmenes de demanda pueden dar como resultado un pronóstico de mejores condiciones futuras de lo que realmente ocurriría.

2.2.15 Highway Capacity Manual 2010

El "Highway Capacity Manual" (HCM) es la principal publicación de la Junta de Investigación de Transporte con sus siglas en inglés (TRB) de las Academias Nacionales de Ciencia e Ingeniería. Se ha convertido en el documento técnico más importante utilizado en EE. UU. Y en otras naciones como guía para el análisis de la capacidad de las autopistas y la calidad del servicio. Su uso es obligatorio en los EE. UU. Para todos los proyectos de autopistas federales. El Comité sobre Capacidad de Carreteras y Calidad de Servicio (HCQSC) de TRB crea y mantiene el manual.

2.2.15.1 Historia del HCM Según Roess y Prassas (2013)

2.2.15.1.1 Primera Edición del Highway Capacity de 1950

La primera edición del Highway Capacity Manual se publicó en 1950. En realidad, se publicó por primera vez en 1949 como una serie de artículos en la revista Public Roads. Fue publicado en esta forma primero ante la insistencia de Thomas H. MacDonald, jefe de la Oficina de

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Caminos Públicos, debido a las abrumadoras contribuciones del personal de la agencia al esfuerzo. Luego fue publicado como un documento único conjuntamente por la Oficina y la Junta de Investigación de Autopistas. Aunque solo tenía 147 páginas, la primera edición de HCM proporcionó un conjunto de metodologías estándar para la estimación de la capacidad de una variedad de instalaciones de tráfico comunes. Los tipos de instalaciones cubiertos por el manual se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10. Tipos de instalaciones cubiertas en el Manual de capacidad de autopista de 1950

Autopistas de dos carriles y dos vías	**Intersecciones señalizadas**
Autopistas de tres carriles y dos vías	Secciones de tejido
Autopistas de varios carriles	Rampas
	Terminales de rampa

Fuente: The Highway Capacity Manual: A conceptual and Research History, 2014. Adaptación Propia.

2.2.15.1.2 Segunda Edición del Highway Capacity de 1965

El HCM de 1965 proporcionó una gran cantidad de material nuevo. El concepto de nivel servicio fue implementado. Las autopistas fueron tratadas como una categoría separada, basada en un amplio conocimiento nuevo sobre las operaciones de autopistas. Se introdujo nuevo material sobre intersecciones señalizadas, arterias y calles del centro.El material sobre tejido y rampas fue ampliamente actualizado. Se agregó un nuevo capítulo sobre el tránsito de autobuses. La siguiente tabla muestra los tipos de instalaciones cubiertas en 1965:

Tabla 11. Tipos de instalaciones cubiertas en el Manual de Capacidad de Autopistas de 1965

Autopistas	Intersecciones at-Grade
Autopistas de varios carriles	Secciones de tejido
Autopistas de varios carriles	Rampas
Autopistas de dos carriles y dos vías	Terminales de rampa
Autopistas de tres carriles y dos vías	Tránsito de autobuses
Arteriales	
Calles del centro	

Fuente: The Highway Capacity Manual: A conceptual and Research History, 2014. Adaptación Propia.

2.2.15.1.3 Tercera Edición del Highway Capacity de 1985

El Manual de Capacidad de Carreteras de 1985 abrió nuevos caminos de varias maneras significativas:

1. Fue el primer manual desarrollado con la asistencia de un contratista financiado que utiliza materiales desarrollados principalmente por agencias de investigación financiadas.

2. Fue el primer manual publicado en un formato de hojas sueltas, con la expectativa inicial de que las actualizaciones serían frecuentes, y que los cambios podrían hacerse página por página.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

3. Fue el primer manual que contenía metodologías que eran un tanto difíciles de implementar manualmente y consumían mucho tiempo. El paquete Highway Capacity Software (HCS) se desarrolló posteriormente con financiamiento de FHWA para aliviar la carga computacional de varios de los procedimientos, más críticamente, la metodología para las intersecciones señalizadas.

4. Fue el último manual donde todos los miembros de HCQSC revisaron todos los capítulos y todas las metodologías, y tenían un conocimiento profundo de todos sus contenidos. En 506 páginas, fue el último manual que tuvo una duración que incluso podría ser concebiblemente revisada y entendida por cada miembro individual del Comité.

La siguiente tabla enumera los tipos de instalaciones cubiertos en el HCM de 1985, junto con una notación de la relación entre las metodologías del nuevo manual con la versión de 1965:

Tabla 12. Tipos de instalaciones cubiertos en el HCM de 1985

Tipo de instalación	Relación con la Metodología HCM de 1965
Segmentos básicos de autopista	Revisiones principales
Zonas de tejido	Nueva metodología
Rampas y terminales de rampa	Revisiones menores
Sistemas de autopistas	Nuevo material
Autopistas rurales y suburbanas de varios carriles	Revisiones menores
Autopistas de dos carriles	Nueva metodología
Intersecciones señalizadas	Nueva metodología
Intersecciones no señalizadas	Principales revisiones y actualizaciones
Arteriales urbanos y suburbanos	Nueva metodología
Tránsito	Principales revisiones y actualizaciones
Peatones	Nueva metodología
Bicicletas	Nuevo material

Fuente: The Highway Capacity Manual: A conceptual and Research History, 2014. Adaptación Propia.

2.2.15.1.4 Cuarta Edicion del Highway Capacity del 2000

El 2000 HCM era muy diferente de cualquiera de sus predecesores. Fue escrito con una visión mucho más amplia de usuarios potenciales en mente. Además de los analistas y diseñadores operativos, la planificación del uso del manual y sus metodologías había aumentado enormemente, y la adaptación de muchos procedimientos para el uso de planificación se incluyó en la cuarta edición. Al mismo tiempo, el manual se amplió para proporcionar al menos una cobertura general de la evaluación de múltiples instalaciones, corredores y sistemas. Estos temas fueron tratados en términos más o menos generales, pero se incluyeron algunos procedimientos analíticos. El 2000 HCM también trató directamente el tema de los paquetes de simulación y simulación, y cómo su uso podría complementar y / o complementar las metodologías de HCM. La cuarta edición de HCM aumentó a más de 1.100 páginas y presentó un nuevo formato de presentación que incluye notas marginales.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

El manual también incluía un CD-ROM que incluía no solo el texto completo del documento HCM, sino también componentes multimedia que incluían enlaces de hipertexto, clips de video y audio, y tutoriales animados y problemas de muestra. La estrecha coordinación entre el Comité y los desarrolladores de software aseguraron que el HCS y otros productos estuvieron disponibles en una proximidad relativamente cercana a la publicación del manual en sí.

De particular interés, el HCM 2000 introdujo una nueva metodología importante para el análisis de instalaciones de autopistas que contienen segmentos básicos de autopistas y tejidos, así como cruces de rampas. La nueva metodología era bastante compleja y prácticamente imposible de implementar mediante cálculos manuales. Desafortunadamente, no se desarrolló ningún software fácil de usar para esta metodología, que la comunidad de usuarios ignoró en su mayoría. Una vez más, la importancia de tener un software utilizable para implementar métodos computacionales complejos fue martillada.

La siguiente tabla muestra los tipos de instalaciones cubiertas en el HCM 2000, así como la fecha de la última revisión significativa del material:

Tabla 13. Tipos de instalaciones cubiertas en el 2000 HCM

Tipo de instalación	Última actualización significativa
Calles urbanas (arterias urbanas y calles del centro)	1997
Intersecciones señalizadas	1997
Intersecciones no señalizadas	1997
Peatones	1985
Bicicletas	1985
Autopistas de dos carriles	1985
Autopistas de varios carriles	1994
Instalaciones de autopistas	Nueva metodología
Segmentos básicos de autopista	1997
Segmentos de tejido de la autopista sin peaje	1985
Rampas y rampas de unión	1994
Terminales de rampa de intercambio	Nueva metodología
Tránsito	1997
Múltiples instalaciones	Nueva metodología
Análisis de Corredor	Nueva metodología
Análisis de área completa	Nueva metodología

Fuente: The Highway Capacity Manual: A conceptual and Research History, 2014. Adaptación Propia.

2.2.15.1.5 Quinta Edición del Highway Capacity del 2010

El 2010 HCM fue lanzado en un formato radicalmente diferente de cualquiera de sus predecesores. El manual incluye cuatro volúmenes separados, de los cuales solo tres están disponibles en forma impresa. Los primeros tres volúmenes están en carpetas separadas para hojas sueltas, y el cuarto está disponible solo electrónicamente en www.HCM2010.org. Solo los compradores de los volúmenes de impresión tienen acceso a la parte electrónica del manual.

La Parte 1, Conceptos, se ha ampliado considerablemente con respecto a HCM 2010. Mueve material sobre modelos alternativos y su uso de la Parte IV del HCM 2000, y lo expande con

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

nuevas investigaciones en la Parte 1. Además, parte del material conceptual en el 2000 HCM se había localizado originalmente con los capítulos metodológicos. Se consideró que la separación de los conceptos específicos de cada capítulo de las metodologías mismas no producía un flujo de información más efectivo. Por lo tanto, cualquier material conceptual específico de una metodología se retiró a los capítulos de la Metodología 2.

Las Partes 2 y 3, Flujo ininterrumpido y Flujo interrumpido respectivamente, contienen todos los capítulos metodológicos tradicionales del HCM. Ampliamente ampliado, y con más énfasis en el análisis multimodal, las metodologías ahora están organizadas por tipo de instalación.

La siguiente tabla resume el contenido de los cuatro volúmenes del HCM 2010 (siguiente página).

Tabla 14. Contenido del Manual de Capacidad de Carreteras 2010

Volumen	Contenido
Volumen 1: Conceptos	Capítulo 1: Guía del usuario de HCM Capítulo 2: Aplicaciones Capítulo 3: Características Modal Capítulo 4: Conceptos de flujo de tráfico y capacidad Capítulo 5: Conceptos de calidad y nivel de servicio Capítulo 6: HCM y herramientas de análisis alternativo Capítulo 7: Interpretación de HCM y resultados de herramientas alternativas Capítulo 8: Cartilla de HCM Capítulo 9: Glosario y símbolos
Volumen 2: Flujo ininterrumpido	Capítulo 10: Instalaciones de autopistas Capítulo 11: Segmentos básicos de autopista Capítulo 12: Segmentos de tejido de autopistas Capítulo 13: Combinación de autopistas y segmentos divergentes Capítulo 14: Autopistas de varios carriles Capítulo 15: Autopistas de dos carriles
Volumen 3: Flujo interrumpido	Capítulo 16: Instalaciones Urban Street Capítulo 17: Segmentos de calles urbanas Capítulo 18: Intersecciones señalizadas Capítulo 19: Intersecciones de TWSC Capítulo 20: Intersecciones AWSC Capítulo 21: Rotondas Capítulo 22: Terminales de rampa de intercambio Capítulo 23: Instalaciones para peatones y bicicletas fuera de la calle
Volumen 4: Guía de aplicaciones	Capítulo 24: Conceptos: Materiales suplementarios Capítulo 25: Instalaciones de autopistas: Materiales suplementarios Capítulo 26: Autopistas y segmentos de autopistas: Materiales complementarios Capítulo 27: Tejido de la autopista: materiales suplementarios Capítulo 28: Fusiones y divergencias de autopistas: Materiales complementarios Capítulo 29: Instalaciones Urban Street: Materiales suplementarios Capítulo 30: Segmentos urbanos de la calle: Materiales suplementarios Capítulo 31: Intersecciones señalizadas: Materiales suplementarios Capítulo 32: Intersecciones controladas por STOP: Materiales suplementarios Capítulo 33: Rotondas: Materiales suplementarios Capítulo 34: Terminales de rampa de intercambio: materiales suplementarios Capítulo 35: Gestión activa del tráfico Interpretaciones Estudios de caso Biblioteca de referencia técnica

Fuente: The Highway Capacity Manual: A conceptual and Research History, 2014. Adaptación Propia.

Hay una serie de cambios significativos en el formato de presentación de la Parte 3, Flujo interrumpido. Las arterias y las calles del centro se conocen ahora simplemente como "calles

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

urbanas" sin diferenciación. Las metodologías de análisis ahora se dividen en capítulos separados, uno que trata las "instalaciones urbanas de la calle" y los otros "segmentos urbanos de la calle". Los segmentos se refieren a una intersección señalizada y el segmento de aproximación adyacente, mientras que las instalaciones se refieren a una secuencia de varios segmentos con múltiples intersecciones señalizadas. En el capítulo de intersección señalizada, el foco está ahora en los sistemas de señal accionados. De hecho, el análisis de las señales prefijadas ahora solo es posible al ingresar datos que fuerzan a una señal actuada a funcionar en un tiempo fijo.

La Parte 4, Guía de aplicaciones, ha proporcionado un medio para expandir en gran medida la disponibilidad de información para los usuarios manuales. Para cada metodología, hay un capítulo en la Parte 4 que contiene material complementario. El material suplementario más crítico se relaciona con los detalles computacionales necesarios para que los desarrolladores de software implementen adecuadamente las metodologías de las Partes 2 y 3. En algunos casos complejos, este material incluye hojas de cálculo o código ejecutable, donde los detalles necesarios para los desarrolladores de software no pueden ser comunicados eficientemente. Inglés.

Los materiales complementarios también incluyen detalles de investigación que no son necesarios para describir la metodología, pero que pueden ser de interés para algunos usuarios.

La Parte 4 también contiene otra información valiosa. Los estudios de caso que forman la base principal de la Guía de aplicaciones del Manual de capacidad de autopista se incluyen aquí, en forma actualizada. También se incluye un resumen actual de las interpretaciones oficiales de HCQSC. Estos son el resultado de los numerosos comentarios y preguntas de los usuarios presentados al Comité para su interpretación formal. Quizás el aspecto más significativo de la Parte 4 es la inclusión de una biblioteca de referencia técnica.

2.2.15.2 Transportation Research Board

Según TBR (2010), la Transportation Research Board (La Junta de Investigación de Transporte) es una de las seis principales divisiones del National Research Council (Consejo Nacional de Investigación). La misión de la Junta de Investigación de Transporte es proporcionar innovación y progreso en el ámbito del liderazgo a través de un intercambio de información de investigación, realizado en un entorno objetivo, interdisciplinario y multimodal. Las variadas actividades de la Junta involucran anualmente a unos 7.000 ingenieros, científicos y otros investigadores y profesionales del transporte de los sectores público y privado y la academia,

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

quienes contribuyen con su experiencia en el interés público. El programa cuenta con el apoyo de los departamentos de transporte estatales, las agencias federales, incluidas las administraciones que componen el Departamento de Transporte de EE. UU. Y otras organizaciones e individuos interesados en el desarrollo del transporte.

2.2.16 Semaforización

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018) los semáforos son dispositivos electromagnéticos y electrónicos proyectados específicamente para facilitar el control del tránsito de vehículos y peatones, mediante indicaciones visuales de luces de colores universalmente aceptados, como lo son el verde, el amarillo y el rojo. Su finalidad principal es la de permitir el paso, alternadamente a las corrientes de transito que se cruzan, permitiendo el uso ordenado y seguro del espacio disponible.

En una intersección, el flujo total de vehículos que llega a cada uno de sus accesos debe ser dividido en diferentes *fases* de movimiento, en cada una de las cuales se efectúa un desplazamiento especifico de vehículos. Ciertos movimientos reciben el derecho al uso del espacio por medio de una señal *verde* o de siga, mientras que otros son detenidos con una señal de *rojo* o de alto.

Así mismo Bañón y Bévia (2000) indica que los semáforos son los elementos reguladores del tráfico por excelencia en las zonas urbanas, aunque su uso puede llegar a hacerse necesario en carreteras, especialmente intersecciones próximas núcleos de población. En cada uno de los accesos a la intersección se coloca al menos un semáforo, en cuya cabeza aparecen tres luces; roja, ámbar y verde que se encienden sucesiva y ordenadamente.

2.2.16.1 Términos Básicos

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018) tenemos la siguiente terminología:

- Indicación de señal: Es el encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de varias luces al mismo tiempo.
- Ciclo o longitud de ciclo: Es el tiempo necesario para que el disco indicador del semáforo efectué una revolución completa. En otras palabras, es el tiempo requerido para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
- Movimiento: Es la maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Intervalo: Es cualquiera de las diversas divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones de señal del semáforo.
- Fase: Parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos simultáneos. Una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que lo ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso en el momento de aparecer la indicación amarilla.
- Secuencia de Fases: Es el orden predeterminado en el que ocurren las fases del ciclo.
- Reparto: Es el porcentaje de la longitud del ciclo asignado a cada una de las diversas fases.
- Intervalo verde: Es el intervalo de derecho de paso durante el cual la indicación de la señal es verde.
- Intervalo de cambio: Es el tiempo de exposición de la indicación amarilla del semáforo que sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.
- Intervalo de despeje o todo rojo: Es el tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara entrar a la intersección. Es utilizado en la fase qie recibe el derecho de paso después del amarillo de la fase que lo pierde, con el fin de dar un tiempo adicional que permita a los vehículos que pierden el derecho de paso, despejar la intersección antes de que los vehículos que lo ganan reciban el verde. Se aplica sobre todo en aquellas intersecciones que sean excesivamente anchas. También puede ser utilizado para crear una fase exclusiva para peatones.
- Intervalos de cambio de fase: Es el intervalo que puede consistir en solamente un intervalo de cambio amarillo o que puede incluir un intervalo adicional de despeje todo rojo. También se conoce como *entre verde* o *intermedio*.

2.2.16.2 Cálculo de Tiempos Semafóricos

Según Cal y Mayor y Cárdenas (2018) para obtener un mínimo de demoras, cada fase debe incluir el mayor número posible de movimientos simultáneos. Así se logrará admitir un mayor

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

volumen de vehículos en la intersección. Este debe ser un objetivo permanente que no debe olvidarse.

En general, el número de fases diferentes debe reducirse al mínimo, considerando la seguridad y la eficiencia.

La selección de los movimientos dentro de cada fase debe tener a reducir a un mínimo la frecuencia y gravedad de los puntos de conflicto. Igualmente, la secuencia de las fases debe tratar de reducir las demoras.

Una fase consta de un intervalo amarillo, un todo rojo y un verde. Las siguientes figuras muestran una intersección de cuatro accesos operada con un semáforo de dos fases. En ellas se observan también en forma esquemática los conceptos de longitud de ciclo, intervalos y fases.

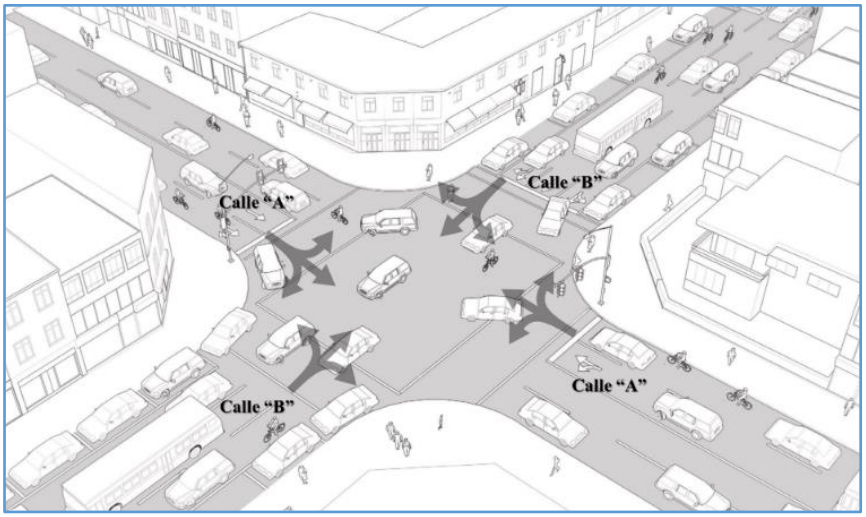


Figura 69. Intersección Semaforizada con Cuatro Accesos.

Fuente: Global Street Design Guide: Designing Cities Initiative, (NACTO, 2016). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

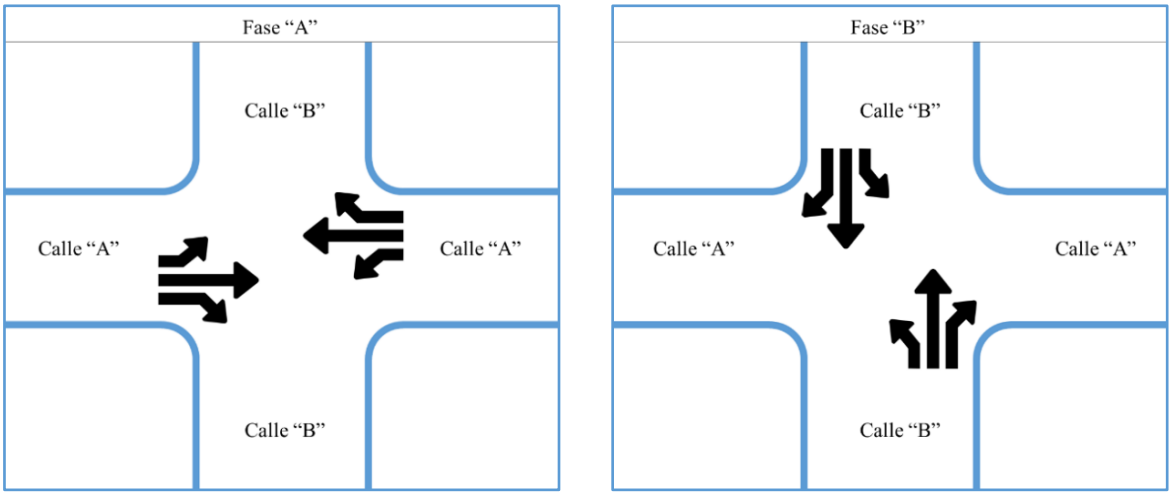


Figura 70. Fases de la Intersección Semaforizada con Cuatro Accesos.

Fuente: Elaboración Propia.

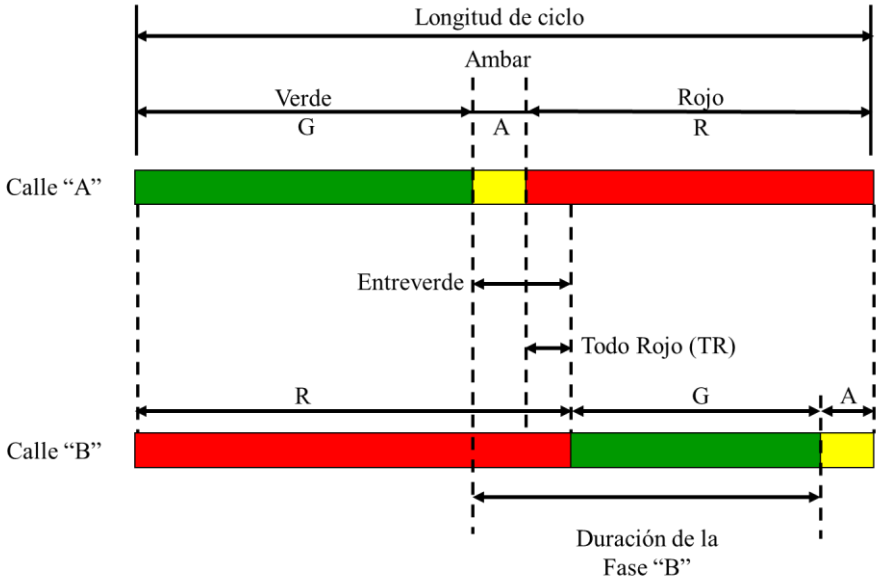


Figura 71. Diagrama de Fases Semafóricas.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Adaptación Propia.

La distribución de tiempo en cada fase debe estar en relación directa con los volúmenes de tránsito de los movimientos correspondientes. En otras palabras, la duración de cada fase del ciclo dependerá de la demanda vehicular.

Si los intervalos entre los vehículos que entran a una intersección durante la hora de máxima demanda son aproximadamente iguales en los carriles críticos de las calles que se interceptan, la subdivisión del tiempo total del ciclo con indicación de verde será aproximadamente correcta si los lapsos correspondientes a cada calle se hacen directamente proporcionales a los volúmenes de tránsito en los carriles críticos.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.16.2.1 Intervalo de Cambio de Fase

La función principal del intervalo de cambio de fase es la de alertar a los usuarios de un cambio en la asignación del derecho al uso de la intersección.

Para calcular el intervalo de cambio de fase que considere el tiempo de percepción – reacción del conductor, los requerimientos de la desaceleración y el tiempo necesario de despeje de la intersección.

$$Intervalo\ de\ cambio\ de\ Fase = Amarillo + Todo\ Rojo$$

$$y = \left(t + \frac{v}{2a}\right) + \left(\frac{w + W + L}{v}\right)$$

Fórmula 22. Intervalo de Cambio de Fase.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

y: Intervalo de cambio de fase amarillo más todo rojo (s).

t: Tiempo de percepción – reacción del conductor (usualmente 1s).

v: Velocidad de aproximación de los vehículos (m/s).

a: Tasa de desaceleración (valor usual 3.05 (m/s^2).

w: Ancho del cruce peatonal (m).

W: Ancho de la intersección a cruzar (m).

L: Longitud del vehículo (valor típico 6.10m).

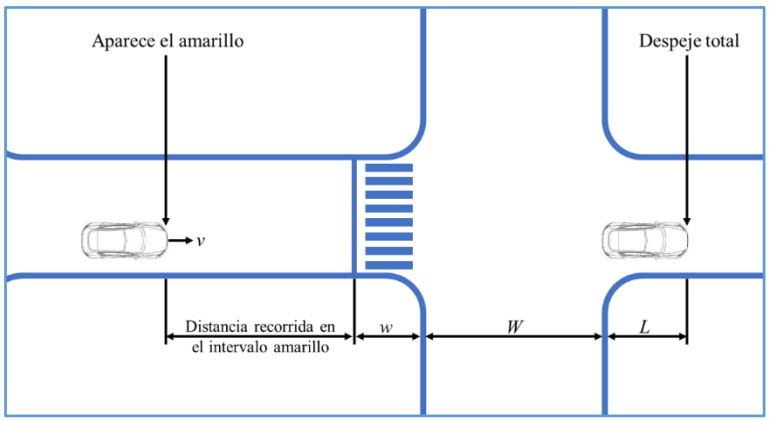


Figura 72. Intervalo de Cambio de Fase.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Adaptación Propia.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

En la Formula 21 y en la Figura 68, el termino $\frac{v}{2a}$ representa el tiempo necesario para recorrer la distancia de parada con desaceleración a y velocidad v, y el término $\frac{(w+W+L)}{v}$ es el tiempo para cruzar la intersección. Los dos primeros términos, $t+\frac{v}{2a}$, identifican el *intervalo de cambio amarillo* y el tercer término $\frac{(w+W+L)}{v}$ se asocia al *intervalo de despeje todo rojo.* Con respecto a la velocidad de aproximación v, se utiliza la velocidad límite prevaleciente o el percentil 85 de la velocidad (P_{85}).

2.2.16.2.2 Longitud del Ciclo

Con base en observaciones de campo y simulaciones de un amplio rango de condiciones de tránsito, se demostró que la demora mínima de todos los vehículos en una intersección con semáforos se puede obtener para una longitud de *ciclo óptimo* de:

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\varphi} Y_i}$$

Fórmula 23. Tiempo Óptimo de Ciclo.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

C_0: Tiempo óptimo de ciclo (s).

L: Tiempo total perdido por ciclo (s).

Y_i: Máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso o movimiento o carril crítico de la fase i.

φ: Número de fases.

El intervalo de valores aceptables para la longitud de un ciclo determinado esta entre el 75% y el 150% del ciclo óptimo, para el cual las demoras nunca serán mayores en más del 10% al 20% de la demora mínima.

2.2.16.2.3 Vehículos Equivalentes

Si todos los vehículos que salen de una intersección con semáforos son automóviles que continúan de frente, se tendrían las tasas máximas de flujo a intervalos aproximadamente iguales. Sin embargo, en la mayoría de los casos la situación es más compleja por la presencia de vehículos pesados y movimiento de vueltas hacia la izquierda y hacia la derecha. Para tener

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

en cuenta estos aspectos es necesario introducir *factores de equivalencia.* El factor de ajuste por efecto de *vehículos pesados* se calcula así:

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

Fórmula 24. Factor de Ajuste por Efecto de Vehículos Pesados.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

f_{HV}: Factor de ajuste por efecto de vehículos pesados.

P_T: Porcentaje de camiones en la corriente vehicular.

P_B: Porcentaje de autobuses en la corriente vehicular.

P_R: Porcentaje de vehículos recreativos en la corriente vehicular.

E_T: Automóviles equivalentes a un camión.

E_B: Automóviles equivalentes a un autobús.

E_R: Automóviles equivalentes a un vehículo recreativo.

Los vehículos pesados o comerciales (camiones y autobuses), por su mayor longitud y menor poder de aceleración que los automóviles, necesitan más tiempo para despejar la intersección. Los *automóviles equivalentes* comúnmente utilizados tanto para camiones (E_B) varían de 1.4 a 1.6, tomándose un valor medido de 1.5 que supone accesos con pendientes cercanas al 0% y predominio de camiones livianos o medianos. Sin embargo, estos valores pueden ser mayores, como lo informa un estudio realizado para la ciudad de México, en el que se utilizaron 2.0 automóviles equivalentes por un autobús y un camión respectivamente, y 3.5 automóviles equivalentes por un camión con remolque. Para intersecciones, la metodología del HCM 2010 utiliza 2.0 automóviles equivalentes para vehículos pesados.

Por otra parte, se requiere tener factores por *movimientos de vuelta*, puesto que en estas maniobras los vehículos generalmente consumen mayor tiempo que los vehículos que siguen de frente. Estos factores que se utilizan para convertir automóviles que dan vuelta a *automóviles directos equivalentes* (ADE) varían de acuerdo con los valores mostrados en las tablas siguientes para vueltas hacia la izquierda (E_{VI}) y vueltas hacia la derecha (E_{VD}).

Tabla 15. Automóviles Directos Equivalentes para Vueltas Hacia la Izquierda (E_{VI}).

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Flujo opuesto (veh/h)	Numero de carriles opuestos		
	1	2	3
0	1.1	1.1	1.1
200	2.5	2.0	1.8
400.00	5.0	3.0	2.5
600	10.0	5.0	4.0
800	13.0	8.0	6.0
1000	15.0	13.0	10.0
≥ 1201	15.0	15.0	15.0
Para vueltas protegidas: EVI = 1.05			

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Tabla 16. Automóviles Directos Equivalentes para Vueltas Hacia la Derecha (E_{VD}).

Volumen peatonal en el cruce peatonal en conflicto (pet/h)	Equivalente
Ninguno (0)	1.18
Bajo (50)	1.21
Moderado (200)	1.32
Alto (400)	1.52
Extremo (800)	2.14

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Igualmente, los volúmenes horarios de máxima demanda VHMD deben ser convertidos a tasas de flujo (q) a través del factor de hora pico FHP o también llamado factor de la hora de máxima demanda FHMD para el cual en casos de proyecto y diseño de planes de tiempos del semáforo se sugiere un valor de 0.95.

De esta manera los *volúmenes horarios mixtos* VHMD se convierten a *flujos de automóviles directos equivalentes por hora* (q_{AD}) mediante la siguiente formula.

$$q_{AD} = \frac{VHMD}{FHMD}\left(\frac{1}{f_{HV}}\right)\left(E_{V(I\ ó\ D)}\right)$$

Fórmula 25. Factor de Ajuste por Efecto de Vehículos Pesados.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

Donde:

q_{AD}: Flujo de automóviles directos equivalentes por hora (veh-eq/h).

$VHMD$: Volumen horario de máxima demanda.

$FHMD$: Factor horario de máxima demanda.

f_{HV}: Factor de ajuste por efecto de vehículos pesados.

$E_{V\ (I\ ó\ D)}$: Automóviles directos equivalentes para vueltas a la izquierda o derecha.

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

2.2.16.2.4 Flujo de Saturación y Tiempo Perdido

Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos que cruzan la línea de ALTO se incrementa rápidamente a una tasa llamada *flujo de saturación* S, la cual permanece constante hasta que la fila de vehículos se disipa o hasta que termina el verde. La tasa de vehículos que cruzan la línea al arrancar es menor durante los primeros segundos, mientras los vehículos aceleran hasta alcanzar una velocidad de marcha normal. Similarmente, durante el periodo posterior a la terminación del verde, la tasa de vehículos que cruzan la línea es menor debido a que algunos vehículos disminuyen su velocidad o se detienen.

El flujo de saturación es la tasa máxima de vehículos que cruzan la línea, que puede ser obtenida, cuando existen filas y estas aún persisten hasta el final del periodo verde. En este caso, se tiene un periodo de verde completamente saturado. En la ciudad de México se han encontrado flujos de saturación del orden de los 1 800 vehículos ligeros por hora de luz verde por carril. La figura 69 muestra las relaciones fundamentales que caracterizan este fenómeno.

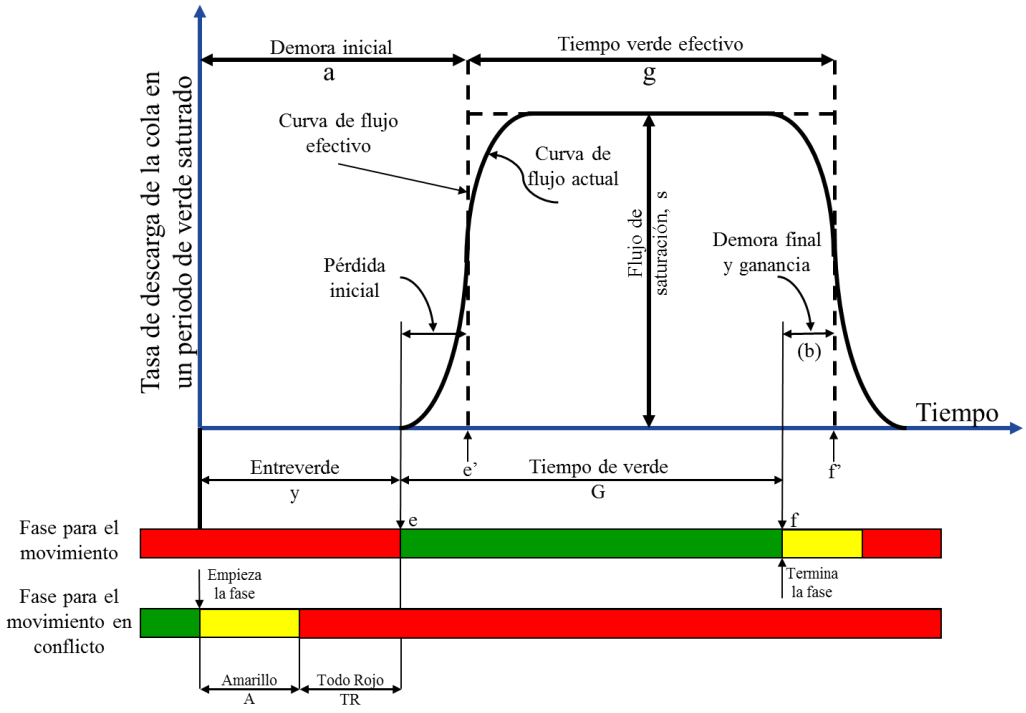


Figura 73. Modelo Básico del Flujo de Saturación.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

La línea punteada indica el modelo básico o curva de *flujo efectivo*, que reemplaza la curva de curva de *flujo actual* de vehículos que cruzan la línea, por un rectángulo de igual área, cura altura es el *flujo de saturación S* y cuyo ancho es el *tiempo verde efectivo g*. En otras palabras,

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

el área bajo la curva (*sg)* representa el máximo número de vehículos que cruzan la línea en un ciclo promedio.

El tiempo entre los comienzos de los periodos de *verde G* y *verde efectivo g*, esto es ee', se considera como una *pérdida inicial.* Igualmente, el tiempo entre los finales de los periodos de verde y verde efectivo *(ff')* se considera como una *ganancia final.* Por lo tanto, el verde efectivo para la fase *í* es:

$$g_i = G_i + ff' - ee'$$

Fórmula 26. Verde Efectivo.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

Donde:

g_i: Verde efectivo (s).

G_i: Tiempo de verde (s).

ff': Ganancia final (s).

ee': Pérdida inicial (s).

La *demora inicial a*, se define como la suma del tiempo entreverde o intervalo de cambio de fase y_i y la perdida inicial ee':

$$a = y_i + ee'$$

Fórmula 27. Verde Efectivo.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

Donde:

a: Demora inicial (s).

y_i: Intervalo de cambio de fase o entreverde (s).

ee': Pérdida inicial (s).

La *demora final b*, se define simplemente como la ganancia final ff':

$$b = ff'$$

Fórmula 28. Demora Final.

Entonces el tiempo perdido por la *fase* I_i es la diferencia entre la demora inicial y la ganancia final:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

$$I_i = a - b$$

$$I_i = y_i + ee' - ff'$$

Fórmula 29. Tiempo Perdido por la Fase I_i.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

Despejando de la Fórmula 25:

$$ff' - ee' = G_i - g_i$$

Reemplazando en Fórmula 25:

$$I_i = y_i + G_i - g_i$$

Fórmula 30. Tiempo Perdido Por la Fase I_i en Términos de y_i, G_i y g_i.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

Por lo general el intervalo de cambio de fase y_i de una fase i es igual al intervalo amarillo A_i más intervalo todo rojo TR_i:

$$y_i = A_i + TR_i$$

Por lo tanto, la Fórmula 29 se transforma en:

$$I_i = A_i + TR_i + G_i - g_i$$

Fórmula 31. Tiempo Perdido por la Fase I_i Modificada.

Si se supone que la perdida inicial ee', es igual a la ganancia final ff', entonces:

$$g_i = G_i$$

$$I_i = y_i = A_i + TR_i$$

Entonces, el *tiempo total perdido por el ciclo L* es:

$$L = \sum_{i=1}^{\varphi} (A_i + TR_i)$$

Fórmula 32. Tiempo Total Perdido por el Ciclo L.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

2.2.16.2.5 Asignación de Tiempos

El *tiempo verde efectivo total* g_T, disponible por el ciclo para todos los accesos de la intersección, está dado por:

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

$$g_T = C - L = C - \left[\sum_{i=1}^{\varphi}(A_i + TR_i)\right]$$

Fórmula 33. Tiempo Verde Efectivo Total.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

Donde:

g_T: Tiempo verde efectico total (s).

C: Longitud actual de ciclo (redondeando C_0 a los 5s más cercanos) (s).

Para obtener una demora total mínima en la intersección, el tiempo verde efectivo total g_T debe distribuirse entre las diferentes fases en proporción a sus valores de y_i:

$$g_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^{\varphi} y_i}(g_T) = \frac{y_i}{y_1 + y_2 + \cdots + y_\varphi}(g_T)$$

Recuérdese que y_i es el valor máximo de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación, para el acceso o movimiento o carril crítico de cada fase i.

De la Fórmula 30, el tiempo *verde real* G_i para cada fase i se obtiene como:

$$G_i = g_i + I_i - A_i - TR_i$$

Fórmula 34. Tiempo Verde Real.

Fuente: Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones 9a. Edición (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018). Elaboración Propia.

Donde:

G_i: Tiempo verde real (s).

2.3 Hipótesis

2.3.1 Hipótesis General

Con las propuestas de mejora para la operación del tránsito, diseño geométrico y tipología y configuración de las intersecciones se mejorarán los niveles de servicio de las avenidas “Cusco” y “Tomas Tuyro Tupac” del distrito de San Sebastián en la ciudad del Cusco.

2.3.2 Sub Hipótesis

1. La operación del tránsito en las avenidas “Cusco" y "Tomas Tuyro Tupac” del distrito de San Sebastián en la ciudad del Cusco mejorará si segregamos los vehículos pesados,

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

reubicamos los paraderos, retiramos los estacionamientos y optimizamos los intervalos semafóricos.

2. La propuesta del diseño geométrico de las avenidas "Cusco" y “Tomas Tuyro Tupac” del distrito de San Sebastián en la ciudad del Cusco incrementarán la fluidez del tránsito.
3. Las optimizaciones de la tipología y configuración de las intersecciones de las avenidas "Cusco" y “Tomas Tuyro Tupac” del distrito de San Sebastián en la ciudad del Cusco favorecerán a la circulación del tránsito.

2.4 Definición de Variables

2.4.1 Variables Independientes

- Diseño Geométrico

  Son las características dimensionales y físicas de cada elemento que comprende la infraestructura vial y que, a su vez, influyen en la operación de dicha infraestructura.

- Tipología del Control y Configuración de las Intersecciones

  Son las condiciones de la disposición de los accesos y del dispositivo de control, que determinan el funcionamiento de una intersección.

2.4.1.1 Indicadores de las variables Independientes

2.4.1.1.1 Diseño Geométrico

- Tipo de Área
- Número de Carriles
- Ancho Promedio de Carriles.
- Pendiente
- Existencia de Carriles Exclusivos
- Presencia de Estacionamientos
- Presencia de Paraderos Urbanos
- Presencia de Reductores de Velocidad

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

- Longitud de Segmento Urbano
- Ancho de Intersección
- Número de Punto de Acceso
- Proporción de Presencia de Berma Central
- Tipo de Terreno
- Longitud de Tramo
- Longitud de Rebase Restringido
- Densidad de Puntos de Acceso

2.4.1.1.2 Tipología del Control y Configuración de la Intersecciones

- Longitud de Ciclo
- Tiempo Verde
- Tiempo Perdido
- Tipo de Control Semafórico
- Plan de Fases
- Periodo de Análisis
- Sentido del Flujo Vehicular del Acceso
- Grupo de Carriles
- Movimientos
- Prioridad de Movimientos

2.4.2 Variables Dependientes

- Nivel de Servicio

  Es el conjunto de condiciones determinadas con las que funciona el tránsito en un sistema de transporte.

- Operación del Tránsito

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Repositorio Digital de Tesis

Es el conjunto de condiciones establecidas con las que funciona el tránsito en una infraestructura vial.

2.4.2.1 Indicadores de las Variables Dependientes

2.4.2.1.1 Nivel de Servicio

- Demora Media
- Capacidad
- Volumen Vehicular
- Volumen Peatonal
- Porcentaje de Velocidad Base de Flujo Libre
- Tiempo en Movimiento
- Velocidad Media de Viaje
- Porcentaje de Velocidad de Flujo Libre

2.4.2.1.2 Operación del Tránsito

- Volumen de Demanda por Movimiento
- Tasa de Flujo de Saturación Base
- Facto de la Hora Pico
- Porcentaje de Vehículos Pesados
- Tasa de Flujo Peatonal en el Acceso
- Tasa de Parada de Autobús Local
- Actividad de Estacionamiento
- Tipo de Llegada
- Proporción de Vehículos que Llegan al Verde
- Volumen de Demanda por Movimiento por Intersección y Punto de Acceso
- Velocidad Límite

DERECHOS DE AUTOR RESERVADOS