

2.4 Heterogeneidad del tráfico

Al hablar de heterogeneidad del tráfico nos referimos al hecho de que en condiciones reales existen varios tipos de vehículos circulando por las vías de la ciudad, los que además realizan distintos movimientos en cada intersección. El problema de esta situación es que cada uno de estos tipos podría tener un comportamiento distinto al del resto. Obviamente, también podrían exhibir características físicas (longitud) u operacionales (velocidad, tasa de frenado) distintas. Luego, en condiciones reales es poco probable que exista homogeneidad en la circulación y en consecuencia parece más razonable reconocer explícitamente que existe heterogeneidad.

Para incorporar explícitamente la heterogeneidad la estrategia será encontrar factores de equivalencia que permitan traducir corrientes de distintas características en corrientes homogéneas. Ahora bien, es importante mencionar que el patrón de homogeneidad no es único, es decir, estamos hablando de homogeneizar bajo ciertas condiciones.

La unidad de referencia para expresar el flujo será el veq/h por pista o bien el ADE/h por pista.

- veq : corresponde a un auto particular. Su nombre significa Vehículo EQUIvalente.
- ADE : es un veq cuyo movimiento en la intersección es continuar directo (no virar). Su nombre es una abreviación de Auto Directo EQUIvalente.

Estas unidades adquieren ciertos valores básicos de acuerdo con las dimensiones y características mecánicas de los vehículos, factores ambientales y características de los conductores.

El problema de la heterogeneidad se presenta en todas las facetas de la circulación, por lo que puede haber distintos criterios de equivalencia según el fenómeno que se trate. En nuestro caso el criterio es la capacidad, de modo que los factores de equivalencia antes mencionados traducen una corriente heterogénea de vehículos a una homogénea de capacidad equivalente, compuesta por ejemplo sólo de $ADEs$.

La heterogeneidad se debe analizar para cada uno de los modelos de capacidad analizados: aceptación de brechas, lineales y modelo para intersecciones semaforizadas; ya que cada uno de ellos se fundamenta en distintos supuestos sobre homogeneidad en el comportamiento de los vehículos (conductores).

2.4.1 Heterogeneidad en el flujo de saturación

Recordemos que la capacidad de una pista de una rama de una intersección semaforizada es dada por $Q = Su$. La variable u corresponde a la razón de verde efectivo y S al flujo de saturación. La razón de verde efectivo está determinada por la programación del semáforo y para nosotros es un dato. El flujo de saturación es el máximo número de vehículos por unidad de tiempo que salen de la cola durante el período de verde efectivo. Observamos entonces que el flujo de saturación podría ser distinto en distintas condiciones de circulación. Así por ejemplo, si en la cola existe una alta proporción de buses el flujo de saturación expresado en *veh* será menor que si en la cola existieran sólo autos; debido a que las dimensiones de un bus son mayores que las de un auto, a que el bus tiene una menor capacidad de aceleración que el auto, etc.

Para abordar este problema trataremos de encontrar el flujo de saturación a partir de un flujo de saturación elemental o básico más sencillo de calcular y que luego se corrige para encontrar el flujo de saturación real. Se define entonces

Flujo de saturación básico (S_b): tasa de descarga de una cola compuesta sólo por *ADEs* que circulan por una pista utilizada sólo por *ADEs*.

El flujo de saturación básico según estudios realizados recientemente en Santiago varía entre 1.933 y 2.292 *ADE/h – pista*. Las variaciones se producen entre pistas y entre distintos períodos del día, tal como se muestra en la Tabla 2.1.

El flujo de saturación para una corriente real se obtiene a partir del básico, tal como se muestra a continuación:

$$S[\text{veh}/h] = f_k[\text{veh}/\text{ADE}] S_b[\text{ADE}/h] \quad (2.20)$$

Tabla 2.1: Flujo de saturación básico ($ADE/h - pista$)

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

donde f_k es un factor de corrección que recoge las diferencias entre la corriente real y la básica, en relación a tipos de vehículos y/o pistas. Estas diferencias están asociadas a:

- ancho de pista
- vehículos: tipo (composición del flujo); movimientos (virajes, interferencias)

Todos los desarrollos que se muestran a continuación se refieren a una pista, pero para simplificar la notación no se colocará explícitamente esta dimensión en las unidades del flujo.

2.4.1.1 Factores de equivalencia para determinar el flujo de saturación

Factor por ancho de pista

$$f_a = 1 + 0,058(A - 3,0)D_{PE} \quad (2.21)$$

donde A es el ancho de pista en metros y D_{PE} es una variable muda asociada a la ubicación de la pista, vale 1 para pista izquierda o derecha (pista extrema).

Factores asociados a los tipos de vehículos y movimientos

a) Factor por tipo de vehículo

Los factores de equivalencia por tipo de vehículos resultan de comparar la descarga de vehículos de algún tipo con la descarga de un flujo equivalente compuesto sólo por $ADEs$, suponiendo además que no hay virajes, efecto que se analiza después.

Tenemos entonces que bajo estas condiciones el factor de equivalencia para vehículos de tipo i está dado por:

$$f_i = \frac{\beta_i}{\beta_1} [ADE/veh] \quad (2.22)$$

donde β_i es el intervalo promedio de salida a saturación para un vehículo de tipo i , $i = 1$ representa al ADE , nuestra referencia.

Sabemos que para una corriente compuesta sólo de $ADEs$ debe cumplirse $V + \lambda_2 = \lambda_1 + n\beta_1$ o equivalentemente, si se define $T = V + \lambda_2 - \lambda_1$,

$$T = n\beta_1$$

en consecuencia $S_b = n/T = 1/\beta_1$ es el flujo de saturación de dicha corriente.

Si tenemos ahora una corriente heterogénea, se deberá cumplir

$$V + \lambda_2 = \lambda_1 + \sum_i n_i \beta_i$$

o bien $\tilde{T} = \sum_i n_i \beta_i$ donde n_i es el número de vehículos de tipo i que salen de la cola y $\tilde{T} = V + \lambda_2 - \lambda_1$. Utilizando el factor de equivalencia, la ecuación anterior se transforma en $\tilde{T} = \beta_1 \sum_i f_i n_i$. Por lo tanto,

$$S_b = \sum_i f_i \frac{n_i}{\tilde{T}} [ADE/h]$$

Si pensamos ahora en la corriente heterogénea como si ella fuera la de referencia, su flujo de saturación será

$$S = \sum_i \frac{n_i}{\tilde{T}} [veh/h]$$

Resulta entonces

$$\frac{S}{S_b} = \frac{\sum_i n_i / \tilde{T}}{\sum_i f_i n_i / \tilde{T}} = \frac{\sum_i n_i}{\sum_i f_i n_i}$$

dividiendo arriba y abajo por la duración del período de análisis, en este caso C , se llega finalmente al factor de composición del flujo f_c

$$f_c = \frac{\sum_i f_i q_i}{\sum_i q_i} [ADE/veh] \quad (2.23)$$

Tabla 2.2: Factor de equivalencia para *ADM*

%TP	Derecha		Izquierda		Central	
	Mañana	Otro	Mañana	Otro	Mañana	Otro
≤ 48	$\leq 1,119$	$\leq 1,112$	$\leq 1,123$	$\leq 1,115$	$\leq 1,133$	$\leq 1,124$
> 48	1,120	1,113	1,124	1,116	1,134	1,125

Tabla 2.3: Factor de equivalencia para bus

Período	Derecha	Izquierda	Central
Mañana	$1,784f_a$	$1,463f_a$	$1,580f_a$
Otro	$1,678f_a$	$1,373f_a$	$1,476f_a$

o bien $f_c = \sum_i p_i f_i$ donde p_i es la proporción de vehículos de tipo i en el flujo.

Este factor permite transformar el flujo de saturación básico en uno específico para una corriente heterogénea compuesta por distintos tipos de vehículos

$$S(veh/h) = S_b(ADE/h) \frac{1}{f_c} (veh/ADE) \quad (2.24)$$

Nótese que hemos supuesto que los vehículos no viran, de ahí que f_c tenga unidades de ADE/veh ya que si existieran virajes este factor tendría unidades de veh/h .

Un primer tipo de vehículo distinto del *ADE* es el auto directo en una pista donde además circulan buses. Este tipo de vehículo se denomina *ADM* por Auto Directo en pista con tráfico Mixto. Al comparar el intervalo de descarga del *ADM* con el *ADE* se obtiene su factor de equivalencia f_{ADM} . De acuerdo a las mediciones realizadas en Santiago, el factor f_{ADM} depende del porcentaje de transporte público en el flujo de la pista, del período del día y de la ubicación de la pista. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.2. Otro tipo de vehículo distinto del *ADE* es el bus. Nuevamente, al comparar los intervalos de descarga de ambos tipos de vehículos se obtiene el factor de equivalencia. Los valores obtenidos en Santiago son los que aparecen en la Tabla 2.3.

Ahora incorporaremos en el análisis el efecto de los distintos movimientos que realizan los vehículos en la intersección.

b) Factor por tipo de movimiento

i) Viraje sin oposición

Para los virajes sin oposición se ha demostrado empíricamente que el factor de equivalencia está determinado por el radio de giro (r) del movimiento. Este factor tiene unidades de ADE/veg .

$$f_{vs} = \begin{cases} 1 + 1,5/r & r < 10 \\ 1 + 150/r^3 & r \geq 10 \end{cases} \quad (2.25)$$

En esta ecuación el radio de giro se expresa en metros. Los vehículos que siguen directo tienen factor igual a uno, valor que puede obtenerse a partir de la ecuación anterior con $r \rightarrow \infty$. Se tendrá entonces que el factor de equivalencia f_i en este caso está dado por $f_i f_{vs}$. El factor f_i transforma veh a veg , lo denominaremos entonces f_{T_i} , y f_{vs} transforma veg en ADE , lo llamaremos f_{M_i} . En consecuencia, el factor de equivalencia

$$f_i = f_{T_i} f_{M_i} \quad (2.26)$$

transforma el tipo de vehículo-movimiento i a auto directo equivalente ADE . Luego, el factor de composición se transforma en $f_c = \sum_i p_i f_i = \sum_i p_i f_{T_i} f_{M_i}$

En definitiva, se tendrá

$$S = f_k S_b \quad (2.27)$$

$$f_k = f_a / f_c \quad (2.28)$$

ii) Viraje con oposición

Cuando el viraje es con oposición, ya sea vehicular o peatonal, surge un proceso regulado por prioridad al interior de la intersección semaforizada. Los vehículos que intentan virar deben esperar una brecha en el flujo que los interfiere. Para encontrar el factor de equivalencia debemos calcular el flujo de saturación del movimiento con oposición que, tal como se indica, corresponde a la capacidad de un movimiento secundario. Esta capacidad puede obtenerse con un modelo de aceptación de brecha o un modelo lineal.

Al comenzar el verde no es posible pasar pues se está descargando la cola del movimiento opositor formada en el período de rojo. Esta cola se descarga a intervalo mínimo, por lo cual no se puede encontrar una brecha adecuada. Terminada esta etapa empieza la descarga del viraje de forma análoga a un movimiento secundario en una intersección de prioridad. Esta etapa se extiende hasta el final del verde efectivo a tasa equivalente a Q_s . Sin embargo, se observa que al final de esta etapa se produce la descarga de un número pequeño (n_f) de vehículos.

Podemos construir entonces un modelo binario, descomponiendo $V_e + \lambda_1$ en un período de bloqueo (V_b) y un período de descarga por brecha (\tilde{V}_e), es necesario extender este último para considerar n_f . Tenemos entonces un período de verde efectivo corregido V_o dado por:

$$V_o = \tilde{V}_e + \frac{n_f}{Q_s} = V_e + \lambda_1 - V_b + \frac{n_f}{Q_s} \quad (2.29)$$

Por lo tanto, la capacidad para el viraje con oposición será $Q_{vo} = Q_s \frac{V_o}{C}$.

La mayoría de los parámetros que aparecen en el modelo puede considerarse conocidos, la excepción es el tiempo de bloqueo, el cual depende de la duración del período de rojo y de cuántos sean los movimientos opositores. Si comparamos el modelo obtenido con la expresión típica de la capacidad de un movimiento con flujo de saturación \tilde{S} , se tiene

$$\tilde{S} \frac{V_e}{C} = Q_s \frac{V_o}{C} \Leftrightarrow \tilde{S} = Q_s \frac{V_o}{V_e}$$

En consecuencia,

$$\tilde{S} = Q_s \left(1 - \frac{V_b - \lambda_1 - n_f/Q_s}{V_e} \right) \quad (2.30)$$

Por lo tanto, el flujo de saturación depende de la programación del semáforo. Por esta razón no es conveniente en este caso utilizar factores de equivalencia ya que tendrían la misma dependencia, lo que es poco práctico.

2.4.1.2 Duración del verde efectivo

Para encontrar la capacidad es necesario también calcular la duración del verde efectivo. Por esta razón se utilizaron las mediciones que llevaron a

los valores de las Tablas 2.2 y 2.3 para determinar el valor de λ_1 y λ_2 . Sin bien se obtuvieron valores distintos para los diferentes períodos del día y la distintas ubicaciones de la pista, la diferencia $\lambda_1 - \lambda_2$ tiene aproximadamente el mismo valor en todos los casos. El resultado obtenido fue

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 1,4 \quad [seg] \quad (2.31)$$

Esto indica que la duración del verde efectivo es 1,4 seg. menor que el verde del semáforo.

2.4.2 Heterogeneidad en intersecciones no semaforizadas

2.4.2.1 Tipos de vehículos

En el modelo de aceptación de brechas los parámetros que definen el modelo deben ser medidos para cada caso y, por lo tanto, resultarán influenciados por condiciones ambientales y de circulación. No existen factores de equivalencia ya que las brechas se producen, rechazan o aceptan por vehículos reales, no por *veq* o *ADE*.

En el modelo lineal los flujos se miden en *veq/h*, al existir varios tipos de vehículos se deberán utilizar factores de equivalencia análogos a los empleados en intersecciones semaforizadas. En este caso se definen dos tipos de vehículos: livianos y pesados. Luego, para transformar una corriente vehicular heterogénea a una corriente equivalente compuesta sólo por *veq*, se utiliza el siguiente factor de composición del flujo:

$$f_c = \frac{q_{vl} + 2q_{vp}}{q_{vl} + q_{vp}} [veq/veh]$$

donde q_{vl} y q_{vp} es el flujo de vehículos livianos y pesados, respectivamente.

2.4.2.2 Tipo de movimiento

La heterogeneidad por movimientos se trata estimando la capacidad de cada uno utilizando parámetros específicos y luego combinando los resultados. Si

se trata de una rotonda no existe heterogeneidad de este tipo ya que en una rotonda existe sólo un movimiento posible en cada acceso.

Supongamos entonces una cola heterogénea con n_i vehículos que realizan el movimiento secundario i y sea $N = \sum_i n_i$. Por definición, la capacidad de la pista será $Q_s = N/T$ donde T es el tiempo demoran en descargarse los N vehículos de la cola. El tiempo de descarga individual será $T_i = n_i/Q_{s_i}$ donde Q_{s_i} proviene del modelo de capacidad lineal y ha sido convertido a veh/h . Entonces

$$\begin{aligned} \frac{N}{Q_s} = T &= \sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{Q_{s_i}} \\ \Rightarrow Q_s &= \frac{N}{\sum_i n_i/Q_{s_i}} \end{aligned}$$

dividiendo arriba y abajo por la duración del período de análisis se obtiene finalmente

$$Q_s = \frac{q_s}{\sum_i q_{s_i}/Q_{s_i}} \quad (2.32)$$

o bien

$$Q_s = \frac{1}{\sum_i p_{s_i}/Q_{s_i}} \quad (2.33)$$

donde $p_{s_i} = q_{s_i}/q_s$ es la proporción del movimiento i en el flujo total. La ecuación anterior puede ser escrita de una manera más fácil de recordar. En efecto, Q_s es solución de la ecuación

$$\frac{q_s}{Q_s} = \sum_i \frac{q_{s_i}}{Q_{s_i}} \quad \Leftrightarrow \quad x_s = \sum_i x_{s_i}$$

lo que equivale a que **el grado de saturación de la pista es la suma de los grados de saturación de los movimientos que se producen en la pista.**

2.4.2.3 Elección de pista

Vemos que tanto para el factor de composición del flujo (f_c), como para la composición de capacidades en intersecciones de prioridad, se requiere conocer los flujos en la pista bajo análisis. Cuando un movimiento dispone de

más de una pista se presenta un problema pues lo que se conoce normalmente es el flujo del movimiento en su conjunto y no por pista.

Hay que considerar entonces la elección de pista por parte del conductor. Parece razonable suponer que lo hacen tratando de minimizar su demora. Operacionalmente esto se hace imponiendo que el grado de saturación en todas las pistas utilizadas por el movimiento es igual. De no serlo existiría un incentivo para que los usuarios utilicen en mayor grado la pista menos saturada, lo que al final se traducirá en un aumento de su saturación. Este criterio se denomina *equisaturación*. Por ejemplo, si un movimiento utiliza dos pistas entonces

$$\begin{aligned}x_1 &= x_2 \\ \frac{q\theta}{Q_1(q, \theta)} &= \frac{q(1 - \theta)}{Q_2(q, \theta)}\end{aligned}$$

donde q es el flujo total del movimiento, θ la proporción del flujo que utiliza la pista 1 y Q_1 y Q_2 es la capacidad de la pista 1 y 2, respectivamente.