

ANÁLISIS DE TIEMPO DE TODO ROJO VEHICULAR EN CRUCES PEATONALES SATURADOS

Sebastián Seriani, Universidad de Los Andes sseriani@miuandes.cl
Juan Cristóbal Torres, Universidad de Los Andes jctorres@miuandes.cl

RESUMEN

En la actualidad, existen intersecciones semaforizadas en donde el flujo vehicular que realiza un viraje es interrumpido por el paso constante de peatones. Para resolver este problema se ha propuesto estudiar un todo rojo vehicular, y así dar paso alternado a vehículos y peatones. Para ver si se reducen los tiempos de viaje, se ha realizado una metodología, que calcula principalmente la capacidad de viraje vehicular y las demoras de vehículos y peatones. Se estudió la intersección de Calle Teatinos con Calle Moneda. Se obtuvieron estándares mínimos que deben cumplirse en un todo rojo vehicular.

Palabras clave: intersección, peatón, todo rojo

ABSTRACT

Currently, there are signalized intersections where traffic flow can't turn because off the constant passage of pedestrians. To solve this problem it has been proposed to study an all red vehicle traffic light to give alternated pass way to vehicles and pedestrians. To see the reduction of travel times, it has been developed a methodology, which calculates the capacity of the turning lane and the delays of vehicles and pedestrians. It has been studied the intersection of Teatinos St. with Moneda St. It has been developed minimum standards that must be used by the all red traffic light.

Keywords: intersection, pedestrian, all red

1. INTRODUCCIÓN

Del total de intersecciones semaforizadas en Santiago, 2.660 (99%) están controladas por la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT, 2012). Sin embargo, la mayoría de ellas contempla sólo regularización desde el punto de vista vehicular, lo que produce cruces inseguros y poco eficientes al ignorar a los peatones.

Cuando no se incorporan facilidades peatonales, surgen conflictos del tipo direccional, específicamente cuando el movimiento vehicular pretende virar en la intersección y se encuentra con el paso interminable de peatones que intenta cruzar la calzada utilizando la misma área y tiempo para realizar su acción. Esto provoca la reducción en la capacidad de viraje de la intersección, la disminución del tiempo vehicular destinado al viraje y el aumento de las demoras vehiculares y peatonales. A todo ello le llamaremos conflicto vehículo – peatón (ver Figura 1).

Figura 1: Conflictos direccionales vehículo - peatón



Fuente: Elaboración Propia

En Chile, existen dos métodos para regular este tipo de conflictos. El primero se encuentra detallado en el Manual de Señalización del Tránsito (MTT, 2003) donde se recomiendan facilidades peatonales dependiendo de la relación PV^2 . Siendo P , el flujo peatonal [peat/h], y V el flujo vehicular [veh/h]. Este Manual (MTT, 2003) entrega recomendaciones dependiendo del resultado de dicha relación y del flujo evaluado. El segundo método, se encuentra en REDEVU (MINVU, 2009), donde se recomiendan fases exclusivas para peatones sólo si existe un alto porcentaje de viraje de vehículos en la intersección y un alto flujo de peatones. Sin embargo, este último manual (MINVU, 2009) no entrega valores, ni estándares mínimos, por lo que se puede concluir que no es suficiente para solucionar el conflicto vehículo – peatón.

Para solucionar los problemas mencionados anteriormente, se ha trazado como objetivo general una metodología de aplicación de un todo rojo vehicular, tomando como caso de estudio una intersección unidireccional. Un todo rojo vehicular, tiene como función, dar paso alternado a vehículos y peatones, de manera de suprimir la interacción de éstos, y poder aumentar la capacidad de viraje, reduciendo las demoras, colas y detenciones, y dar más seguridad al peatón. Los objetivos específicos son: (a) Identificar las variables que dan mayor seguridad y eficiencia en cruces peatonales semaforizados; (b) Identificar las características de los peatones y los métodos para regular el conflicto vehículo-peatón en intersecciones semaforizadas; (c) Realizar una metodología para determinar cuándo se justifica un todo rojo vehicular; (d) Evaluar distintos

escenarios de flujos peatonales y vehiculares; (e) Aplicar un todo rojo peatonal a una intersección unidireccional (Intersección de calles Teatinos con Moneda).

2. METODOLOGÍA

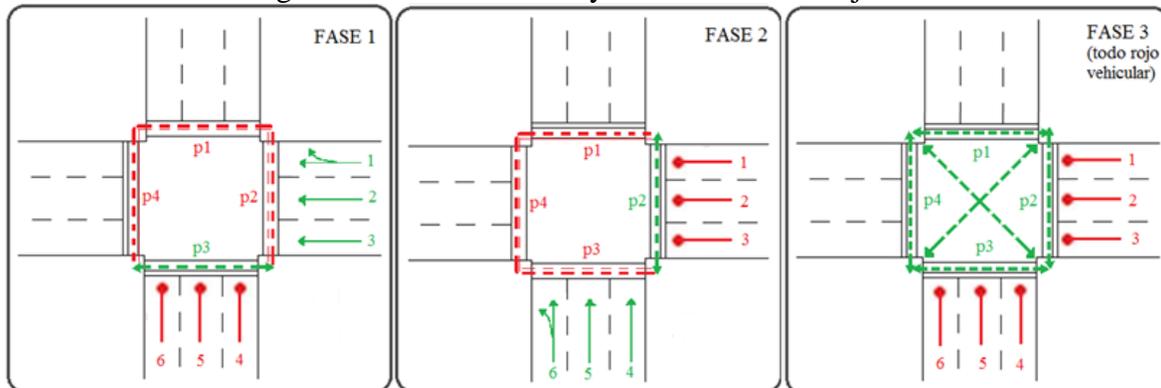
En esta investigación, se plantea que un todo rojo vehicular, convierte los cruces en áreas más seguras y eficientes. La seguridad se cumple al dar paso alternado a vehículos y peatones en distintas fases del semáforo, por lo que se eliminan, mediante la secuencia temporal, los conflictos direccionales entre ambos (ver Figura 2). Por otro lado, la eficiencia de un todo rojo vehicular, pretende disminuir las demoras totales de vehículos y peatones (DT), siendo entonces la ecuación DT la ecuación a calcular en el problema.

Aldea (1985) define DT , mediante la siguiente relación:

$$DT = dv + Kdp \quad (1)$$

Los términos de la ecuación, tanto dv como dp , corresponden a las demoras vehiculares según el método de Akcelik (1993) y a las demoras peatonales según el método de Griffithset *al* (1985), respectivamente. El parámetro K , es un factor de ponderación de las demoras peatonales. Según Taylor (1984) un valor adecuado para este parámetro es igual a tres ($K=3$), ya que se debe ponderar las demoras peatonales por sobre las demoras vehiculares. Esto es consecuente, por la distinta valoración del tiempo dentro y fuera del vehículo, siendo menos atractivo para los peatones esperar afuera del vehículo que dentro de él.

Figura 2: Funcionamiento y fases de un todo rojo vehicular



Fuente: Elaboración Propia

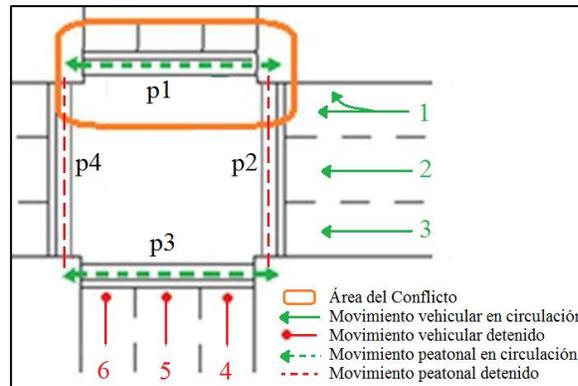
En la Figura 2, se detalla el funcionamiento y las fases de un todo rojo vehicular. La FASE 1 muestra la primera fase del semáforo, donde tiene verde los movimientos vehiculares 1, 2 y 3, y el movimiento peatonal p3, mientras que se dará rojo a los movimientos vehiculares 4, 5 y 6 y a los movimientos peatonales p1, p2 y p4, pues al tener p1 en rojo, se evita el conflicto direccional con el movimiento 1, en cambio, el movimiento peatonal p3, no afecta a los movimientos vehiculares y ni genera conflicto. Lo mismo sucede en la FASE 2 dando verde a los movimientos vehiculares 4, 5 y 6, y al movimiento peatonal p2, mientras el resto queda en rojo. La última fase del ciclo del semáforo, se muestra en la FASE 3, que corresponde a un todo rojo vehicular, en

que los movimientos vehiculares 1, 2, 3, 4, 5 y 6, estarán detenidos, para dar paso libre a los peatones, donde estos podrán cruzar en todas las direcciones y sentidos, es decir podrán cruzar perpendicularmente una rama de la intersección o hacerlo en diagonal.

2.1 Supuestos

Dentro de una intersección, es necesario definir el área donde se abarcará el estudio. Ya se ha mencionado que como caso a analizar, se tomarán intersecciones unidireccionales, de manera de sólo enfocarse en el conflicto vehículo – peatón. Para ser aún más preciso, y para abordar únicamente el conflicto, sólo se estudiará una parte de la intersección de manera de calcular las demoras totales sólo donde nos interesa (ver Figura 3). Para esto se toma como primer supuesto, que los vehículos que no giren en el cruce, y por lo tanto sigan derecho en la intersección, no se verán afectados a grandes demoras adicionales, con la aplicación de un todo rojo vehicular. Es decir, independiente del número de pistas que llegue a la intersección, sólo existirá una pista, no necesariamente exclusiva, destinada al viraje y sólo en ella se calcularán las demoras. Finalmente, se considera que todos los peatones transitan a una misma velocidad de 1,5 [m/s] y que sólo existirán vehículos livianos de largo promedio 6 [m], los cuales transitan en pistas de ancho 3,5 [m] con velocidad de aproximación de 60 [km/h], tasa de frenado de 3 [m/s²] y tiempo de reacción de 1 [s].

Figura 3: Área de estudio en una intersección unidireccional



Fuente: Elaboración Propia

2.2 Escenarios

Para el cálculo de las demoras totales, es necesario ir estableciendo los pasos que se utilizarán en la metodología. Existirán dos escenarios básicos para medir la seguridad y eficiencia de una intersección unidireccional donde se presenten estos conflictos (Escenario Actual) y la evaluación de un todo rojo vehicular (Escenario Todo Rojo). Esta comparación se llevará a cabo bajo las mismas condiciones de la intersección, es decir, igual número de pistas de las ramas que llegan al cruce, igual flujo de vehículos, igual flujo de peatones, e igual porcentaje de viraje.

Existirán 12.000 casos en total a analizar (6.000 de cada escenario), los cuales serán los INPUT del modelo (ver Tabla 1). El número de pistas a considerar variará desde dos pistas por rama a cuatro pistas por rama, realizando una combinación entre vía principal y vía secundaria (ver Tabla 2). No se considerarán pistas de una sola rama, ni mayores a cuatro ramas, ya que según

REDEVU (MINVU, 2009) para estos casos al implementar un todo rojo peatonal se reduce la seguridad y eficiencia. Respecto a los flujos peatonales y vehiculares se comenzará con 50 peat/h y 250 veh/h y se irá aumentando hasta llegar a flujos de cruces saturados de 3000 peat/h y 1700 veh/h, respectivamente, formando 10 casos a simular. Del total de vehículos en pista, se irá descontando un 10% de vehículos que realizan el viraje para cada caso (ver Tabla 3). Finalmente, de estas combinaciones y escenarios, se entregarán las demoras totales (DT) del escenario actual, que será comparado con el escenario equivalente de todo rojo. Los principales OUTPUT de esta metodología se exponen en la Tabla 4.

Tabla 1: Total de combinaciones a simular

Combinaciones	Escenario Actual	Escenario Todo Rojo
Número de pistas [casos]	6	6
Flujos vehiculares [casos]	10	10
% de vehículos virando [casos]	10	10
Flujos peatonales [casos]	10	10
Total	6000	6000

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2: Combinaciones de casos a simular según pistas por intersección¹

Combinaciones	Intersección Unidireccional		Ancho de pistas [m]	Distancia máxima posible que recorren los peatones al cruzar [m] *
	N° Pistas en Calzada 1	N° Pistas en Calzada 2		
1	2	2	3,5	9,90
2	3	2	3,5	12,62
3	4	2	3,5	15,65
4	3	3	3,5	14,85
5	4	3	3,5	17,50
6	4	4	3,5	19,80

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3. Combinaciones de casos a simular según flujos por intersección²

Combinaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujos Peatonales [peat/h]	50	100	250	500	750	1000	1500	2000	2500	3000
Flujos vehiculares [veh/h]	250	500	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700

Fuente: Elaboración Propia

¹Distancia máxima es calcula a través del Teorema de Pitágoras mediante la relación: $d_{max} = \sqrt{(N^{\circ}Pistas * anchopista)^2 + (N^{\circ}Pistas * anchopista)^2}$

²Para cada combinación se calcula el flujo de vehículos que realizan el viraje: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% 80%, 90% y 100%

Tabla 4: Principales Output de la simulación

OUTPUT	Unidad
Total de tiempo ahorrado	[%] y [s]
Aumento/Reducción de tiempos de viajes para vehículos	[%] y [s]
Aumento/Reducción de tiempos de viajes para peatones	[%] y [s]
Capacidad de Viraje caso actual	[veh/h]
Capacidad de Viraje caso todo rojo	[veh/h]
Casos eficientes según relación PV2	[%] y [s]

Fuente: Elaboración Propia

2.3 Simulaciones

A continuación se explicará en detalle la metodología usada para calcular las demoras totales en la simulación.

Paso 1: Cálculo de AA, RR y Vmin

Para evaluar las demoras totales en una intersección, el primer paso es calcular los tiempos de fases del semáforo. Por esta razón se distingue el número de pista por rama que llega al cruce, pues tendrán distintos tiempos de amarillo (AA), tiempos de todo rojo de seguridad (RR), y verdes mínimos peatonales (V_{min}). Para ambos escenarios, el AA quedará fijo en 4 [s] y RR en alrededor de 1 [s], mientras que para el escenario todo rojo, se aumentará el tiempo de ciclo del semáforo, al incluir una fase adicional para el final de éste, en el tiempo en que los peatones demoren en cruzar la intersección de forma diagonal, mediante la ecuación (2).

$$V_{min} = RR_{peat} = 5 + \frac{w_p}{v_p} [s] \quad (2)$$

Siendo w_p , la distancia máxima posible que puedan recorrer los peatones. Estos valores se encuentran detallados en la Tabla 2.

Paso 2: Cálculo de V, C y S

Para completar todos los tiempos de fases del semáforo se debe aplicar un determinado flujo vehicular para el cálculo de tiempos de repartos de verde (V) y ciclo total (C) del semáforo. Los flujos usados se exponen en la Tabla 3. Es importante destacar que para el cálculo de repartos de verdes, se ocuparán flujos de saturación (S) de 1581 [ADE/h-pistas] para la pista de viraje, y 2292 [ADE/h-pista] para las pistas en que los vehículos sigan derecho en el cruce (Gibson *et al*, 1997). Si bien a pesar de que la pista de viraje no es necesariamente exclusiva, en la práctica se puede observar que vehículos que siguen derecho tienden a cambiarse de pista si se encuentran en la pista de viraje.

Paso 3: Cálculo de dv y V''_{etv}

Definidos todos los tiempos de fases de semáforos, por el método de Webster (1966), se calculan las demoras vehiculares (dv) según cada flujo de la Tabla 3 y porcentaje de viraje desde 10% a

100%. Las demoras vehiculares serán la suma de las demoras uniformes (du) y las demoras por efectos de aleatoriedad y sobresaturación (das). Éstas se calcularán sólo tomando en cuenta el área de conflicto, que fue expuesto en la sección 2.1, por lo tanto, se calculará las demoras vehiculares sólo a los vehículos que realicen un viraje en la intersección, los cuales se ven afectados directamente por el conflicto vehículo - peatón.

Existirá una pequeña diferencia entre el Escenario Actual y Escenario Todo Rojo, que consiste en la variación del tiempo de verde efectivo (v_{ei}). Fernández (2010), define el tiempo de verde efectivo como el tiempo de verde ($V_{calculado}$), menos las pérdidas iniciales (λ_1) más la ganancia final (λ_2). El mismo autor (Fernández, 2010) recomienda que tanto las pérdidas como las ganancias, alcanzan valores similares, por tanto el verde efectivo se asume como el verde calculado (V). Lo anterior se cumple para el caso en que vehículos sigan derecho o bien, si no se encuentran con flujos peatonales. Cuando hay niveles altos de flujos peatonales, como son los casos a analizar, ocurre que los vehículos no pueden virar debido al paso interminable de peatones. Es decir, aunque el semáforo esté en verde para que vehículos crucen, al girar pierden la preferencia, no pudiendo descargar a saturación la cola que quiere virar, es decir, el flujo de saturación S asignado en 1581 [ADE/h], no es representativo si existen flujos peatonales. Para solucionar esto, y aislando sólo al área de estudio, se puede disminuir el tiempo de verde disponible para virar, a rangos que van desde el tiempo de verde (V) al caso extremo correspondiente a sólo el tiempo de amarillo (AA). Finalmente se opta por ocupar como verde efectivo prima de viraje (V''_{eiv}), un caso bastante conservador que será el que se muestra en la siguiente ecuación:

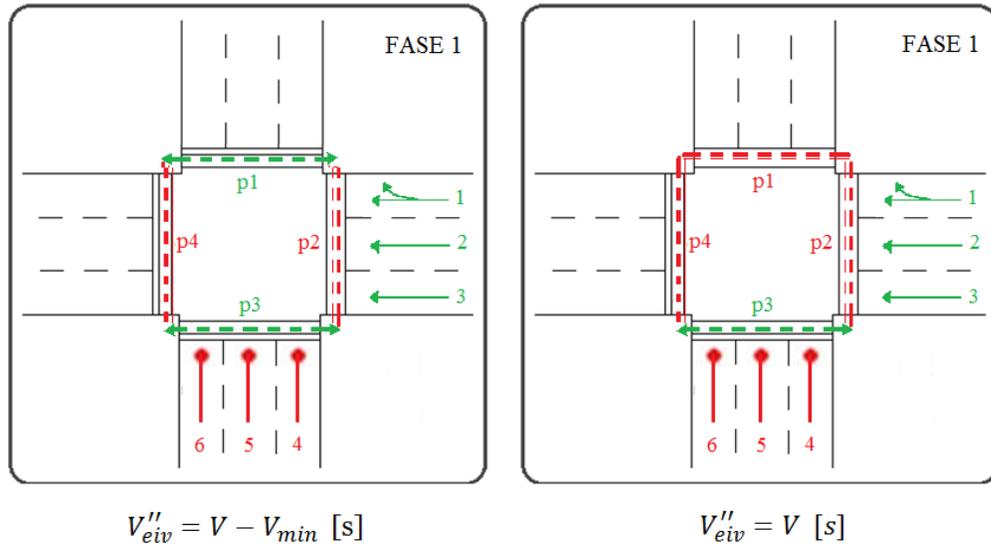
$$V''_{eiv} = V - V_{min} \quad [s] \quad (3)$$

De la ecuación anterior (3), se puede apreciar que el verde efectivo prima de viraje (V''_{eiv}), será el verde calculado (V), menos el tiempo mínimo peatonal (V_{min}), ya que es en ese lapso cuando se produce el mayor número de virajes en cruces saturados. Se vuelve a recalcar, que la ecuación (3) es bastante conservadora, pues si se considera que los tiempos mínimos peatonales fluctúan entre 10 a 14 [s], dependiendo del número de pistas de la intersección, sólo se estará disminuyendo estos tiempos por fases, pero en la práctica, este valor puede llegar a reducirse de tal manera, que sólo tendrán tiempo paracruzarse en el amarillo (AA). Si existiesen casos en que V''_{eiv} sea igual a cero, es decir el verde sea igual al verde mínimo peatonal, la ecuación (3) variará a:

$$V'''_{eiv} = AA \quad [s] \quad (4)$$

Es decir, sólo el tiempo de amarillo (AA), ocupando así el caso extremo. Para el caso del Escenario Todo Rojo, esta modificación no es necesaria, pues se elimina el contacto con los peatones, pudiendo girar y avanzar libremente. En la Figura 4, se detalla gráficamente esta diferenciación.

Figura 4: Tiempos de verde efectivo de viraje según escenario
 CASO ACTUAL CASO TODO ROJO



Fuente: Elaboración Propia

Paso 4: Cálculo de dp

El siguiente punto a calcular son las demoras peatonales (*dp*), según el rango de flujos detallados en el Tabla 3. Las demoras peatonales se calculan a partir de las ecuaciones calibradas por Griffithset al(1985). Nuevamente habrá ciertas diferencias en los Escenarios Actual y Todo Rojo, pues al agregar una fase adicional del semáforo, los parámetros que ocupan las ecuaciones para calcular las demoras peatonales se diferencian según muestra la Tabla 5.

Tabla 5: Diferencias parámetros para demoras peatonales

Variable Dp		Escenario		Unidad
		Actual	Todo Rojo	
Amarillo	a	AA	AA	[s]
Rojo seguridad	b	RR seg	RR seg	[s]
Verde peatonal	c	V _{viap} principal - d	V _{min_peatonal} - d	[s]
Verde intermitente	d	5	5	[s]
Rojo seguridad	e	RR seg	RR seg	[s]
Verde vehicular	f	V _{viasecundaria}	V _{viap} principal + V _{viasecundaria}	[s]

Fuente: Elaboración Propia

Paso 5: Cálculo de DT

Teniendo calculado demoras vehiculares (*dv*) y peatonales (*dp*), se procede a calcular las demoras totales (*DT*) a partir de la ecuación (1). Además cada combinación de *DT*, estará relacionado a un flujo vehicular y peatonal, que será comparado con los rangos de flujos que propone el Manual de Señalización del Tránsito en la relación *PV*² (MTT, 2003).

Paso 6: ¿Cuándo aplicar un todo rojo vehicular?

Finalmente, y a pesar de que existen casos, como se mostrarán a continuación, en el que se disminuyen las demoras totales, pero la relación PV^2 no dispone de ninguna facilidad peatonal, este estudio recomendará la aplicación de un todo rojo vehicular si se cumple las siguientes dos condiciones:

- 1.- Si, las demoras totales (DT) del caso todo rojo son menores que las calculadas para el caso actual, ocupando los mismos flujos peatonales (q_{peat}) y los mismos porcentajes de flujo vehicular (q_{veh}) que gire en la intersección de igual número de pistas.
- 2.- Si, el Manual de Señalización del Tránsito recomienda, a través de la relación PV^2 , un semáforo como facilidad peatonal.

Estas son las dos condiciones que deben cumplirse conjuntamente para que los cruces saturados de peatones sean más eficientes y seguros con la aplicación de un todo rojo vehicular.

Tal como se describe en la metodología, se estudiaron las demoras totales para 12.000 casos, los cuales representan distintas situaciones de flujos vehiculares y peatonales. Los resultados y su análisis, se separarán por número de pistas que llegan a la intersección, debido a que cambian los tiempos de fases de los semáforos, verdes mínimos peatonales, capacidades, entre otras. Además, los resultados se entregan en porcentaje [%] de ahorro de demoras, es decir, se calcula las demoras totales (DT) para los escenarios: Actual y Todo Rojo, y se calcula según la siguiente ecuación:

$$DT_{\text{ahorrado}} = 1 - \frac{DT_{\text{todo rojo}}}{DT_{\text{actual}}} [\%] \quad (5)$$

Si los valores de la ecuación (5) son positivos (>0) entonces se reducirá las demoras aplicando un todo rojo vehicular en la intersección. De lo contrario, la aplicación de un todo rojo vehicular no será eficiente.

El detalle de las 12.000 combinaciones, separado por número de pista, por flujo vehicular y peatonal, y por porcentaje de viraje, se encuentra en Torres (2013). En la Tabla 6, se muestra un ejemplo de la metodología para una intersección 3x3, donde se obtuvo el porcentaje de ahorro de las demoras totales. Los valores positivos que están con relleno de color azul oscuro (17 casos) indican que están en el rango PV^2 , por lo tanto requieren de una facilidad peatonal, es decir, valores positivos que es eficiente el uso de todo rojo vehicular. Los valores negativos que están con relleno de color verde (39 casos) indican que están en el rango PV^2 y como son negativos entonces no es eficiente el uso de un todo rojo vehicular. Los valores positivos con relleno de color celeste (4 casos) indican que no están en el rango PV^2 , sin embargo es eficiente el uso de un todo rojo vehicular. Finalmente el resto de los valores negativos que están sin color de relleno, no están en el rango PV^2 y no es eficiente el uso de un todo rojo vehicular.

Tabla 6: Ejemplo de intersección 3x3 unidireccional usando metodología de todo rojo vehicular

% gira	veh/h \ peat/h	50	100	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
10%	120	-30%	-38%	-43%	-47%	-49%	-50%	-50%	-50%	-50%
20%	240	-24%	-31%	-36%	-39%	-41%	-41%	-41%	-41%	-41%
30%	360	-18%	-24%	-29%	-32%	-33%	-34%	-34%	-34%	-34%
40%	480	-12%	-18%	-22%	-25%	-26%	-26%	-27%	-27%	-27%
50%	600	-7%	-13%	-16%	-19%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
60%	720	-3%	-7%	-11%	-13%	-14%	-14%	-14%	-14%	-14%
70%	840	2%	-3%	-6%	-7%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%
80%	960	6%	2%	-1%	-2%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%
90%	1080	10%	6%	4%	3%	2%	2%	2%	2%	2%
100%	1200	14%	11%	9%	8%	7%	7%	7%	7%	7%

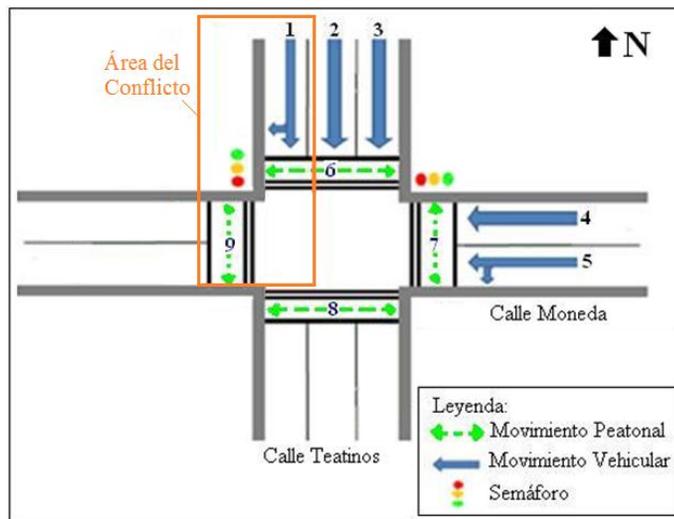
Fuente: Elaboración Propia

3. SIMULACIÓN CASO DE ESTUDIO

3.1 Parámetros de entrada

Como se planteó en los objetivos específicos de esta investigación, se ha querido estudiar y emplear la metodología propuesta, a una intersección real, donde exista el conflicto vehículo - peatón. La intersección a analizar, será el cruce de las calles Teatinos con Moneda (ver Figura 5), ubicado en el centro cívico de Santiago, el cual atrae altos flujos peatonales y vehiculares, sobre todo, en horas punta mañana y mediodía.

Figura 5: Caso de estudio: intersección 3x2 pistas unidireccionales en calle Teatinos con calle Moneda



Fuente: Elaboración Propia

El área de estudio (zona destacada en color naranja en Figura 5) comprenderá la pista derecha de calle Teatinos (vía principal), calle en la cual está permitida la maniobra viraje hacia la derecha (movimiento 1), y el cruce peatonal (movimiento 9) por calle Moneda (vía secundaria), por donde la mayor parte del flujo peatonal realiza su movimiento.

Para estudiar este caso, se hizo dos mediciones de flujos vehiculares y peatonales, sobre el cruce, durante una hora, los días 10 de septiembre y 2 de octubre de 2012, que se muestran en un resumen en la Tabla 7. Estos flujos se obtuvieron promediando ambos días.

Tabla 7: Flujos vehiculares y peatonales en intersección Teatinos con Moneda

Movimiento	Flujo	Unidad
1, 2 y 3	2228	[veh/h]
9	1572	[peat/h]

Fuente: Elaboración Propia

También se pudo rescatar que de los 2228 [veh/h], cerca de 401 [veh/h] realiza un viraje hacia calle Moneda, correspondiente al 18% del flujo total. Este flujo vehicular, sólo contempla vehículos livianos, salvo algunas excepciones, pero hay que destacar que por esta vía, no circulan buses del transporte público. Se debe además medir los repartos de fases de los semáforos los cuales se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Repartos de semáforos en intersección Teatinos con Moneda

Fases	Medido	Webster	Unidades
Tiempo total de Ciclo	82	70	[s]
Verde vehicular Teatinos	37	34	[s]
Verde vehicular Moneda	37	28	[s]
Tiempos de Amarillo	3	3	[s]
Verde intermitente peatones	5	5	[s]

Fuente: Elaboración Propia

Estos valores medidos en terreno, fueron comparados con el método de programación de semáforos de Webster (1966), donde se encontraron diferencias en el tiempo de Ciclo, y por ende, a los repartos de semáforos. El tiempo de Ciclo calculado fue de 70 [s], y repartos de verde de 34 [s] y 28 [s] para la calle principal y secundaria, respectivamente. Esta diferencia se debe a que probablemente, la intersección de calles Teatinos con Moneda, corresponda a una red de semáforos y esté sincronizada con otros.

3.2 Cálculo de demoras para Escenario Actual

Teniendo los valores e INPUTS de las tablas anteriores (Tabla 7 y 8), se debe calcular las demoras totales y luego compararestos valores con la aplicación de un todo rojo vehicular. Las demoras vehiculares y peatonales, calculadas a partir de la simulación en Excel, entregan los siguientes resultados:

Tabla 9: Demoras para caso actual

Grado de Saturación pista viraje	5,2	[adimensional]
Q: Capacidad de viraje	77	[veh/h]
Demoras vehiculares	50,25	[s]
Demoras peatonales	3,97	[s]

Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar que las demoras peatonales son mucho menores a las demoras vehiculares. Esto se debe a que los vehículos que giran se ven detenido al enfrentarse con el alto flujo peatonal (1572 [peat/h]) y por lo tanto los vehículos tienen muy poco tiempo para realizar el viraje, prácticamente sólo un poco más que el tiempo de amarillo (4 segundos). Esto provoca que la pista de viraje tenga una baja capacidad (77 veh/h) y por ende un grado de saturación bastante alto de 5,2.

3.3 Cálculo de demoras para escenario Todo Rojo

El siguiente paso, es calcular los tiempos de semáforo para la aplicación de un todo rojo vehicular. Como el tiempo de ciclo del semáforo para el caso actual, no supera el máximo de 120 [s], se puede agregar la fase adicional de todo rojo vehicular, sin alterar los repartos de verde, quedando el tiempo de ciclo (C) en 95,4 [s], con una fase adicional de verde peatonal de 13,4 [s], incluido el verde intermitente, de manera que los peatones alcancen a cruzar en diagonal la intersección.

Las demoras vehiculares (D_v) y peatonales (D_p) aplicando un todo rojo vehicular, con los mismos flujos, son las siguientes:

Tabla 10: Demoras para caso todo rojo

Grado de Saturación pista viraje	0,65	[adimensional]
Q: Capacidad de viraje	613	[veh/h]
Demoras vehiculares	23,95	[s]
Demoras peatonales	34,91	[s]

Fuente: Elaboración Propia

Como bien se aprecia en la Tabla 10, las demoras vehiculares disminuyen en comparación a la Tabla 10, pues los vehículos tienen todo el verde efectivo destinado al viraje, eliminando el conflicto vehículo – peatón, aumentando la capacidad de la intersección casi en 8 veces (de 77 a 613 veh/h) y reduciendo el grado de saturación de 5,2 a 0,65. No obstante, las demoras promedios de peatones aumentaron. Este mayor aumento se debe a que los peatones deben esperar dos fases para poder cruzar.

3.4 Demoras Totales

Finalmente, las demoras totales según la ecuación (1) aumentan de 61,62 [s] a 128,68 [s], es decir, un incremento cerca del doble (ver Tabla 11).

Tabla 11: Demoras Totales caso de estudio

ESCENARIO	d_v [s]	d_p [s]	DT [s]
Actual	52,25	3,79	61,62
Todo Rojo	23,95	34,91	128,68
Porcentaje de reducción	52%	-821%	-109%

Fuente: Elaboración Propia

4. CONCLUSIONES

Se puede concluir, que este método es eficiente, pero sólo desde el punto de vista vehicular. Las demoras peatonales serán siempre mayores que el porcentaje ahorrado por los automovilistas. Tal como se observa en el caso de estudio, las demoras vehiculares se reducen un 52%, mientras que las demoras peatonales aumentan casi 10 veces.

Sin embargo, este aumento no se compara con la mayor seguridad que entrega a los peatones el todo rojo a la hora de cruzar. Lo cual se observa con reducción del conflicto vehículo-peatón y se traduce en un aumento de la capacidad del cruce. Por ejemplo, en el caso de estudio dicha capacidad aumento casi 8 veces.

Desde el punto de las recomendaciones del Manual de Señalización de Tránsito (MTT, 2003), cuando se tiene más de un 30% de vehículos girando (o más de 340 veh/h) se justifica implementar facilidades peatonales para cruzar.

Como conclusiones prácticas, este método, es altamente recomendable para 3 o más pistas, tanto en vías primarias como secundarias, debido a que, para vías de dos pistas, los peatones tienden a encontrar una brecha para cruzar muy fácilmente, pues sólo deben recorrer 7 [m] para alcanzar su objetivo, por lo que a pesar de que tenga preferencias los vehículos en la fase de verde, y los peatones se encuentren detenidos, tienden a no esperar el momento establecido, sino que cruzan cuando pueden hacerlo. Para 3 o más pistas, los peatones deben salvar más de 10 [m], siendo menos atractivo encontrar una brecha para cruzar. Esto lleva indiscutiblemente a poner señalización, o bien, semáforo con tiempos de espera, para informar a peatones en que momento tienen derecho a paso. Los conductores no tendrán este problema, pues tienden a respetar los semáforos y señalización, a pesar de que en algún determinado momento no se generen conflictos.

Finalmente, se ha querido mostrar una serie de impactos que no se han cuantificado en la presente publicación debido a la limitación del área de conflicto analizada, y por ende quedarán como investigación futura, pero se presume que tendrán una gran importancia a la hora de aplicar un todo rojo vehicular a una intersección. El primero de ellos, es medir el efecto de las demoras sobre el resto del tráfico, es decir, fuera del área de estudio, ya que con la aplicación de un todo rojo vehicular se eliminarán las colas de vehículos en la pista de viraje, por efecto de que los vehículos podrán realizar su movimiento, lo que solucionará conflictos aguas arriba de la intersección, por ejemplo bloqueos de cruce. El segundo punto es poder medir con mayor detalle la seguridad que se logra al eliminar los conflictos direccionales vehículo-peatón, esto ya que el beneficio de un todo rojo vehicular compensará el mayor aumento en tiempos de viaje, sin embargo, desde el punto de vista vehicular, existirá un impacto extra por parte de los vehículos, pues en la realidad, hay vehículos que viran en doble fila, impidiendo el flujo normal de vehículos en las pistas centrales, pero por otro lado la aplicación de un todo rojo vehicular, ayudará a tener despejada la intersección y se necesitará de calcular realmente el verde efectivo para viraje. Finalmente, queda por investigar el uso de este método en calles bidireccionales y donde se pueda incorporar otros actores, tales como los ciclistas.

Referencias

- Aldea, A. (1985) Consideraciones metodológicas para la instalación de semáforos peatonales. *Actas del II Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, 12 -14 Noviembre 1986, Santiago de Chile, 179 – 196.
- Akçelik, R. (1993) Traffic signals: capacity and timing analysis. *Research Report ARR No. 123*. Australian Road Research Board Ltd, Vermont South, Victoria.
- Fernández, R. (2008) *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*. Documentos Docentes Universidad de los Andes. Santiago de Chile.
- Fernández, R. (2010) *Apuntes de gestión de tránsito*. Documentos Docentes Universidad de los Andes. Santiago de Chile.
- Gibson, J., Bartel, G. y Coeymans, J.E. (1997) Redefinición de los parámetros de capacidad de intersecciones semaforizadas bajo condiciones de tráfico mixto. *Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, 10-14 Noviembre 1997, Santiago de Chile, 383 – 395.
- Griffiths, J.D., Hunt, J.G., y Marlow, M. (1985) Delays at pedestrian crossing: The development and validation of a simulation model of a Zebra crossing. *Traffic Engineering and Control*, 25(10), 505-509.
- MTT (2003) *Manual de señalización de tránsito*. Capítulo 6, Facilidades Explícitas para Peatones y Ciclistas. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Santiago de Chile.
- MTT (2012) *Manual de señalización de tránsito*. Capítulo 4, Semáforos. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Santiago de Chile.
- MINVU (2009) *Recomendaciones para el diseño de elementos de infraestructura vial urbana (REDEVU)*. Capítulo 2, Introducción al Problema del Diseño Vial Urbano. Capítulo 3, Zonas Peatonales. Capítulo 6, Zonas Vehiculares en Intersecciones. Santiago de Chile.
- Taylor, I.G. (1984) The effects of Pelican crossings facilities in a linked signal system: a simulation study. Transport Operations Research Group, *Research Report N° 55*, Newcastle.
- Torres, J.C. (2013) 'Análisis de tiempos de todo rojo vehicular en cruces peatonales saturados'. Memoria de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Universidad de los Andes.
- UOCT (2012) Unidad Operativa de Control de Tránsito. Santiago de Chile.
- Webster, F.V. and Cobbe, B.M. (1966) Traffic signals. *Road Research Technical*, Paper No. 56. HMSO, London.