


UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Prof. Guía: Patricio Álvarez Mendoza PhD.



**ESTUDIO DE LA OPTIMALIDAD DE
PROGRAMACIONES DE SEMÁFOROS
UTILIZANDO TÉCNICAS DE
MICROSIMULACIÓN**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil**

MARIANO EDUARDO ORTEGA VÁSQUEZ

Concepción, julio de 2014

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE TABLAS	v
1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Justificación	3
1.2 Objetivos del Estudio.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 METODOLOGÍA.....	5
2.1 Esquema de la Metodología.....	5
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Conceptos Básicos	6
3.2 Simulación de Tráfico.....	6
3.3 Programación Óptima de Semáforos	7
3.4 Estudios Anteriores.....	8
4 MODELOS DE TRÁFICO	10
4.1 Modelo TRANSYT 14.....	10
4.1.2 Supuestos Básicos	11
4.1.3 Modelo de Dispersión de Pelotones	12
4.2 Modelo AIMSUN	13
4.2.1 Modelos Utilizados en AIMSUN	14
5 COMPARACIÓN DE MODELOS	17
5.1 Casos de Prueba.....	17
5.1.1 Caso A	17
5.1.2 Caso B	18
5.2 Ajuste de Parámetros	18

5.3	Medidas de Rendimiento	19
5.4	Metodología de Comparación.....	19
5.5	Escenarios de Prueba	20
5.5.1	Caso A	20
5.5.2	Caso B	20
6	RESULTADOS	21
6.1	Resultados Caso A.....	21
6.1.1	Variación de Demanda.	21
6.2	Resultados Caso B	22
6.2.1	Variación de Demanda	22
6.2.2	Variación de distancia entre semáforos	22
6.2.3	Variación de la velocidad media	23
7	CASO DE ESTUDIO	25
7.1	Zona a Modelar	25
7.2	Análisis y Resultados	25
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	27
9	REFERENCIAS	29
	ANEXOS	30
	ANEXO A	30
	ANEXO B	38
	ANEXO C	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la metodología utilizada.....	5
Figura 2. Esquema del método TRANSYT.....	11
Figura 3. Perfil de llegada aguas debajo de la intersección.....	12
Figura 4. Dispersión del pelotón de acuerdo a AIMSUN	14
Figura 6. Geometría y configuración sistema B.....	18
Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología utilizada	19
Figura 8. Comparación de óptimos para distintas saturaciones.....	21
Figura 9. Comparación entre óptimos para distintas saturaciones	22
Figura 10. Comparación entre óptimos para distintas distancias entre semáforos.....	23
Figura 11. Comparación entre óptimos para distintas velocidades	24
Figura 12. Plano de la zona modelada.....	25

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Registro de las medidas de rendimiento para TRANSYT 14 y AIMSUN.....	26
---	----

ESTUDIO DE LA OPTIMALIDAD DE PROGRAMACIONES DE SEMÁFOROS UTILIZANDO TÉCNICAS DE MICROSIMULACIÓN

Mariano Ortega Vásquez

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

meortega@alumnos.ubiobio.cl

Patricio Álvarez Mendoza MSc.PhD.

Departamento De Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

palvarez@ubiobio.cl

RESUMEN

La programación de semáforos es determinante en la eficiencia de un sistema de tráfico, por lo que es de suma importancia hacer una buena distribución de los tiempos de las señales. Usualmente, estos tiempos se optimizan por medio de programas que simulan el comportamiento del flujo vehicular maximizando algún índice de rendimiento. Las herramientas de simulación más empleadas para este fin son de naturaleza determinista ya que no consideran efectos aleatorios en el comportamiento vehicular y en consecuencia no siempre reflejan lo que ocurre en la realidad.

En este estudio se evaluó la optimalidad de programaciones cuando es considerada explícitamente la aleatoriedad del tráfico vehicular. Para ello se crearon escenarios de prueba los cuales fueron optimizados utilizando métodos deterministas y luego se evaluaron los resultados utilizando técnicas de microsimulación. Dentro de los escenarios de prueba se evaluaron cambios de demanda, geometría, y velocidades medias.

Se concluyó que para bajos niveles de saturación no existen diferencias importantes, mientras que en condiciones de congestión existen diferencias importantes entre el óptimo usando técnicas determinísticas y el óptimo estocástico.

Palabras claves: Optimalidad, semáforos, microsimulación.

Número de palabras: 5682 palabra texto + 12 Figuras/Tablas * 250 + 1 Figura*500 = 9182 palabras.

OPTIMALITY STUDY OF TRAFFIC SIGNAL PROGRAMMING TECHNIQUES USING MICROSIMULATION

Mariano Ortega Vasquez

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

meortega@alumnos.ubiobio.cl

Patricio Álvarez Mendoza MSc.PhD.

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

palvarez@ubiobio.cl

ABSTRACT

Signal timing plays a critical role in determining the efficiency of the transportation system, and consequently is important to achieve optimal time distribution among the competing movements. Usually this objective is achieved by means of using optimizing tools that simulate traffic behavior and maximize some performance index. The most common optimizing tools are said to be deterministic because they ignore the stochastic character of the transportation demand and thus in some cases the traffic model used may be not fully capture traffic characteristics.

In this study, the optimality of signal timing was assessed when the traffic stochastic characteristics is explicitly considered. In this sense several scenarios were built and optimized using deterministic tools and afterwards, the resulting signal timing was assessed in a microsimulated environment. Changes in traffic demand, geometry and mean speeds were explicitly considered.

It was concluded that for low saturation levels, there aren't differences between the optimal signal timing obtained using both approaches. However for congested conditions is possible to find important differences.

Keywords: Optimality, traffic lights, Microsimulation.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y la concentración de la población en zonas urbanas han conllevado a una creciente importancia en el estudio de sistemas de transporte urbano. En las grandes ciudades hay cada vez más dificultades para desplazarse, puesto que existen viajes cada vez más largos (por la expansión territorial de la ciudad) y lentos (producto de la congestión). En este sentido, la programación de semáforos cobra gran importancia para mejorar la eficiencia de redes semaforizadas. Para esto los ingenieros de tráfico se han apoyado de diversas herramientas, que van desde métodos muy simples, hasta el uso de complejos programas de optimización.

1.1 Justificación

En Chile la programación de semáforos se obtiene principalmente utilizando herramientas macroscópicas las cuales son esencialmente determinísticas. Estos modelos analizan el funcionamiento del tráfico con un bajo nivel de detalle ya que representan el comportamiento general del flujo vehicular. Estos modelos macroscópicos utilizan ecuaciones que reflejan parámetros generales del flujo vehicular, como la velocidad, densidad y flujo. Muchas de las ideas detrás de estos modelos están tomadas de analogías con el flujo de líquidos, gases o de relaciones halladas empíricamente entre estas cantidades y sus razones de cambio.

Por otro lado existen herramientas de microsimulación que consideran explícitamente la naturaleza aleatoria del tráfico vehicular. La principal característica de estos modelos es que distinguen individualmente a cada vehículo cada instante, y hacen uso de ecuaciones que describen el comportamiento de estos vehículos cuando siguen a otro, o cuando circulan sin impedimentos. Es decir, estos modelos permiten representar las corrientes de tráfico con un alto nivel de detalle. Las reacciones que tiene el conductor de cada vehículo se definen según los modelos de seguimiento vehicular, modelos de cambios de pistas, entre otros (ver anexos).

Diversos estudios fuera de Chile (Park et al. 2001, Stevanovic y Martin 2006) han examinado y comparado la efectividad de programaciones de semáforos optimizados mediante modelos macroscópicos, usando modelos de simulación microscópicos, y han encontrado que los óptimos obtenidos a través de programas de macrosimulación no necesariamente son óptimos cuando son evaluados usando microsimulación y que además existen inconsistencias entre ambos.

Sin embargo, estos estudios no son válidos en Chile debido a la diferencia entre los sistemas de transporte, por lo que es importante estudiar el caso chileno.

Por este motivo en el presente estudio se evaluará de acuerdo a las condiciones de tránsito, ajustadas a la condición chilena. Si las programaciones óptimas obtenidas a través de macrosimulación permanecen óptimas cuando son evaluadas mediante microsimulación.

1.2 Objetivos del Estudio

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la aleatoriedad del tráfico vehicular en la optimalidad de la programación de semáforos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Sintetizar el estado del arte del impacto de la variabilidad del tráfico en la optimización de redes de semáforos.
- Sintetizar las características de los principales modelos de optimización de redes de semáforos.
- Proponer una metodología para evaluar la diferencia entre el óptimo determinístico y el óptimo estocástico en una red semaforizada.
- Identificar los escenarios dónde se verifican diferencias importantes entre óptimos determinísticos y estocásticos.
- Aplicar la metodología a un corredor de prueba en el Gran Concepción y comparar las diferencias entre óptimos determinísticos y estocásticos.

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en esta investigación y que sirvió de herramienta para el cumplimiento de los objetivos generales y específicos propuestos.

2.1 Esquema de la Metodología

En la Figura 1 se muestra la metodología utilizada en esta investigación, la cual resume el trabajo desarrollado en los capítulos siguientes.



Figura 1. Esquema de la metodología utilizada.

(Fuente: Elaboración propia)

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El presente capítulo tiene la finalidad de entregar información relevante acerca de la simulación de tráfico y como se realiza la programación de semáforos. Además se resumirán los estudios anteriores que sirvieron como antecedente para realizar esta investigación.

3.1 Conceptos Básicos

A continuación se definen conceptos básicos que se deben tener en cuenta para este estudio.

Semáforo: Dispositivo de control de tráfico, que cambia los colores de las luces según un plan fijo o variable.

Movimiento: Conjunto de vehículos que acuden a una intersección por el mismo acceso y realizan la misma trayectoria.

Ciclo: Secuencia completa de movimientos en una intersección semaforizada.

Duración de ciclo: Es el tiempo total, en segundos, requerido por el semáforo para completar un ciclo.

Fase: Es la parte de un ciclo asignada a una combinación de movimientos de tráfico que tienen derecho a pasar simultáneamente durante uno o más intervalos.

Offset: Es el tiempo que transcurre entre el inicio de una fase y el inicio de la misma fase en el semáforo siguiente.

Reparto: Es la distribución del tiempo de ciclo entre cada una de las fases.

Capacidad: Máximo volumen horario que tiene una razonable probabilidad de pasar por un punto o sección uniforme por unidad de tiempo para las condiciones prevalecientes de calzada tránsito y control.

3.2 Simulación de Tráfico

Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema (Shannon, 1988).

La simulación de tráfico entrega una serie de ventajas, entre las cuales se puede destacar el análisis de sistemas complejos en poco tiempo, es decir, simular en segundos o minutos el comportamiento de horas, días o meses. También se puede destacar la posibilidad de visualizar detalladamente comportamientos de los automovilistas como también analizar diferentes alternativas o la reacción del sistema ante cambios en la red de estudio.

En síntesis una de las mayores virtudes de los modelos de simulación es lograr entregar información detallada frente a los posibles cambios del sistema permitiendo anticipar soluciones a problemas

Los modelos de simulación de tráfico pueden ser clasificados de diferentes maneras, aunque para este estudio se clasificaran en dos categorías de acuerdo al nivel de detalle que representa cada modelo. Estas categorías son: a) los modelos macroscópicos, que describen el comportamiento vehicular en términos generales y con un bajo nivel de detalle, y b) los modelos microscópicos, que describen el comportamiento de cada vehículo en particular y su interacción con otros adyacentes.

3.3 Programación Óptima de Semáforos

Los semáforos son parte importante en un sistema del flujo vehicular interrumpido ya que una adecuada programación o configuración de los semáforos ayuda a conseguir un flujo expedito y mantiene los tiempos de espera de los conductores en niveles aceptables, mientras que una inadecuada configuración produce congestión y elevados tiempos de espera.

Para resolver el problema de la optimización de semáforos se utilizan aplicaciones en las cuales se crea un modelo con todas las características representativas de la red que se desea simular, esto es geometría, demanda y configuración del tráfico. También es necesario indicar las funciones objetivo y el modelo de optimización que se utilizará. Las funciones objetivo más ampliamente utilizadas incluyen las demoras o una combinación ponderada entre las demoras y las detenciones. Con estos datos el programa de optimización asigna los repartos óptimos del semáforo. Además es posible estimar una serie de indicadores de rendimiento de la red.

Existen principalmente dos enfoques de optimización, por un lado optimización directa, que utiliza modelos macroscópicos para evaluar demandas basadas en perfiles de salida y de llegada obteniéndose así los tiempos optimizados directamente. Por otro lado está el enfoque indirecto que combina el proceso de simulación macroscópica mencionado anteriormente con la simulación

microscópica. Los métodos de optimización indirectos consisten en utilizar modelos macroscópicos donde se obtienen óptimos iniciales, los que luego son afinados mediante simuladores microscópicos.

Existen diversos programas de optimización de semáforos, dentro de los programas que utilizan modelos macroscópicos los más usados son SYNCHRO y TRANSYT, mientras que dentro de los microsimuladores se encuentran AIMSUN, CORSIM, SIMTRAFFIC, y VISSIM.

3.4 Estudios Anteriores

Uno de los primeros estudios que evaluó programaciones de semáforos utilizando microsimulación fue realizado por Park (Park et al. 2001), quien investigó el desempeño de los óptimos obtenidos mediante TRANSYT-7F desde dos perspectivas (a) el efecto de los criterios de optimización seleccionados, y (b) optimalidad de los resultados de TRANSYT-7F cuando son evaluados en un entorno estocástico.

El método aplicado consistió en una red de prueba calibrada en Chicago de 9 intersecciones señalizadas con 50 nodos y 74 enlaces. Se utilizó el microsimulador CORSIM y se evaluaron doce funciones objetivo de optimización en TRANSYT-7F. El estudio consideró las condiciones de flujo congestionado y no congestionado. Se concluyó que si bien existía una buena correlación entre las medidas de desempeño correspondientes para TRANSYT-7F y CORSIM bajo condiciones de flujo libre, ésta correlación disminuía en condiciones congestionadas.

Rouphail et al. (2000) propuso un procedimiento basado en los óptimos de TRANSYT-7F y utilizarlos como solución inicial factible en un método de optimización estocástico basado en algoritmo genético (GA) que utiliza CORSIM para evaluar cada alternativa. El objetivo del estudio es probar si el uso de GA puede mejorar los óptimos de TRANSYT-7F generados inicialmente. Las pruebas se realizaron en una red de Chicago consistente en nueve intersecciones señalizadas y se utilizaron 2 medidas de eficacia: el tiempo de espera y el tiempo total en la red. Se demostró que el GA produce óptimos mejores que los obtenidos mediante TRANSYT-7F. El GA redujo el tiempo de espera en un 53% y los retrasos en un 37%.

Más tarde, Park (2003) evaluó los programas de optimización de semáforos existentes, incluyendo SYNCHRO, TRANSYT-7F y la optimización de algoritmo genético (GA) utilizando datos reales recogidos en Virginia. Como un primer paso, un modelo de simulación microscópica, VISSIM, fue calibrado y validado extensivamente usando datos de campo. Múltiples corridas de simulación

fueron hechas para la optimización de las señales, de tal manera que el comportamiento del conductor, la variación del tráfico día a día, etc. fueran considerados en la evaluación. Se evaluaron cinco programaciones en la red de prueba, que consistió en 12 intersecciones señalizadas a lo largo de la ruta 50 en el norte de Virginia. Las programaciones en evaluación incluyen (a) el antiguo plan de sincronización del Departamento de Transporte de Virginia (VDOT), (b) el plan de calendario actual de VDOT, (c) el plan de optimización del algoritmo genético, (d) el plan de optimización SYNCHRO, y (e) los planes optimizados de TRANSYT-7F. Los resultados del estudio indican que el actual procedimiento de optimización VDOT mejoró significativamente con respecto al antiguo plan, al reducir los tiempos de viaje en un 17 % y un retraso total del sistema en un 36 %. Las tres programaciones " optimizado " no aportaron mejoras significativas.

Otro estudio (Stevanovic y Martin, 2006) evaluó una arteria real en Park City con 12 intersecciones. Los óptimos se obtuvieron utilizando los programas SYNCHRO y TRANSYT-7F y fueron evaluados utilizando los microsimuladores CORSIM, SIMTRAFFIC, y VISSIM. Todos los programas fueron utilizados con sus parámetros por defecto. Los resultados muestran que cuando las programaciones optimizadas macroscópicamente están sujetos a una amplia evaluación a través de microsimulación, se registran inconsistencias sistemáticamente, y sugieren que estas inconsistencias podrían mejorarse ajustando los parámetros de simulación por defecto. Además la optimización directa utilizando GA en CORSIM no generaron óptimos significativamente mejores que los generados por TRANSYT-7F y SYNCHRO. Se concluye que las herramientas de microsimulación de tráfico no siempre son confiables para evaluar programaciones de semáforos optimizadas macroscópicamente.

Finalmente, Álvarez (2008) investigó si el ajuste de los parámetros de modelos de simulación macroscópicas con respecto al modelo de simulación microscópica puede eliminar o reducir las diferencias entre ambos modelos. Los parámetros ajustados incluyen parámetros del modelo de dispersión del pelotón, las tasas de flujo de saturación, y las velocidades promedio. Los principales parámetros para caracterizar los sistemas fueron la configuración de red, número de carriles, longitud de enlace y la demanda de tráfico. Para la evaluación se utilizó el macrosimulador TRANSYT-7F y el microsimulador CORSIM. Los resultados mostraron que el ajuste de los valores de calibración por defecto tienen efectos significativos en la mejora de la evaluación a través de microsimulación, en particular, el ajuste de velocidad y las tasas de flujo de saturación puede tener un impacto significativo en la mejora de la optimización. Además se concluyó que a medida que la red se hace más compleja el efecto de los ajustes tiende a disminuir.

4 MODELOS DE TRÁFICO

Como se mencionó antes, hay varios modelos que se pueden utilizar para obtener programaciones de semáforos optimizadas y para simular sistemas de tráfico. En este estudio se utilizó TRANSYT-14 que utiliza un modelo de simulación macroscópica y AIMSUN versión 7 que es un microsimulador de tráfico.

En este capítulo se describen las características y el funcionamiento de los modelos de tráfico que utilizan TRANSYT 14 y AIMSUN respectivamente.

4.1 Modelo TRANSYT 14

TRANSYT 14 permite simular y optimizar una red vial urbana, mediante la modificación de la programación de los semáforos de dicha red. Es decir, permite encontrar la programación de las intersecciones semaforizadas de una red de forma que al coordinar estas se logre reducir al mínimo algún índice de desempeño como por ejemplo: demoras, tiempo de viaje, consumo de combustible etc.

La función objetivo que minimiza TRANSYT se denomina Índice de Rendimiento (Performance Index), el cual consiste en una combinación lineal de demoras y detenciones como se indica en la Ecuación 1:

$$PI = \sum_{i=1}^N \left(W * w_i * d_i + \frac{k}{100} * k_i * s_i \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

W : Costo promedio de demora.

w_i : Ponderador demora del arco i .

d_i : Demora del arco i .

$\frac{k}{100}$: Costo promedio de 100 detenciones.

k_i : Ponderador detenciones del arco i .

s_i : Detenciones del arco i .

El proceso de optimización realizado por TRANSYT consiste básicamente en alterar según tasas de incremento predefinidas las programaciones y determinar si se produce crecimiento o decrecimiento del PI, en caso de que decrezca, se continúa modificando la programación en el mismo sentido hasta llegar al mínimo, en caso contrario se va en el sentido inverso. Esto se repite cierta cantidad de veces a fin de obtener las programaciones óptimas. El proceso descrito se conoce como Hill-Climbing (manual de usuario TRANSYT 14, 2010).

El método TRANSYT, así como sus principales datos requeridos y resultados se presentan a continuación en la Figura 2.

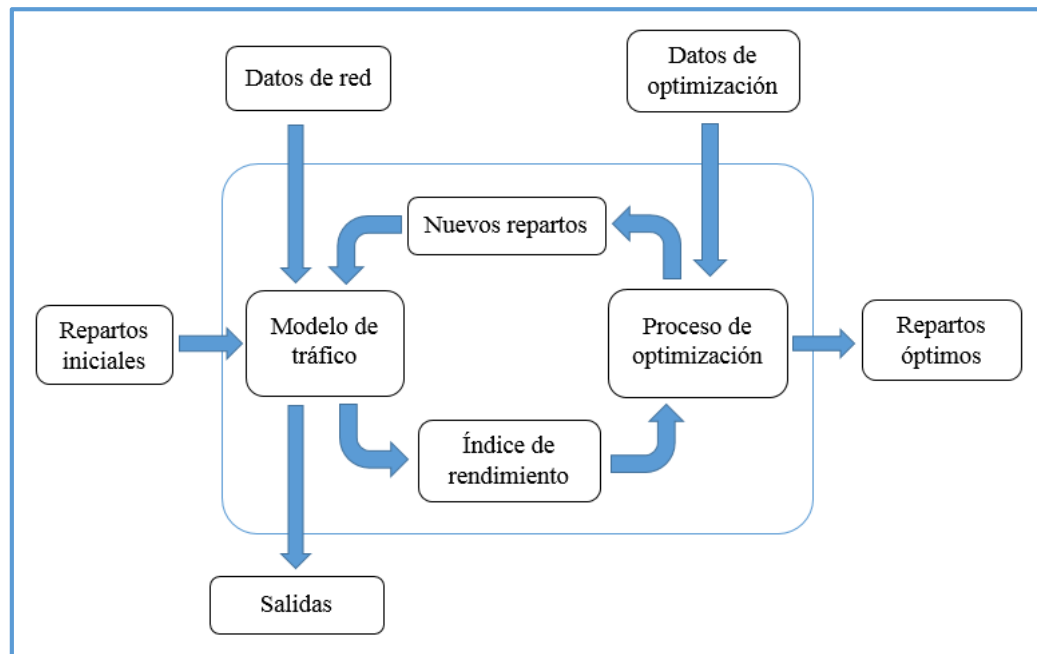


Figura 2. Esquema del método TRANSYT.
(Fuente: Manual de usuario TRANSYT 14)

4.1.2 Supuestos Básicos

El modelo utilizado en TRANSYT considera los siguientes supuestos:

- a) Todas las intersecciones importantes de la red se encuentran controladas por semáforos, el resto cuenta con una regla de prioridad definida.
- b) Todas las intersecciones semaforizadas de la red tienen un ciclo común o un ciclo que es la mitad de este, además se conocen en detalle los repartos y las restricciones de verde de cada una.

- c) Para cada arco de la red, durante el período de modelación el flujo que circula se conoce y se considera constante, vale decir la demanda es conocida y fija.

4.1.3 Modelo de Dispersión de Pelotones

Uno de los supuestos básicos que realiza el modelo TRANSYT para la simulación del comportamiento de los flujos es que los vehículos que salen de una intersección lo hacen en pelotones que se van dispersando a medida que se distancian del punto de partida. Dicha dispersión se puede ejemplificar con los perfiles de llegada que se muestran en la Figura 3:

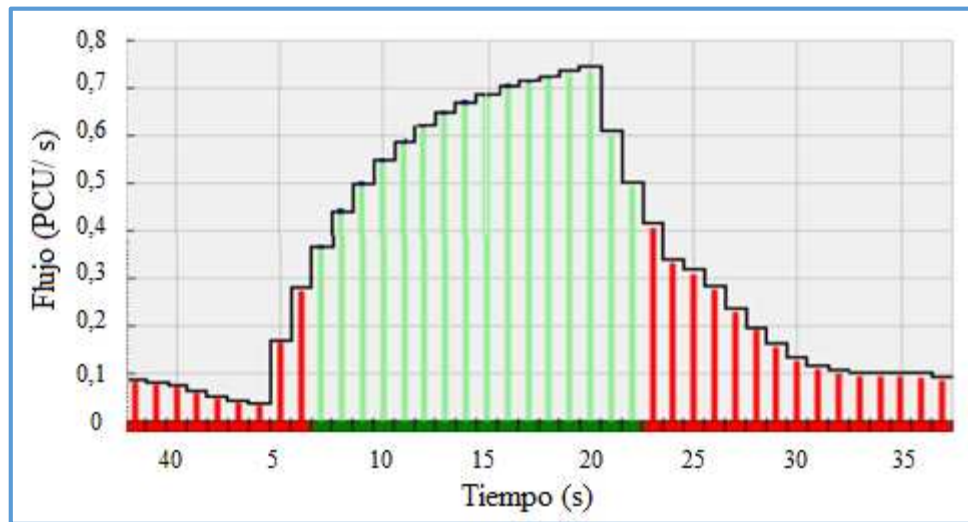


Figura 2. Perfil de llegada aguas debajo de la intersección.

(Fuente: Manual de usuario TRANSYT 14)

El tráfico que circula por el arco es obtenido por la combinación apropiada de las fracciones de flujo de los perfiles de salida de los arcos aguas arriba o arcos aportantes. El perfil del flujo total del arco es desplazado en el tiempo y se modifica su forma debido a las diferentes velocidades de los vehículos individuales y pelotones de vehículos que circulan a lo largo del arco. Según este principio, TRANSYT utiliza la fórmula recursiva que se indica en la Ecuación 2 para determinar el flujo en cada intervalo de tiempo, de acuerdo al flujo del intervalo anterior y el modelo de dispersión del pelotón.

$$q_u(i+t) = F * q_E(i) + (1-F) * q_u(i+t-1) \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

q_u : Flujo de llegada.

q_E : Flujo de entrada.

i : Intervalo de análisis.

t : Moda de la distribución.

Por su parte el factor de dispersión se calcula como se indica en la Ecuación 3:

$$F = \frac{1}{\left(1 + \frac{K * t}{100}\right)} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

K : Valor del coeficiente de dispersión.

t : Tiempo de viaje entre líneas de parada medido en pasos de simulación.

La formulación de la ecuación 1 depende directamente del modelo de dispersión adoptado, la cual supone una distribución cuasi - geométrica.

Por defecto K tiene un valor de 35, el cual ha demostrado ser bastante típico. Sin embargo resulta recomendable comprobar si para la locación específica de la red el valor típico no introduce un error significativo.

4.2 Modelo AIMSUN

AIMSUN es un simulador de tráfico microscópico para redes urbanas, autopistas, carreteras, rotondas, arterias y cualquier combinación de ellas.

El modelo utilizado en AIMSUN sigue una aproximación de la simulación microscópica. Esto significa que el comportamiento de cada vehículo en la red se modela continuamente a lo largo del periodo de tiempo de simulación mientras viaja a través de la red de tráfico, según varios modelos de comportamiento de vehículo tales como el modelo de seguimiento vehicular (car-following, ver Anexo A), el modelo de cambio de pistas (lane changing, ver Anexo A), entre otros. Estos modelos serán descritos en secciones posteriores.

Existen elementos continuos del sistema (vehículos, detectores) cuyos estados cambian continuamente durante el tiempo simulado, el cual es dividido en intervalos de tiempo fijos llamado

ciclos de simulación. Hay otros elementos, como semáforos y puntos de entrada, cuyos estados cambian discretamente en puntos específicos de la simulación. El sistema proporciona además un modelo detallado de la red de tráfico, distingue entre diferentes tipos de vehículos y conductores y permite crear una amplia gama de geometrías en la red. También puede modelar maniobras contradictorias inesperadas para los conductores.

Como se mencionó anteriormente AIMSUN utiliza una serie de procesos estocásticos a nivel microscópico para simular el flujo de tráfico de una forma más realista. En la Figura 4 se muestra una representación gráfica de la dispersión del pelotón de acuerdo a AIMSUN.

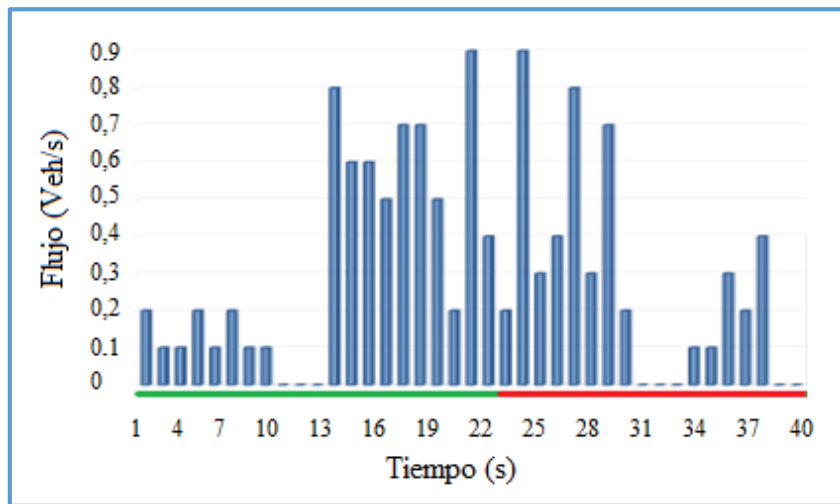


Figura 4. Dispersión del pelotón de acuerdo a AIMSUN

(Fuente: Elaboración propia)

4.2.1 Modelos Utilizados en AIMSUN

A continuación se resumen los principales modelos que utiliza AIMSUN, la descripción en detalle de estos modelos se encuentra en el Anexo A.

a) Modelo de seguimiento vehicular (car-following)

Está basado en el modelo de Gipps (1981, 1986), con algunas modificaciones, determina el comportamiento de un vehículo dependiendo de su entorno, generando velocidades y aceleraciones de cada vehículo. Está compuesto principalmente por dos componentes:

- Aceleración: representa la intención de un vehículo de alcanzar cierta velocidad deseada.
- Desaceleración: reproduce las limitaciones impuestas por el vehículo precedente al tratar de conducir a la velocidad deseada.

Este modelo establece que la máxima velocidad deseada a la que un vehículo n puede acelerar durante un intervalo de tiempo (n, t + T) está dada por la Ecuación 4:

$$V_a(n, t+T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

$V(n, t)$: Velocidad del vehículo n en el momento t.

$V^*(n)$: Velocidad deseada por el vehículo n.

$a(n)$: Máxima aceleración del vehículo n.

T : Tiempo de reacción o intervalo de simulación.

Por otra parte, cuando un vehículo debe disminuir su velocidad debido a la presencia de vehículos que lo preceden, la velocidad queda determinada por la Ecuación 5 para cada intervalo de tiempo:

$$V_b(n, t+T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t)T \frac{V(n-1, t)^2}{d(n-1)} \right]} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

$d(n)$: (<0) Es la máxima desaceleración deseada por el vehículo n.

$x(n, t)$: Es la posición del vehículo n en el momento t.

$x(n-1, t)$: Es la posición del vehículo precedente (n-1) en el momento t.

$s(n-1)$: Es la longitud efectiva del vehículo (n-1).

$d(n-1)$: Es una estimación de la desaceleración deseada del vehículo (n-1).

La velocidad definitiva del vehículo n durante el intervalo (n, t + T) es el mínimo entre las dos velocidades definidas previamente. Luego, la posición del vehículo n es actualizada considerando esta velocidad dada por la Ecuación 6:

$$X(n, t+T) = X(n, t) + V(n, t+T)T \quad \text{Ec. (6)}$$

AIMSUN utiliza los modelos de Gipps con algunas modificaciones, las cuales se enumeran y se explican en detalle en el Anexo A.

b) Modelo de cambio de pista (lane changing, Anexo A)

Este modelo fue desarrollado por Gipps (1986). En cada intervalo de tiempo cada automovilista se pregunta si es necesario cambiar de pista, ya sea para aumentar la velocidad (tomar pista rápida), o reducirse debido a un cambio a la pista lenta o por la proximidad de un giro en su trayecto para lo cual toma en cuenta la distancia para el giro y las condiciones del tráfico.

Si es necesario realizar este cambio de pista se debe contestar dos preguntas más. ¿es deseable el cambio?, esto con respecto a las condiciones de tráfico que tendrá en la otra pista en términos de velocidad o tamaño de la cola y ¿Es posible cambiar pista. Para hacer esto se toma en cuenta el frenado que imponen tanto el próximo vehículo aguas abajo y aguas arriba de la pista a la cual se quiere cambiar. Si estos dos valores son aceptables entonces es posible el cambio.

Para entender este modelo es necesario tener claro el concepto de GAP. Este es el avance en una pista con mayor flujo, el cual es evaluado por el conductor del vehículo que se encuentra en un flujo menor y que desea unirse a la pista con mayor flujo. El gap es expresado en unidades de tiempo (tiempo gap) y en unidades de espacio (espacio gap).

Para representar el comportamiento del conductor al momento de cambiarse de pista se han definido tres zonas en una sección, cada una de las cuales corresponde a distintas motivaciones para el cambio de pistas.

- Zona 1: los cambios dependen de las condiciones de tráfico presentes.
- Zona 2: la mayor cantidad de cambios de pistas se producen en esta zona. Se busca estar en la pista desde la cual se puede efectuar el movimiento deseado en la intersección. Se busca el gap necesario y se realiza el cambio, sin afectar el comportamiento de las pistas adyacentes.
- Zona 3: los vehículos son forzados a ingresar a la pista desde la cual es posible ejecutar el viraje. Para lograr esto, su velocidad es reducida, incluso llegando a detenerse completamente. Incluso los vehículos de las pistas adyacentes alteran su comportamiento permitiendo que los vehículos que desean realizar el cambio encuentren el Gap necesario.

5 COMPARACIÓN DE MODELOS

En este capítulo se desarrollará una metodología para comparar los resultados de los modelos de simulación considerados. Para esto primero se crearon casos de prueba y se ajustaron los parámetros de modo que fueran comparables.

5.1 Casos de Prueba

Para efectos de este estudio se diseñaron dos sistemas de prueba que representan las intersecciones más típicas que se pueden encontrar en Chile y se describen a continuación.

5.1.1 Caso A

El caso A es el sistema más simple y consta de una única intersección de dos pistas unidireccionales, tal como se muestra en la Figura 5. Los principales parámetros a caracterizar son las demandas Q_1 y Q_2 , la capacidad C y la velocidad media V_{me} . Además la intersección constara de dos fases con sus respectivos movimientos.

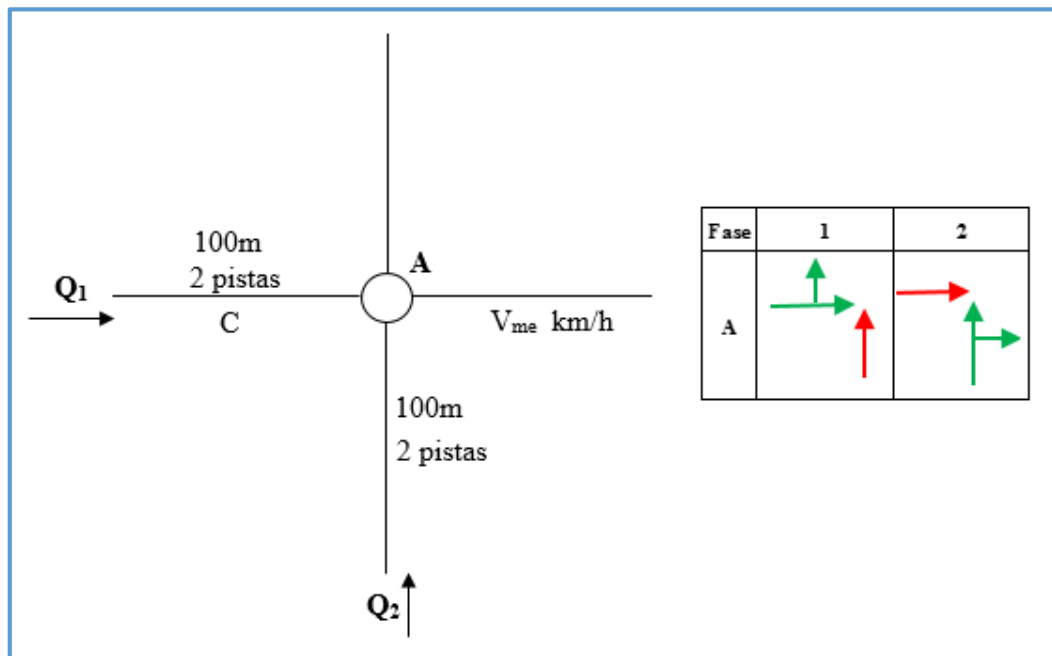


Figura 5. Geometría y configuración sistema A

(Fuente: Elaboración propia)

5.1.2 Caso B

El segundo sistema a evaluar corresponde a dos intersecciones de dos pistas unidireccionales como se indica en la Figura 6. Los principales parámetros a caracterizar son las demandas Q_1 , Q_2 y Q_3 , la capacidad C y la velocidad media V_{me} . Además las intersecciones tendrán dos fases.

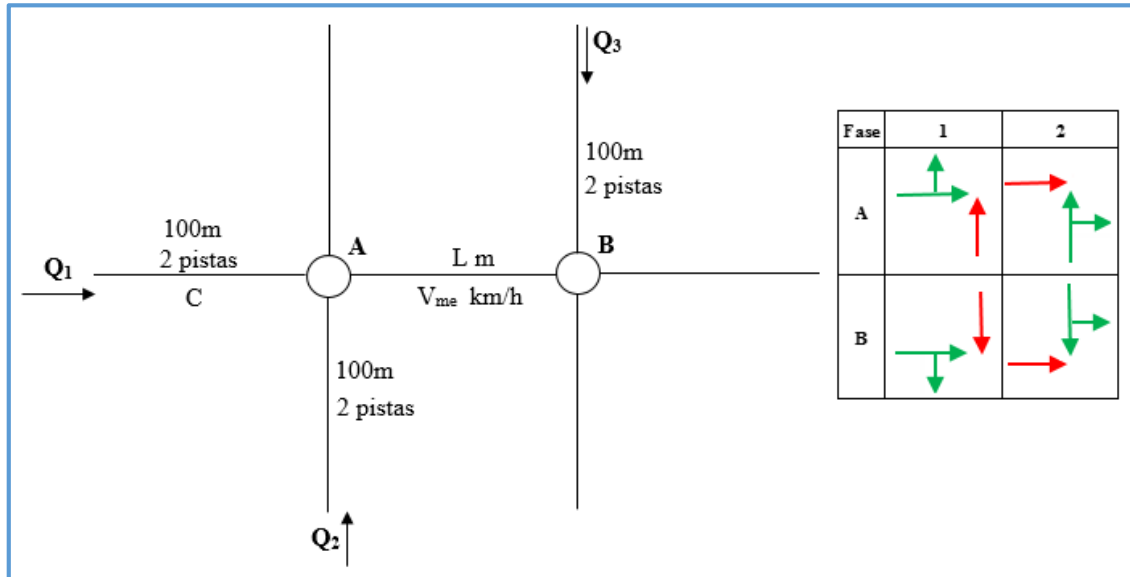


Figura 6. Geometría y configuración sistema B
(Fuente: Elaboración propia)

5.2 Ajuste de Parámetros

Una vez modelados los casos de prueba se verificó que se estuviera representando lo mismo en cada programa comparando los siguientes parámetros:

- Capacidad
- Flujo
- Grado de saturación

Se encontró que el parámetro más sensible a los cambios y por lo tanto el más importante de ajustar de los mencionados anteriormente fue el valor de la capacidad (C).

Los ajustes se realizaron sobre la base de las calibraciones realizadas por Ortiz (2006) para flujo interrumpido en la ciudad de Concepción. (Ver anexo C, Tabla C1).

5.3 Medidas de Rendimiento

Una vez realizado el ajuste de parámetros se escogieron las medidas de rendimiento a utilizar para la obtención de óptimos. Para esto se analizaron las salidas que entrega cada simulador y se buscó las que fueran comparables entre sí y que fueran importantes de evaluar.

Se eligieron 2 medidas de rendimiento:

- Demoras
- Tiempo de viaje

Se escogió la demora ya que es uno de los parámetros que componen la función objetivo que minimiza TRANSYT 14 (Ecuación 1).

Por otro lado se escogió el tiempo de viaje porque este afecta directamente en la percepción de los usuarios de la eficiencia del sistema de tráfico y por lo mismo es una medida importante de minimizar y luego evaluar.

5.4 Metodología de Comparación

Se diseñó un procedimiento para encontrar óptimos y comparar resultados, esta metodología se basa en encontrar el ciclo óptimo en cada modelo y contrastar los resultados. En la Figura 7 se muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada.

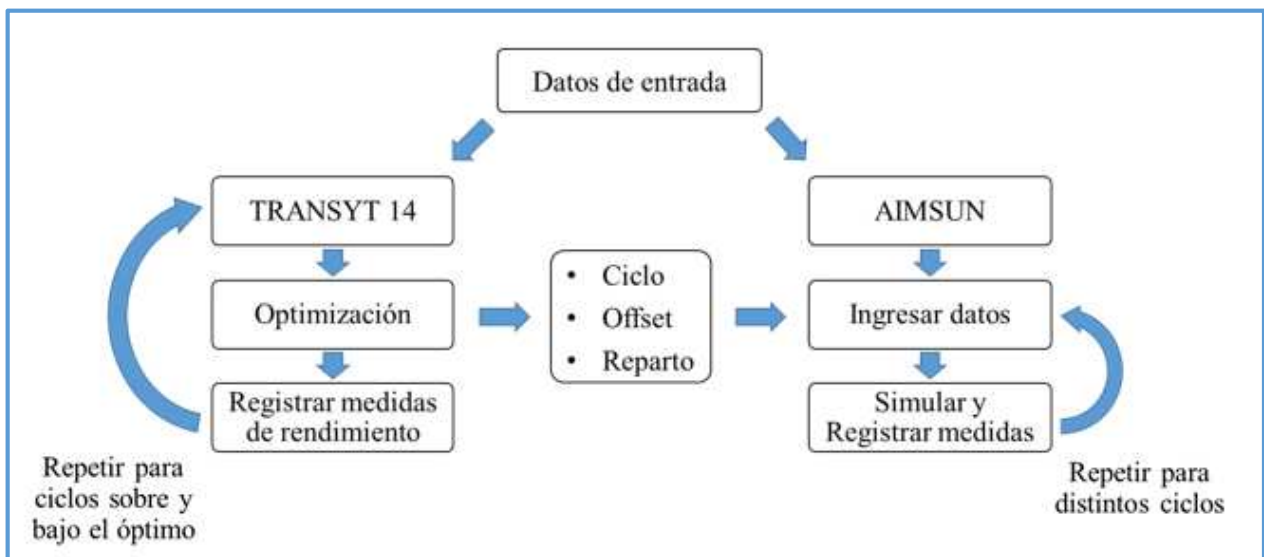


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología utilizada

(Fuente: Elaboración propia)

El proceso de comparación consta de dos partes. Por un lado utilizando el modelo creado en TRANSYT 14 se ingresan los datos de entrada del escenario y se corre el programa encontrando un ciclo óptimo y se registran los valores de las medidas de rendimiento seleccionadas, Luego se repite este procedimiento para ciclos sobre y bajo el óptimo hasta obtener una tendencia clara.

Por otro lado en el modelo creado en AIMSUN se ingresa la misma información del escenario y se ingresan además como dato inicial el tiempo de ciclo, offset y repartos óptimos encontrados según TRANSYT 14 luego se corre el microsimulador y se registran las medidas de rendimiento, este proceso se repite para distintos tiempos de ciclo hasta encontrar un óptimo según AIMSUN. Además es importante señalar que para tener una mayor confiabilidad de los resultados entregados por AIMSUN y debido a la variabilidad de resultados del modelo estocástico se realizaron diez replicaciones de simulación para cada escenario analizado, obteniendo la media de estas replicaciones como resultado final.

5.5 Escenarios de Prueba

Para identificar bajo qué condiciones se registraban diferencias importantes en los resultados se crearon múltiples escenarios los cuales se dividieron en cuatro etapas, una para el caso A (Figura 5) y tres para el caso B (Figura 6).

5.5.1 Caso A

- a) Variación de demanda: En esta etapa se investigó como afecta la variación de demanda a los óptimos encontrados con TRANSYT 14 y AIMSUN. Para ello se fueron aumentando los flujos de entrada Q_1 y Q_2 (Figura 5) en un rango de saturaciones entre 0.45 y 1.1.

5.5.2 Caso B

- a) Variación de demanda: En esta etapa, al igual que para el Caso A, se fueron aumentando los flujos de entrada Q_1 , Q_2 y Q_3 (Figura 6) en un rango de saturación entre 0,6 y 1,3.
- b) Variación de distancia entre semáforos: Se evaluó el efecto del aumento de la distancia L entre las intersecciones semaforizadas (Figura 6).
- c) Variación de la velocidad media: En esta etapa se evaluó el efecto del aumento de la velocidad media V_{me} en la red (Figura 6), el resto de los datos de entrada se mantuvo constante.

6 RESULTADOS

En este capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos en el estudio.

6.1 Resultados Caso A

6.1.1 Variación de Demanda.

En este escenario se evaluó el efecto que provoca aumentar proporcionalmente los flujos de entrada del sistema sobre los óptimos para TRANSYT y AIMSUN. Los resultados encontrados se muestran en la Figura 8.

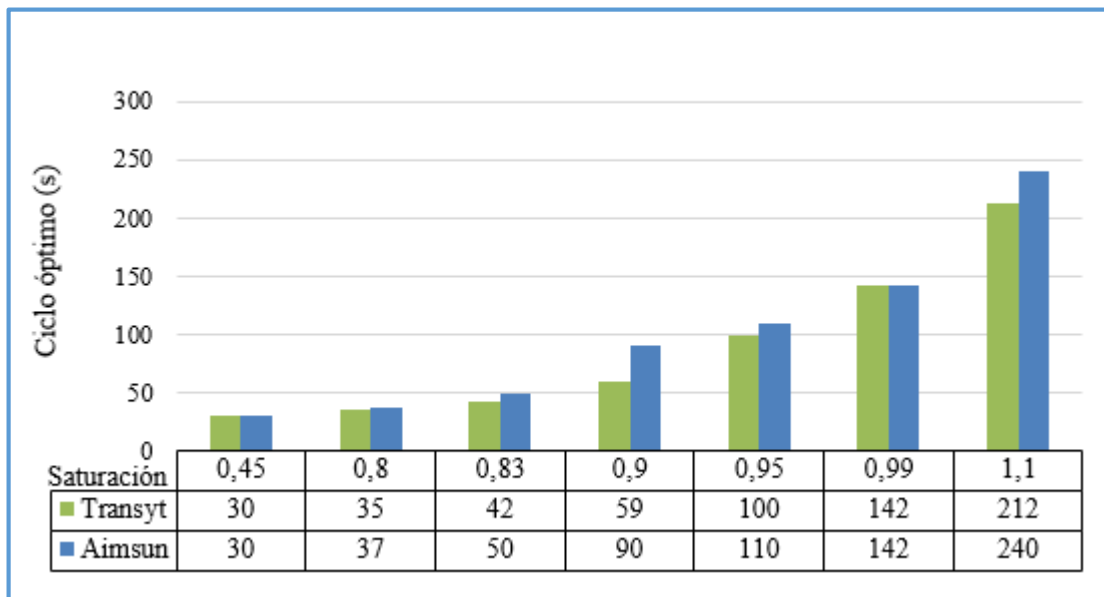


Figura 8. Comparación de óptimos para distintas saturaciones

(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados indican que para saturaciones bajas no se registran diferencias importantes, sin embargo al llegar a una saturación del orden de 0,8 el óptimo encontrado mediante microsimulación es levemente mayor y va en aumento hasta llegar a una saturación de 0,9 donde la brecha alcanza un máximo de 31 segundos de diferencia, luego al aumentar la saturación del sistema se observa una disminución de esta brecha hasta hacerse nula nuevamente cuando se llega a la saturación completa. Finalmente al sobresaturar el sistema hasta 1.1 nuevamente se observa un considerable aumento del óptimo encontrado con AIMSUN.

6.2 Resultados Caso B

6.2.1 Variación de Demanda

En este escenario se investigó si el aumento del grado de saturación produciría los mismos efectos que en el sistema A cuando se considera un sistema con 2 intersecciones semaforizadas. En la Figura 9 se muestran los resultados encontrados.

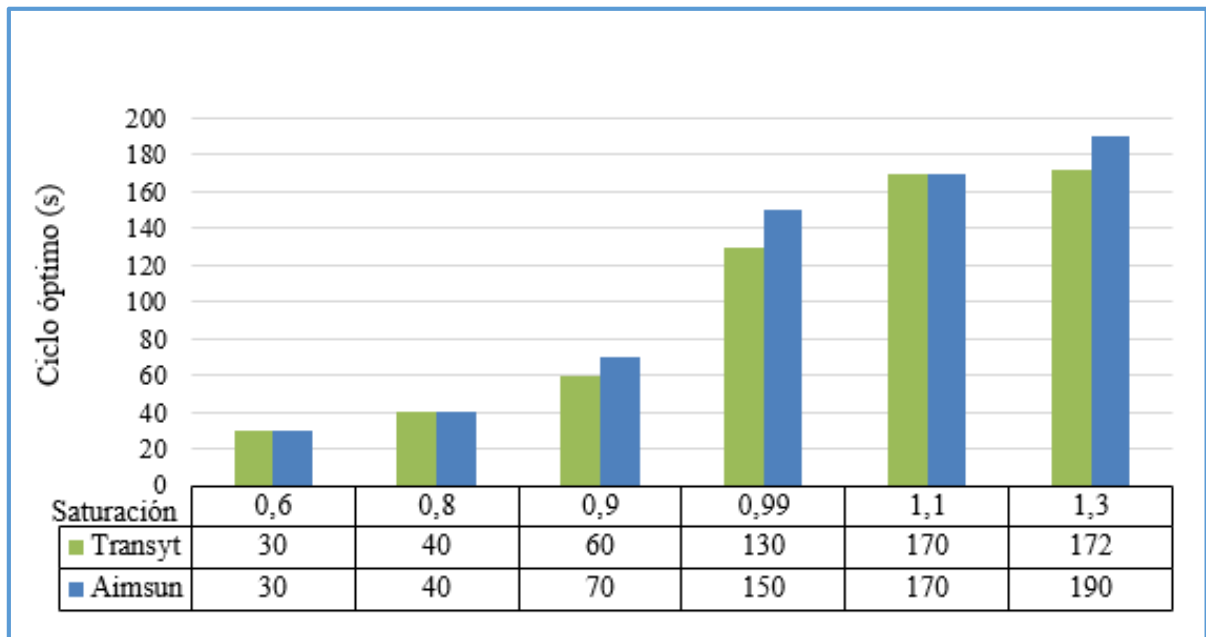


Figura 9. Comparación entre óptimos para distintas saturaciones

(Fuente: Elaboración propia)

Los resultados en este caso indican que existe una correlación con el escenario anterior ya que nuevamente para saturaciones menores que 0,8 no se encuentran diferencias importantes y al ir aumentando la saturación, AIMSUN registra un ciclo superior pero esta vez hasta el límite de saturación, llegando hasta los 20 segundos por sobre el óptimo encontrado según TRANSYT 14, luego la brecha disminuyó hasta igualarse nuevamente en torno a una saturación de 1.1, y cuando se siguió aumentando los flujos nuevamente se registró un tiempo de ciclo óptimo superior para el microsimulador AIMSUN.

6.2.2 Variación de distancia entre semáforos

En este escenario se buscó evaluar si el aumento de la longitud del enlace que une las intersecciones semaforizadas afecta la consistencia entre TRANSYT 14 y AIMSUN. La longitud se fue

aumentando desde una situación base de 100 metros hasta los 500 metros. Los resultados se indican en la Figura 10.

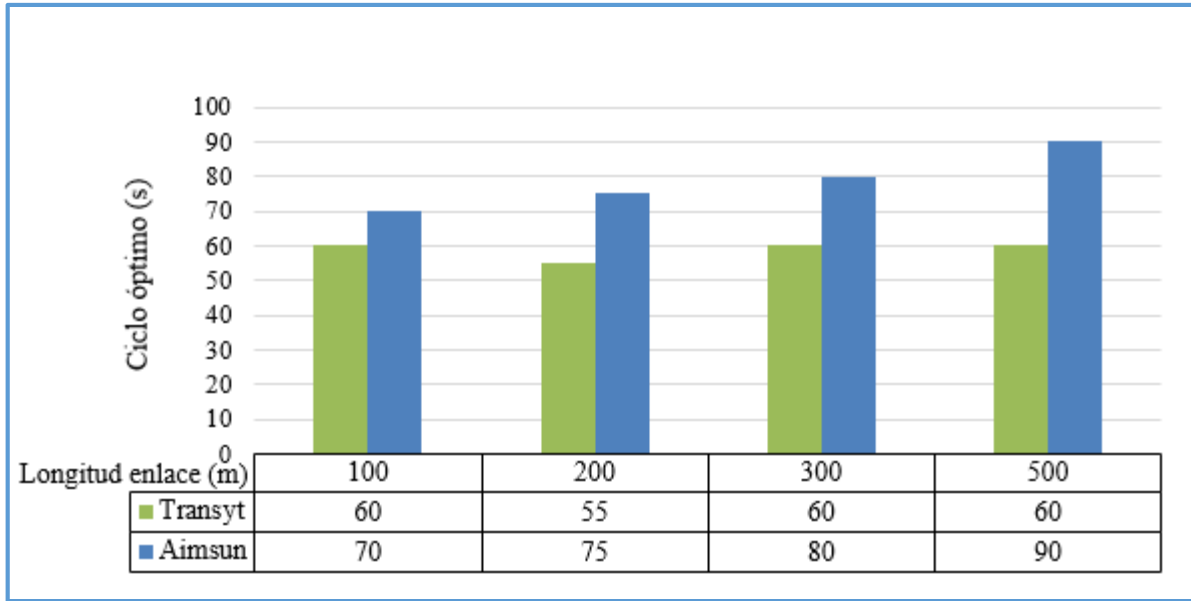


Figura 10. Comparación entre óptimos para distintas distancias entre semáforos
(Fuente: Elaboración propia)

De los resultados mostrados se puede observar una clara tendencia ya que a medida que aumenta la distancia entre las intersecciones, el ciclo óptimo encontrado con AIMSUN es cada vez mayor mientras que el óptimo según TRANSYT 14 se mantiene prácticamente inalterado ante este cambio, por lo que las diferencias encontradas aumentan.

Esto se explica debido a la dispersión del flujo de cada modelo, que al recorrer una distancia mayor se hace cada vez más notoria la diferencia. También se puede inferir que la distancia entre semáforos no es un factor influyente en el cálculo del ciclo óptimo según TRANSYT 14.

6.2.3 Variación de la velocidad media

En un último escenario se evaluó el efecto que produciría un aumento de la velocidad promedio experimentada por un vehículo en la red. Se evaluó para velocidades medias entre los 15 y 22 km/h y los resultados se indican en la Figura 11.

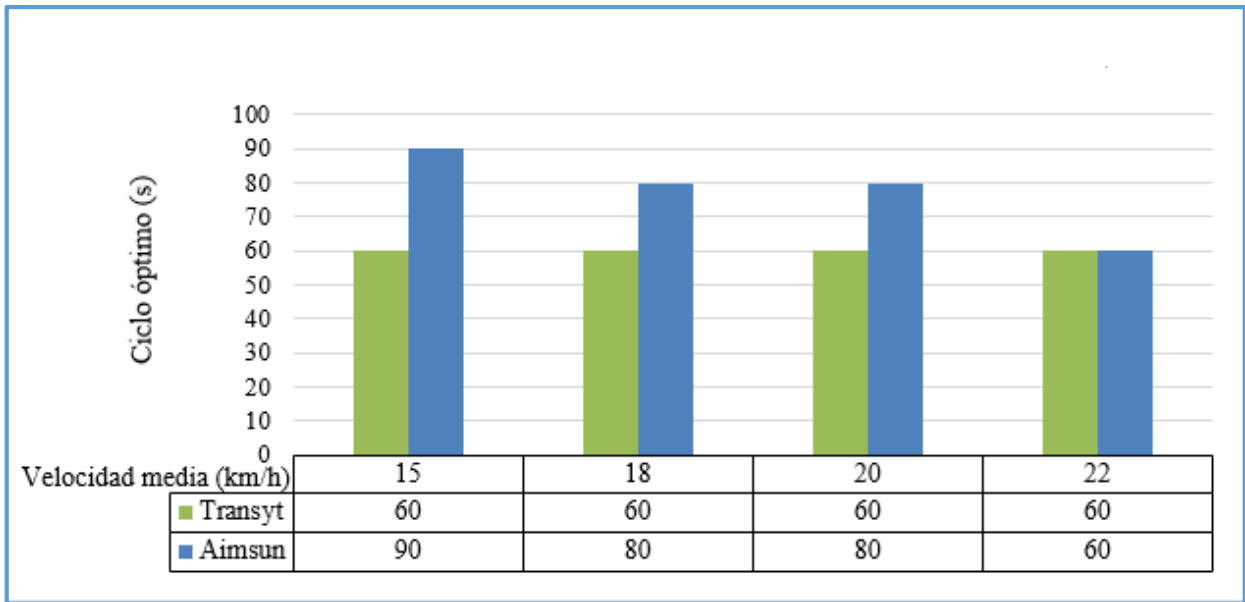


Figura 11. Comparación entre óptimos para distintas velocidades
 (Fuente: Elaboración propia)

En la figura se observa que el cambio de la velocidad promedio mantiene inalterado el valor del ciclo óptimo según TRANSYT 14 lo que sugiere que esta variable no es influyente en el cálculo del ciclo óptimo. Por otro lado en AIMSUN se observa que a bajas velocidades se registran ciclos óptimos altos los que van disminuyendo a medida que aumenta la velocidad debido a que a mayores velocidades se usan ciclos más cortos para no generar colas.

7 CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se aplicará la metodología a una sección de prueba en el Gran Concepción y se evaluará el efecto de la variabilidad del tráfico sobre este sistema.

7.1 Zona a Modelar

Se modeló un corredor con tres intersecciones en las calles céntricas de la ciudad de Concepción. En la Figura 12 se muestra una fotografía aérea de la zona de estudio.



Figura 12. Plano de la zona modelada

(Fuente: Elaboración propia)

Se ajustaron los parámetros de acuerdo a las calibraciones de Ortiz, 2006 para la misma zona y los flujos se ingresaron en base a las mediciones de terreno realizadas por Ortiz, 2006 (Anexo C, Tabla C1)

7.2 Análisis y Resultados

Una vez modelado y ajustados los parámetros correspondientes para TRANSYT 14 y AIMSUN se aplicó la metodología descrita en la sección 5.5.

Los resultados se muestran en la Tabla 1.

ciclo	AIMSUN		TRANSYT 14	
	demora (s)	t viaje (s)	demora (s)	t viaje (s)
30	94,65	117,17	9,82	18,55
35	73,50	96,11	8,62	17,62
40	66,57	89,22	8,29	17,29
46	69,20	91,79	8,38	17,38
50	69,92	92,42	8,51	17,51

Tabla 1. Registro de las medidas de rendimiento para TRANSYT 14 y AIMSUN

(Fuente: Elaboración propia)

En la tabla se observa que tanto para la demora como para el tiempo de viaje los ciclos óptimos encontrados con TRANSYT 14 siguieron siendo óptimos cuando se evaluaron con AIMSUN lo cual es consistente con lo encontrado teóricamente para una saturación promedio de 0,8 y más de una intersección.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ❖ El análisis de los estudios anteriores reveló que las programaciones optimizadas macroscópicamente al ser evaluadas a través de microsimulación y se utilizan los parámetros de ajuste por defecto se registran inconsistencias sistemáticamente. Por otro lado al ajustar los parámetros por defecto de los modelos se mejoran las inconsistencias y se obtiene una buena correlación entre los resultados obtenidos, sin embargo, bajo una condición de congestión o al aumentar la complejidad de la red, esta correlación disminuía y el efecto del ajuste de los parámetros disminuye su efecto.
- ❖ Para todos los escenarios en que se registraron diferencias entre los ciclos óptimos, el óptimo encontrado a través de microsimulación fue un ciclo mayor y disminuyó el rendimiento de la red.
- ❖ Se encontró que para los dos sistemas evaluados los óptimos coinciden bajo condición de saturación menor o igual a 0,8. Para saturaciones mayores a 0,8 las diferencias se van acrecentando hasta llegar al punto de saturación donde
- ❖ En el Caso B se encontró que el aumento en la longitud del enlace entre semáforos produce mayor diferencia entre los tiempos de ciclo optimizados, esto se debe a la diferencia en la dispersión de pelotones de cada modelo a medida que se alejan del punto de partida.
- ❖ En TRANSYT 14 el aumento de la longitud entre semáforos y la variación de la velocidad media no produjeron cambios en el tiempo de ciclo óptimo mientras que para AIMSUN si se identifica una tendencia clara, esto se puede explicar debido a la diferencia básica de los modelos uno es determinista y el otro es estocástico.
- ❖ La aplicación de la metodología diseñada sobre el corredor del Gran Concepción demostró ser consistente con los resultados encontrados teóricamente para similares condiciones de tráfico.

- ❖ Finalmente se recomienda realizar este estudio considerando sistemas de tráfico más complejos y evaluar para múltiples medidas de rendimiento.

9 REFERENCIAS

Aimsun 8 user's manual. TSS- Transport Simulation System, 2013.

Álvarez. P., (2008). “*Evaluating the effectiveness of signal timing optimization based on microscopic simulation evaluation*”. M.Sc. Thesis, Florida International University, Miami, Florida

Ortiz L. (2006) “*Calibración de un Modelo de Microsimulación para Flujo Mixto Interrumpido, con Aplicación a la Ciudad de Concepción*”. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

Park, B., Roupail, N., Hochanadel, J., and Sacks, J. (2001). “*Evaluating Reliability of TRANSYT-7F Optimization Schemes.*” J. Transp. Eng., 127(4), 319–326.

Park, B. (2003). “*Evaluation of traffic signal timing optimization methods using a stochastic and microscopic simulation program.*” Contract Research, University of Virginia, Charlottesville, Virginia.

Roupail, N.; Park, B.; Sacks J. (2000), “*Direct Signal Timing Optimization: Strategy Development and Results*”.

Shannon R.E., (1988). “*Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación*”, Trillas, México.

Stevanovic, A; Martin, P.T. (2006) “*Evaluating the Reliability of Macroscopically Optimized Timing Plans Through Microsimulation*”. TRB 2006 Annual Meeting

TRANSYT 14 user guide, TRL Limited 2010, 2011.

ANEXOS

ANEXO A

En este anexo se describen en más detalle los modelos y sub-modelos que utiliza el microsimulador AIMSUN.

Modelos Utilizados por AIMSUN

Para modelar una red, el programa de microsimulación AIMSUN representa la información de los vehículos para luego actualizarla de acuerdo a los distintos modelos que caracterizan su movimiento. A continuación se presentan los dos modelos básicos que utiliza AIMSUN.

Modelo de seguimiento vehicular (car-following)

Está basado en el modelo de Gipps (1981, 1986), con algunas modificaciones, determina el comportamiento de un vehículo dependiendo de su entorno, generando velocidades y aceleraciones de cada vehículo. Está compuesto principalmente por dos componentes:

- Aceleración: representa la intención de un vehículo de alcanzar cierta velocidad deseada.
- Desaceleración: reproduce las limitaciones impuestas por el vehículo precedente al tratar de conducir a la velocidad deseada.

La aceleración representa la intención del conductor de alcanzar cierta velocidad máxima deseada y la desaceleración es la limitación impuesta por el vehículo precedente cuando el conductor quiere alcanzar esa velocidad máxima deseada. Este modelo establece que la máxima velocidad deseada a la que un vehículo n puede acelerar durante un intervalo de tiempo $(n, t + T)$ está dada por la Ecuación 1:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

$V(n, t)$: Velocidad del vehículo n en el momento t .

$V^*(n)$: Velocidad deseada por el vehículo n.

$a(n)$: Máxima aceleración del vehículo n.

T : Tiempo de reacción o intervalo de simulación.

Por otra parte, cuando un vehículo debe disminuir su velocidad debido a la presencia de vehículos que lo preceden, la velocidad queda determinada por la Ecuación 2 para cada intervalo de tiempo:

$$V_b(n, t+T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t)T \frac{V(n-1, t)^2}{d(n-1)} \right]}$$

Ec. (2)

Donde:

$d(n)$: (<0) Es la máxima desaceleración deseada por el vehículo n.

$x(n, t)$: Es la posición del vehículo n en el momento t.

$x(n-1, t)$: Es la posición del vehículo precedente (n-1) en el momento t.

$s(n-1)$: Es la longitud efectiva del vehículo (n-1).

$d(n-1)$: Es una estimación de la desaceleración deseada del vehículo (n-1).

La velocidad definitiva del vehículo n durante el intervalo (n,t + T) es el mínimo entre las dos velocidades definidas previamente. Luego, la posición del vehículo n es actualizada considerando esta velocidad dada por la Ecuación 3:

$$X(n, t+T) = X(n, t) + V(n, t+T)T \quad \text{Ec. (3)}$$

AIMSUN utiliza los modelos de Gipps con algunas modificaciones, las cuales se enumeran y se explican a continuación: la forma en que se calcula $V^*(n)$ en el modelo de Gipps, la influencia de los vehículos en pistas adyacentes y la influencia en la pendiente

i) La forma en que se calcula $V^*(n)$ en el modelo de Gipps

Un vehículo que circula libremente alcanza su $V^*(n)$ velocidad máxima deseada tomando en cuenta tres parámetros:

- Acatamiento de la velocidad: $q(n)$, que es el grado de acatamiento al límite de velocidad, el modelador puede agregarle una distribución de probabilidades con el fin de capturar el nivel de agresividad de los conductores.
- Velocidad máxima deseada por n : $V_{max}(n)$. Este es un parámetro del vehículo.
- Límite de velocidad de la sección: $S_{limit}(s)$, este es un parámetro de la sección.

El límite de velocidad para un vehículo n en la sección S , $S_{limit}(n,s)$, está dada por la Ecuación 4.

$$S_{limit}(n,s) = S_{limit}(s) * \theta(n) \quad \text{Ec. (4)}$$

Por lo tanto, la velocidad máxima deseada por el vehículo n en la sección S está dada por la Ecuación 5:

$$V_{max}(n,s) = \text{Min}[S_{limit}(n,s), V_{max}(n)] \quad \text{Ec. (5)}$$

Este ultimo valor es el mismo que en modelo de Gipps aparece denotado como $V^*(n)$.

ii) La influencia de los vehículos en pistas adyacentes

Se debe considerar que, AIMSUN toma en consideración el efecto que tienen cierto número de vehículos (N *vehicles*) manejando a menor velocidad por la pista de la derecha. El modelo calcula la velocidad media de los N vehículos que manejan aguas abajo por la pista de la derecha (*Mean Speed Vehicles Down*), considerando sólo a los vehículos que están a una cierta distancia máxima (*Maximum Distance*) y considerando por separado el caso de accesos y el de pistas en general.

Para el caso que la pista derecha sea un acceso, la velocidad máxima del vehículo puede ser igual al valor del parámetro *MeanSpeedVehiclesDown* más el valor del parámetro *MaximunSpeedDifferenceOnRamp* (otro parámetro local del modelo). Para el resto de las pistas de acceso la velocidad máxima del vehículo puede ser igual al valor del parámetro *MeanSpeedVehiclesDown* más *MaximunSpeedDifference* (otro parámetro local del modelo). Este procedimiento asegura que la diferencia de velocidades entre pistas adyacentes siempre será menor que *MaximunSpeedDifferenceOnRamp* en el caso de accesos y a *MaximunSpeedDifference* en el resto de los casos.

iii) La influencia en la pendiente

La pendiente de una sección influye en el comportamiento vehicular por medio de un aumento o reducción de la aceleración o de las capacidades de frenado, por tanto la aceleración del vehículo que es un parámetro local está dada por la Ecuación 9:

$$accel = Max \left\{ veh\ acc - \frac{pendiente * 9.81}{100}, veh\ acc * 0.1 \right\} \quad Ec. (6)$$

Esta formulación permite que la aceleración de un vehículo nunca pueda ser negativa, es más, nunca será menor que un 10% de su aceleración bajo pendientes de ninguna magnitud.

Modelo de cambio de pista (lane changing)

Este modelo fue desarrollado por Gipps (1986). En cada intervalo de tiempo cada automovilista se pregunta si es necesario cambiar de pista, ya sea para tomar una mayor velocidad (tomar pista rápida), un cambio a la pista lenta o por la proximidad de un giro en su trayecto para lo cual toma en cuenta la distancia para el giro y las condiciones del tráfico en términos de velocidad y cola.

Si es necesario realizar este cambio de pista se debe contestar dos preguntas más. ¿Es deseable el cambio?, esto con respecto a las condiciones de tráfico que tendrá en la otra pista en términos de velocidad o tamaño de la cola y ¿Es posible cambiar pista?, acá se verifica si existe el gap suficiente para realizar la maniobra. Para hacer esto se toma en cuenta el frenado que le imponen tanto el próximo vehículo aguas abajo y aguas arriba de la pista a la cual se quiere cambiar. Si estos dos valores son aceptables entonces es posible el cambio.

Para entender este modelo es necesario tener claro el concepto de Gap. Este es el avance en una pista con mayor flujo, el cual es evaluado por el conductor del vehículo que se encuentra en un flujo menor y que desea unirse a la pista con mayor flujo. El gap es expresado en unidades de tiempo (tiempo gap) y en unidades de espacio (espacio gap).

Para representar el comportamiento del conductor al momento de cambiarse de pista se han definido tres zonas en una sección como se indica en la Figura A1, cada una de las cuales corresponde a distintas motivaciones para el cambio de pistas.

- Zona 1: los cambios dependen de las condiciones de tráfico presentes.
- Zona 2: la mayor cantidad de cambios de pistas se producen en esta zona. Se busca estar en la pista desde la cual se puede efectuar el movimiento deseado en la intersección. Se busca

el gap necesario y se realiza el cambio, sin afectar el comportamiento de las pistas adyacentes.

- Zona 3: los vehículos son forzados a ingresar a la pista desde la cual es posible ejecutar el viraje. Para lograr esto, su velocidad es reducida, incluso llegando a detenerse completamente. Incluso los vehículos de las pistas adyacentes alteran su comportamiento permitiendo que los vehículos que desean realizar el cambio encuentren el Gap necesario.

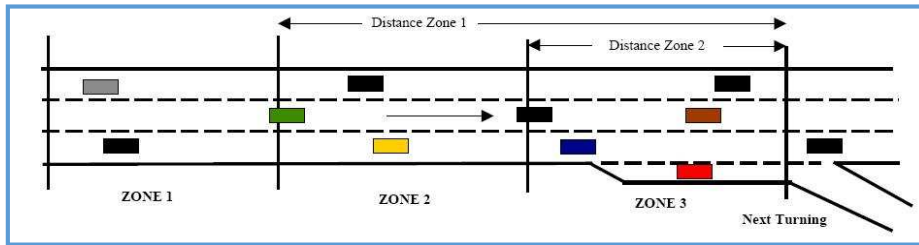


Figura A1. Zonas de cambio de pista.

(Fuente: Manual AIMSUN 2004)

Las 3 zonas anteriormente mencionadas están definidas por dos parámetros, Distance Zone 1 y Distance Zone 2, los cuales están definidos en segundos y son convertidos en distancia mediante la Ecuación 7:

$$D_m = D_t * S_{limit}(s) \left[\frac{S_{limit}(s)}{V_{max}(n, s)} \right] \quad \text{Ec. (7)}$$

Modelo de Cambio de Pista para accesos

Un modelo especial de cambio de pista es utilizado para el caso de los accesos (on ramps). En este caso se aplica otro modelo de cambio de pista para el auto que trata de emerger. Se considera un parámetro especial llamado *Time Distance on Ramp* que es la distancia, en segundos, desde el final de la pista lateral hasta el fin de la pista auxiliar, como se indica en la Figura A2. Cuando los vehículos que se encuentran en un acceso están más lejos del fin de la pista que la distancia definida por el Time Distance on Ramp, éstos se comportan como en la Zona 1, en cambio cuando están más cerca tratan de emerger. La idea de este parámetro es caracterizar desde qué punto la pista auxiliar es considerada una “on ramp” en vez de una pista lenta o pista lateral. Este submodelo también toma en cuenta otros aspectos, entre ellos, si el vehículo que trata de emerger es el primero en la pista, si está frenando o incluso si ha llegado al final de la pista y está detenido esperando, en este caso un parámetro que cobra relevancia es el Maximun Give Way Time, el cual determina cuánto

tardará en que el vehículo detenido se ponga impaciente. Pasado este tiempo el vehículo considerará que está en la Zona 3, por tanto se cambiará de pista incluso si esto perjudica a los otros conductores. Otra particularidad del modelo de “on ramp” es que para los vehículos que están en la Zona 3 y se acercan a un “on ramp”, éstos chequearán si es que hay vehículos tratando de emerger, si esto sucede tratarán de cambiarse hacia la pista de la izquierda (aplicando Zona 1).

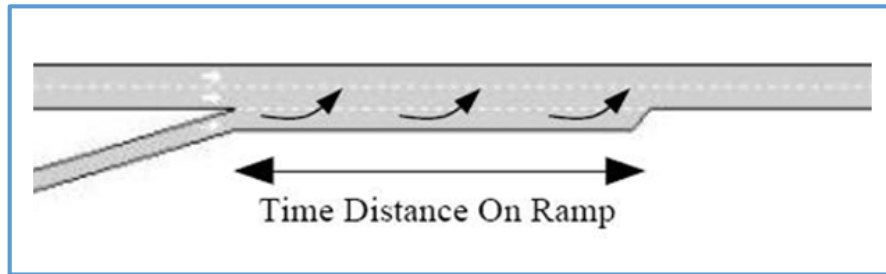


Figura A2. Zonas en el modelo de cambio de pistas para acceso.

(Fuente: Manual AIMSUN, 2004)

Modelo de Cambio de Pista para salidas

Este modelo se aplica en el caso de salidas de autopistas. En este caso se aplica el modelo de cambio de pista estándar. Un vehículo que debe tomar la próxima salida intentará cambiarse a la pista de la derecha una vez ingresando a la Zona 2 y una vez que esté alineado con la pista de salida hará el cambio de pista hacia la derecha como se indica en la Figura A3. En el caso de grave congestión la salida puede congestionarse por completo tapando la pista de salida en su totalidad, en este caso el vehículo que debe tomar la salida se detendrá completamente esperando por el gap necesario para realizar el cambio de pista.

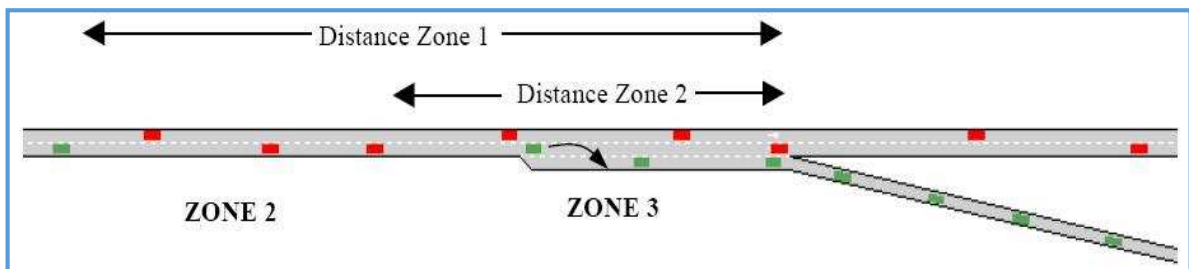


Figura A3. Zonas en el modelo de cambio de pistas para salidas.

(Fuente: Manual AIMSUN, 2004)

Modelo “Look Ahead” (vista hacia delante).

Cuando las condiciones de tráfico están muy congestionadas puede pasar que los vehículos no puedan alcanzar la pista que les permita efectuar un giro y por ende lo pierden. Cambiando ciertos parámetros como la distancia de las Zona 1 y 2, las aceleraciones de los vehículos, el paso de simulación, etc. o también usando poli secciones en vez de secciones, cuando es posible, se puede minimizar el número de giros perdidos; pero esto no es suficiente.

Para mejorar esto, el submodelo “Look Ahead” tiene por objetivo informar a los automovilistas de los dos próximos giros en sus rutas con el fin que puedan tomar decisiones de cambio de pista con un criterio más amplio y no sólo tomando en cuenta el próximo giro. El “Look Ahead Model” se puede resumir en 4 puntos:

- i) En todo momento cada vehículo conoce sus próximos 2 giros, por tanto la decisión de cambio de pista está influenciada por 2 giros consecutivos.
- ii) Las Zonas 2 y 3 del modelo de cambio de pista se extienden más allá que los límites de la sección, afectando la sección aguas arriba.
- iii) Cuando se hace un giro se toma en cuenta la pista de destino basado en la información del próximo giro.
- iv) Se le introdujo una mayor variabilidad a la definición de las zonas, con lo cual se obtiene una mejor distribución de las maniobras de cambio de pista.

Modelo de Adelantamiento.

Esta maniobra se desarrolla principalmente en la zona 1, siendo algunas veces llevada a cabo en la zona 2. Dos parámetros son los que definen la caracterización de las maniobras de adelantamiento.

- a) Percent Overtake: es el porcentaje de la velocidad deseada de un vehículo bajo el cual el vehículo decide adelantar. Esto es, si el vehículo precedente conduce más lento que el porcentaje de adelantamiento de la velocidad deseada del vehículo que le sigue, entonces el que le sigue trata de adelantar.
- b) Percent Recover: es el porcentaje de la velocidad deseada de un vehículo sobre la cual el vehículo decide volver a la pista lenta. Esto es, si el vehículo precedente conduce más rápido que

el porcentaje de recuperación de la velocidad deseada del vehículo que le sigue, entonces el que le sigue trata de volver la pista lenta.

Se recomienda que los valores del porcentaje de recuperación sean mayores que los de porcentaje de adelantamiento, para evitar que algunas maniobras de adelantamiento sean abortadas. Valores muy pequeños tampoco son recomendables.

ANEXO B

En este anexo se muestra la modelación de los sistemas de tráfico creados para ambos modelos de simulación.

Modelación

Para realizar una correcta modelación fue necesario estudiar en detalle las herramientas de construcción de modelos en TRANSYT 14 y AIMSUN 7 respectivamente.

Modelación en TRANSYT

En las Figuras B1 y B2 se muestra la modelación en TRANSYT 14 para los 2 sistemas descritos anteriormente.

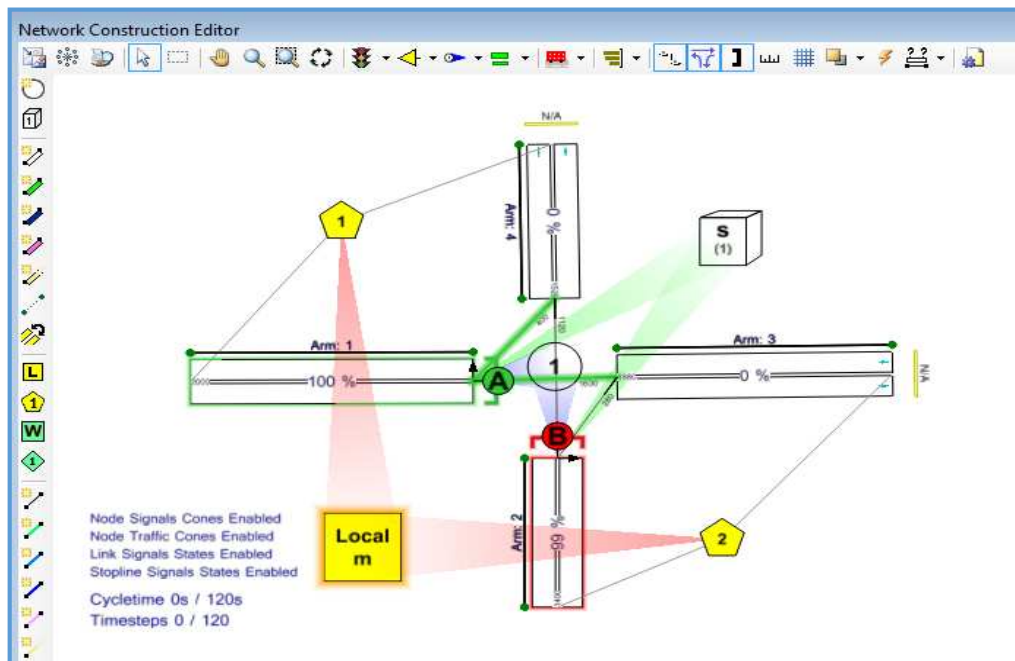


Figura B1. Modelación en TRANSYT sistema A.

(Fuente: Elaboración propia)

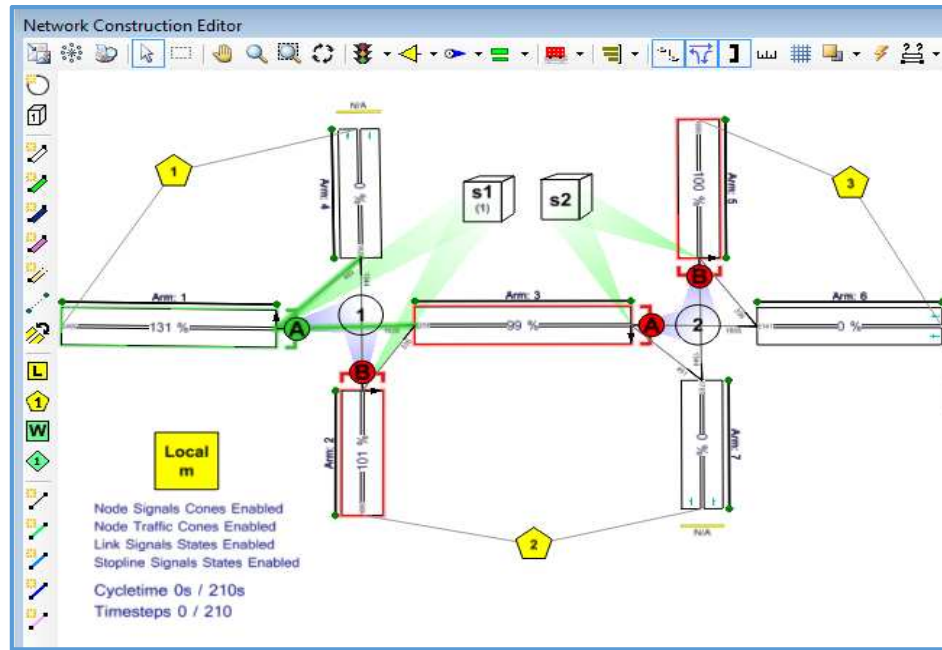


Figura B2. Modelación en TRANSYT sistema A.
 (Fuente: Elaboración propia)

Modelación en AIMSUN

En las Figuras B3 y B4 se muestra la modelación en AIMSUN para los 2 sistemas descritos anteriormente

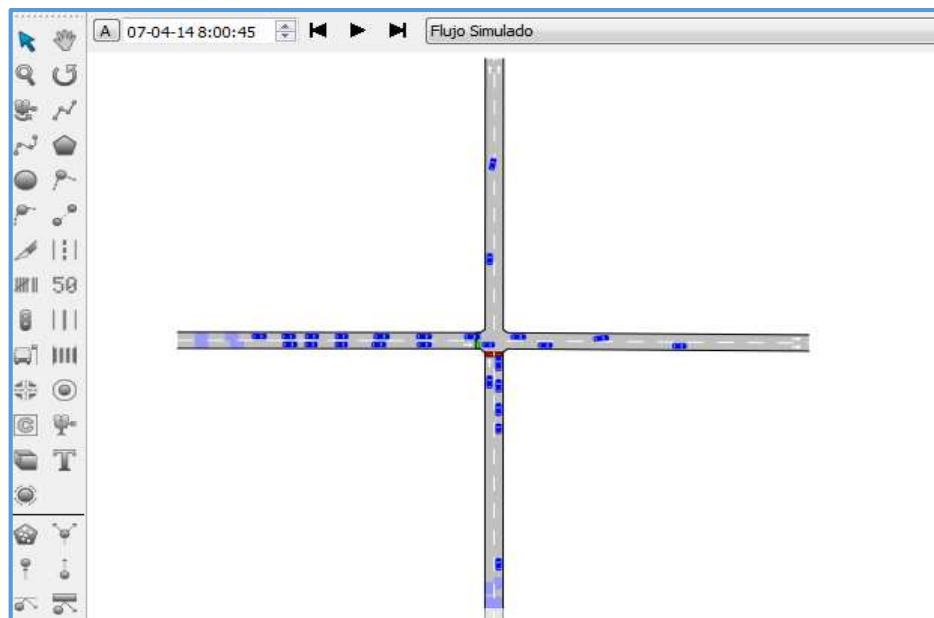


Figura B3: Modelación en AIMSUN del sistema A.
 (Fuente: Elaboración propia)

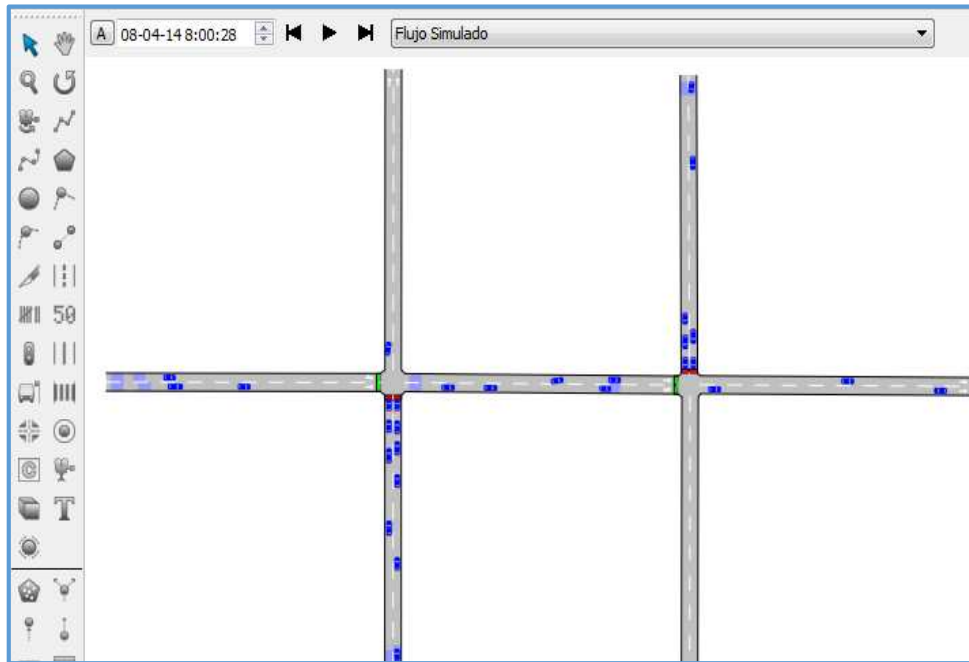


Figura B4: Modelación en AIMSUN del sistema B.
(Fuente: Elaboración propia)

ANEXO C

En el presente anexo se muestra paso a paso la metodología detallada en el capítulo 5 del cuerpo principal de este informe.

Aplicación de la Metodología

A continuación se ejemplifica el procedimiento y obtención de resultados para para un solo escenario ya que es el mismo procedimiento para el resto de los escenarios creados.

El siguiente ejemplo corresponde a un escenario del sistema A (ver Figura 9, capítulo 5) para una saturación de 0,8.

Los datos de entrada para este escenario son una demanda $Q_1 = 1400$ Veh/h, $Q_2 = 980$ Veh/h, una capacidad $C = 1800$ Veh/h/pista y una velocidad media $V_{me} = 18$ km/h.

En primer lugar se ajustan los parámetros para luego verificar que se esté replicando la misma situación en cada uno de los modelos, estos ajustes se realizaron en base a las calibraciones hechas por Ortiz, 2006 para flujo interrumpido en las calles céntricas de la ciudad de Concepción.

En la tabla C1 se muestran los principales parámetros a calibrar, destacados aparecen los valores que se encontró que son más sensibles a los ajustes de capacidad.

Categoría	Parámetro	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Atributos vehiculares	Aceptación del límite de velocidad	1	0,13	0,82	1,28
	Mínima distancia entre vehículos (m)	2,16	0,82	0,66	4,47
	Máxima aceleración deseada (m/s^2)	2	0,3	1,6	2,6
	Largo de vehículos (m)	5,65	0,51	3,68	5,81
	desaceleración normal (m/s^2)	2,3	0,7	1,5	4,9
Locales	Máxima velocidad (km/h)	43,8	5,5	35,8	55,9
Globales	Tiempo de reacción (s)	0,85	0	0,85	0,85
	Tiempo de reacción en reposo (s)	1,21	0,61	0,54	3,32

Tabla C1. Parámetros calibrados en AIMSUN para flujo interrumpido en la ciudad de Concepción.

(Fuente: Ortiz, 2006)

Luego se verifican los datos como se muestra en la Tabla C2.

Accesos	Flujo calculado (Veh/h)		Capacidad calculada (Veh/h/2pistas)		Saturación	
	TRANSYT	AIMSUN	TRANSYT	AIMSUN	TRANSYT	AIMSUN
Vía Principal	1400	1399	1751	1717	0,80	0,81
Vía Secundaria	980	966	1235	1188	0,79	0,81

Tabla C2. Verificación de datos entre TRANSYT 14 y AIMSUN.

(Fuente: Elaboración propia)

Una vez verificados los parámetros, se aplica el procedimiento explicado en el diagrama de flujo (Figura 8) y se registran los resultados como se indica en la Tabla C3

ciclo (s)	AIMSUN		TRANSYT 14	
	demora (s)	t viaje (s)	demora (s)	t viaje (s)
30	20,5	37,9	6,83	15,83
35	15,7	33,1	6,71	15,71
37	15,4	32,8	6,73	15,73
40	15,81	33,20	6,83	15,83
45	16,0	33,4	7,07	16,07

Tabla C2. Registro de medidas de rendimiento para distintos ciclos, destacado aparecen los óptimos encontrados para TRANSYT 14 y AIMSUN 7 respectivamente.

(Fuente: Elaboración propia)

Finalmente se contrastan los resultados obtenidos para cada medida de rendimiento a través de gráficos como se aprecia en las Figuras C1 y C2

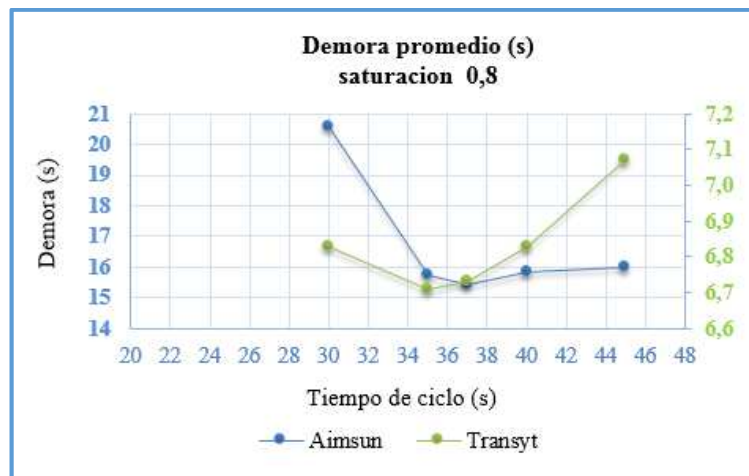


Figura C1. Comparación de la demora promedio entre TRANSYT 14 y AIMSUN distintos tiempos de ciclo.

(Fuente: Elaboración propia)

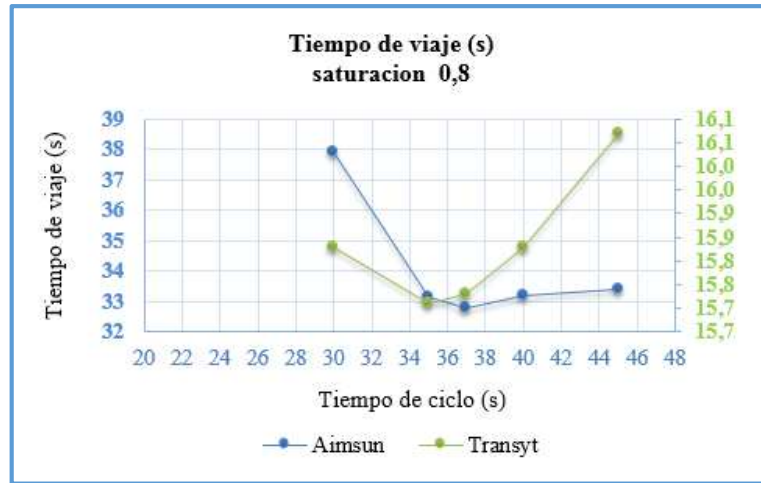


Figura C2. Comparación del tiempo de viaje entre TRANSYT 14 y AIMSUN distintos tiempos de ciclo.

(Fuente: Elaboración propia)

En las gráficas anteriores se puede apreciar la diferencia entre ciclos óptimos para cada medida de rendimiento.