



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**USO DE HERRAMIENTAS DE MICROSIMULACIÓN PARA LA DEFINICIÓN DE
ESTRATEGIAS DE CONTROL DE TRÁNSITO PARA LA CIUDAD DE SANTIAGO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

VICTOR IGNACIO ZÚÑIGA ALARCÓN

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO ALDEA SALAZAR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CRISTIAN CORTES CARRILLO
FERNANDO JOFRE WEISS

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: VICTOR ZÚÑIGA ALARCÓN
FECHA: 13/08/2010
PROF. GUIA: Sr. ALEJANDRO ALDEA S.

“USO DE HERRAMIENTAS DE MICROSIMULACIÓN PARA LA DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DE TRÁNSITO PARA LA CIUDAD DE SANTIAGO”

El objetivo general del presente trabajo de título es comparar las herramientas de microsimulación de tráfico AIMSUN y PARAMICS tanto en aspectos teóricos como en la aplicación de estrategias de control de tránsito para la ciudad de Santiago.

En el diseño y evaluación de medidas de gestión de tráfico, la aplicación de simuladores resulta fundamental, en particular, los modelos de microsimulación de tráfico son una herramienta poderosa para cuantificar los impactos sobre el funcionamiento de la red vial en casos donde no es posible encontrar resultados analíticos, y además permiten apreciar visualmente sus efectos

Una vez seleccionado un modelo de simulación, se debe realizar la calibración del modelo en orden de ajustar los resultados de la simulación a la información observada. Entre los resultados obtenidos de la calibración del transporte privado, destaca el hecho que los parámetros de AIMSUN y PARAMICS tienen una sensibilidad similar al indicador de rendimiento de calibración utilizado. Los parámetros más relevantes en el comportamiento vehicular en el microsimulador de tráfico AIMSUN son la velocidad deseada y el tiempo de reacción, mientras que en el microsimulador de tráfico PARAMICS son el headway promedio, el tiempo de reacción y el gap mínimo.

Para la comparación de los microsimuladores de tráfico mencionados, se evaluaron diferentes escenarios en distintos lugares de la ciudad de Santiago, así como experimentos simples de simulación.

Se concluye de este trabajo que el microsimulador de tráfico PARAMICS es más sensible en zonas de alta demanda vehicular y su modelo de asignación dinámico responde mejor en situaciones no predictivas. Por otra parte, el modelo AIMSUN tiene características que lo hacen más amigable al usuario, aborda de mejor manera el control semafórico de una red y su velocidad de procesamiento de simulación es más rápido que el de PARAMICS.

Se menciona finalmente que tanto AIMSUN como PARAMICS han desarrollado avanzados módulos especiales (API, Application Programming Interface) para incorporar aplicaciones externas que los ayudarían a superar algunas de sus limitaciones.

*A mi familia y
polola.*

*Dedicado a la
Pelusa, Bianca y
mi Abuela Maruja
Q.E.P.D.*

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a quienes contribuyeron en forma directa e indirecta a mi formación profesional durante todos estos años.

En primer lugar agradecer a mis padres, por darme la posibilidad de estudiar y llegar a esta etapa de mi vida. A mi madre – el cual es el secreto mejor guardado de la humanidad – por brindarme todo su cariño desde mi primer día de vida y a mi padre por compartir nuestra pasión por la Universidad Católica y ser mi modo de transporte durante todos mis años de estudios.

A mi hermana Verónica, que nuestra diferencia de edad nunca fue un obstáculo para una gran relación. Le deseo lo mejor en su próximo desafío de ser madre y en sus futuros proyectos profesionales y familiares.

Agradezco mucho el apoyo y dedicación de mi profesor guía Alejandro Aldea al desarrollar este trabajo de título. A los miembros de mi comisión, a Cristian Cortes por sus valiosos comentarios y a Fernando Jofre, tanto por sus valiosos comentarios como por darme la oportunidad de realizar mi práctica profesional en la Unidad Operativa de Control de Tránsito.

A los profesores y compañeros de la división de Transporte de la Universidad de Chile.

A Sergio Fernández y Margarita Amaya por enseñarme a utilizar los microsimuladores de tráfico desarrollados en este trabajo.

A mis amigos y compañeros de la universidad por pasar estos 8 años de mi vida llenos de momentos de estudio y ocio los cuales nunca olvidaré. Gracias por ser mis confidentes, consejeros, hermanos de rock n roll y compañeros de ocio. Todos representados por dos personas en particular: Felipe Cabrera y Rafael Rodríguez.

Finalmente a mi polola Gianina (a.k.a. Polly) por vivir este periodo conmigo, de los cuales hemos compartido grandes momentos. Recuerdo aquellas caminatas por los parques, la cancha de conciertos de rock, el viaje a Chiloé, noches enteras de estudio y nuestros ensayos de música.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 ALCANCES.....	2
1.3 CONTENIDO.....	3
2. FUNDAMENTOS DE MODELOS MICROSCÓPICOS	5
2.1 ALEATORIEDAD Y GENERACIÓN DE VEHICULOS	5
2.2 INTERACCIÓN VEHICULAR	6
2.2.1 Modelos de seguimiento vehicular	6
2.2.2 Comportamiento de cambio de pista.....	9
2.2.3 Modelos de elección de ruta.....	10
2.3 TRATAMIENTO DE TRANSPORTE PÚBLICO	11
3. METODOLOGÍA PARA LA ORGANIZACIÓN DE UN ESTUDIO DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO.....	12
3.1 PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE ENTRADA	12
3.2 CHEQUEO DE ERRORES E INFORMACIÓN DE SALIDA	15
3.3 PROCESO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	16
3.3.1 Representación de la Red	16
3.3.2 Calibración de la Demanda	17
3.3.3 Calibración de Capacidad	18
3.3.4 Rendimiento de Calibración	19
3.3.5 Validación	21
4. CALIBRACIÓN DE MODELOS DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO	22
4.1 DISEÑO Y PROCEDIMIENTO DE EXPERIMENTO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	23
4.2 INDICADORES DE RENDIMIENTO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	26
4.3 CONSTRUCCIÓN DE LA RED DE CALIBRACIÓN	26
4.3.1 Elementos de red.....	27
4.3.2 Demanda	29
4.3.3 Líneas de Transporte Público.....	32
4.4 APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	34
4.4.1 Calibración de Demanda	34
4.4.2 Calibración de Capacidad	36
4.4.3 Validación	51
4.5 ANÁLISIS DE PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	52
5. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE MICROSIMULACIÓN.....	54
5.1 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE EVALUACIÓN	54
5.1.1 Escenario 1: Medidas de mitigación del impacto vial de Costanera Center (etapa 3 y 4 del proyecto)	54
5.1.2 Escenario 2: Modificación operacional de Cuadrante Las Brujas	55
5.1.3 Escenario 3: Modificación pista central eje San Martín.....	56
5.1.4 Escenario 4: Simulación de un incidente temporal	57
5.2 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE EVALUACIÓN	57

5.2.1	<i>Simulación de escenario 1</i>	58
5.2.2	<i>Simulación de escenario 2</i>	64
5.2.3	<i>Simulación de escenario 3</i>	70
5.2.4	<i>Simulación de escenario 4</i>	76
6.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MICROSIMULADORES DE TRÁFICO AIMSUN Y PARAMICS	80
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
	BIBLIOGRAFÍA	93
	ANEXO A: MODELOS DE SEGUIMIENTO VEHICULAR	96
	ANEXO B: REVISIÓN DE MICROSIMULADORES AIMSUN Y PARAMICS	93
	ANEXO C: PARÁMETROS DE COMPORTAMIENTO VEHICULAR DE LOS MODELOS AIMSUN Y PARAMICS	103
	ANEXO D: MODELOS DE COMPORTAMIENTO VEHICULAR DE MICROSIMULADOR AIMSUN	104
	ANEXO E: MODELOS DE COMPORTAMIENTO VEHICULAR DE MICROSIMULADOR PARAMICS	111

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El aumento del tránsito en redes urbanas ha llevado a serios problemas de congestión, ya no sólo en Santiago sino en varias ciudades del país. Como la demanda en las vías urbanas aumenta a tasas usualmente superiores al aumento de la capacidad vial, la situación continuará deteriorándose si es que no se implementan mejores estrategias de gestión de tránsito. Una de las más atractivas alternativas para enfrentar el problema de la congestión urbana es el desarrollo de los Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS). El rápido crecimiento de aplicaciones ITS en años recientes ha generado la creciente necesidad de herramientas que ayuden en el diseño y operación del Sistema. En este marco, los modelos de simulación microscópicos aparecen como una interesante herramienta para analizar estrategias de gestión y de control de tránsito.

Los simuladores de la operación de las redes viales urbanas son potencialmente útiles para analizar estrategias de control y realizar predicciones de comportamiento operacional de la red vial frente a distintos eventos o situaciones. Así, los modelos de simulación permiten otorgar una visión amplia de las complejidades de operación de una red frente a problemas específicos y a implementar posibles soluciones con rapidez y con la confianza de que las medidas tomadas tengan un impacto positivo.

En efecto, los modelos de simulación permiten crear una suerte de laboratorio en el computador, en el cual se representa la operación de la red vial bajo análisis y así experimentar nuevas estrategias o técnicas de gestión sin los impactos que significaría su implementación real.

En el presente trabajo se analizan distintas redes de la ciudad de Santiago dentro de las cuales se definen diferentes escenarios, por ejemplo: aumento en capacidad vial,

reversibilidad de pistas, simulación de incidentes, etc. Se estudia la capacidad de los simuladores de simular variadas situaciones, analizando las potencialidades y limitaciones de estos. Junto con lo anterior, se realiza el proceso de calibración de los modelos de microsimulación de tráfico Aimsun y Paramics.

1.1.- Objetivos.

El objetivo principal del presente trabajo es realizar un análisis comparativo de distintas herramientas de simulación microscópica, en particular de los modelos AIMSUN y PARAMICS, tanto en aspectos teóricos como en aplicaciones específicas enfocadas a aspectos como:

- Análisis y Evaluación de Rediseños Viales
- Análisis del impacto de cambios operacionales
- Análisis de Políticas de Control de Tránsito

Para el efecto de comparación del desempeño de los modelos, se definirán 4 casos o escenarios de proyectos a analizar.

Se analiza también el proceso de calibración de los modelos, comparando los resultados con diversos estudios referentes al tema. Se entregan pautas de calibración, parámetros que deben ser considerados y estudios futuros de este proceso.

1.2.- Alcances.

Una de las mayores ventajas que tiene la utilización de microsimuladores de tráfico, además de calcular parámetros de operación de los vehículos, es que proporciona una poderosa herramienta para modelar las dinámicas del sistema para distintos niveles de demanda, y también visualizar claramente cómo la aplicación de ciertas medidas de gestión afectan el funcionamiento de las áreas afectadas.

Al utilizar un modelo microscópico es de gran importancia el proceso de calibración para así obtener resultados precisos. Para esto, se utiliza la guía para la aplicación de modelos microscópicos del Departamento de Transporte de California (2002), la cual se complementa con estudios de diferentes trabajos de Tesis nacionales (Velasco, Didier, Lacalle), en los cuales se propone una metodología de calibración y resultados para una situación similar.

En este trabajo se analizan dos simuladores de tráfico: Aimsun, en su versión estándar 6.0.6, y Paramics, en su versión estándar 6.6.1. Debido a esto el trabajo sólo se enfoca en aquellas características propias de estas versiones, por ejemplo no se analiza el tema de rutinas API o la implementación de modelos de peatones.

Para la modelación del transporte público, y debido a la dificultad en la recolección de los datos de demanda, se considera como variable de operación en paraderos la demora media y la desviación estándar de la detención de un bus.

1.3.- Contenido.

El presente informe del trabajo de titulación está estructurado en siete capítulos que poseen la siguiente información:

En este primer capítulo de introducción se expresa la motivación del presente estudio, los objetivos del estudio y el contenido del propio.

En el segundo capítulo se exponen los fundamentos de los modelos microscópicos, referentes a los modelos básicos que utilizan los programas y el tratamiento del transporte público en estos.

En el tercer capítulo se presenta una metodología para la construcción y simulación de una red de microsimulación de tráfico, se discute que tipo de información se

debe recopilar tanto para la modelación como para la calibración y validación, y que tipo de salidas pueden ser reportadas.

En el cuarto capítulo se realiza el proceso de Calibración de los modelos de microsimulación de tráfico Aimsun y Paramics. La calibración se realiza en dos niveles (demanda y capacidad) y uno final de validación.

En el quinto capítulo se aplican los modelos microscópicos seleccionados a diversos escenarios de operación de distintas redes.

En el sexto capítulo se comparan los microsimuladores seleccionados. Se analizan las herramientas de codificación, el tratamiento del transporte público, la relación de variables macroscópicas y el tiempo consumido durante una simulación.

Para finalizar, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio completo.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS DE MODELOS MICROSCÓPICOS

En el presente capítulo se presenta una descripción y análisis de la teoría básica que sustentan la estructura de los modelos de microsimulación de tráfico (MMT). Los siguientes tópicos son discutidos:

- Aleatoriedad y generación de vehículos.
- Modelos de comportamiento vehicular.
- Tratamiento de transporte público.

2.1.- Aleatoriedad y Generación de Vehículos.

Los modelos de microsimulación son estocásticos con generación de tráfico y características de vehículo – conductor que provienen de distribuciones estadísticas utilizando valores aleatorios. Por ejemplo, considera la generación de tráfico con intervalos que siguen una distribución exponencial decreciente (FHWA, 2004). La función de distribución de probabilidad $P(h \geq t)$ está dado por:

$$P(h \geq t) = e^{-(t-\alpha)/(\bar{t}-\alpha)} \quad (2.1)$$

donde h y t son intervalos, \bar{t} es el intervalo promedio y α es el mínimo intervalo.

Un generador de números aleatorios es utilizado para generar una fracción aleatoria (R) tal que:

$$R = e^{-(t-\alpha)/(\bar{t}-\alpha)} \quad (2.2)$$

Por ejemplo, para R igual a 0.60 y considerando un intervalo promedio de 9 segundos y un intervalo mínimo de 1 segundo, se genera un intervalo de 5.1 s para que un vehículo de una calle lateral ingrese a un camino principal.

Una vez un vehículo ingresado a la red, el modelo de simulación le asigna características vehículo – conductor. Las siguientes características o atributos son comúnmente generados para cada unidad vehículo – conductor (UVC):

- **Vehículo:** tipo (auto, bus, camión, etc), longitud, ancho, máxima aceleración y desaceleración, velocidad máxima, etc.
- **Conductor:** agresividad, tiempo de reacción, velocidad deseada, brechas críticas, etc.

Todas estas características pueden representadas en los modelos de manera constante, relaciones funcionales o distribuciones de probabilidad. La mayoría de los modelos de microsimulación considera distribuciones estadísticas para representar los atributos de una UVC (SMARTTEST, 2000).

2.2.- Interacción Vehicular.

Una red de transporte en un MMT es típicamente representado como una red de arcos y nodos. Los arcos son caminos con distintas características de diseño y operación. Los nodos representan intersecciones o lugares donde el diseño de un arco es modificado. También son utilizados los centroides para ingresar la demanda mediante matrices OD.

En un MMT, la interacción y maniobras de un vehículo en una red de tráfico son modelados en detalle utilizando modelos de seguimiento vehicular, cambio de pista y

aceptación de brecha. Estos modelos son función de distintos parámetros lo que permite modelar distintos tipos UVC.

Para la elección de ruta, los MMT como Paramics, Aimsun y Transmodeller ofrecen tres métodos de asignación de tráfico: todo o nada, estocástico y dinámico. El camino más corto puede ser recalculado por intervalos definidos por el usuario, utilizando los tiempos actualizados de viaje por arco.

2.2.1.- Modelos de Seguimiento Vehicular.

La teoría del seguimiento vehicular fue desarrollada por distintos autores en la década de los 50. Los modelos se basan en la relación estímulo – respuesta en la que un conductor responde luego de un tiempo de reacción que varía normalmente entre 0.5 a 2.0 segundos ante un cierto estímulo (Burgos 2004). La forma funcional de este modelo es:

$$R(t + t_R) = \lambda * S(t) \quad (2.3)$$

Donde,

R : reacción

S : estímulo

λ : función de sensibilidad

t_R : tiempo de reacción

Un estímulo puede ser por ejemplo un cambio en la velocidad o distancia con respecto al vehículo que antecede y una reacción es comúnmente una variación en la tasa de aceleración o desaceleración. En resumen, la teoría del seguimiento vehicular da origen a una familia de modelos de la forma:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + t_R) = \frac{a_{ml}[\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (2.4)$$

Donde,

\ddot{x} : tasa de aceleración / desaceleración del vehículo

\dot{x} : velocidad del vehículo

x : posición del vehículo

α : factor de sensibilidad

m, l : constante

n : vehículo precedente

$n + 1$: vehículo seguidor

Donde los exponentes m y l toman diferentes valores según las hipótesis que han hecho distintos autores sobre la sensibilidad de los conductores. En la tabla 1 del anexo se encuentra un resumen de los distintos modelos de seguimiento vehicular basados en el principio de estímulo – reacción.

Existe también otra familia de modelos de seguimiento vehicular que han sido desarrollados. En estos modelos se adopta un criterio de seguridad o de evitar una colisión de forma que los vehículos especifican una distancia de seguridad como una función de la diferencia de velocidades y el tiempo de reacción del vehículo seguidor (Panwai y Dia 2004). Un popular modelo desarrollado en Australia es el modelo de Gipps (1981) en que se especifica la velocidad de seguridad del vehículo seguidor $v_n(t + t_R)$ y que se calcula como:

$$v_n(t + t_R) = \min \left\{ v_n(t) + 2,5a_n^{max}T \left(1 - \frac{v_n(t)}{v_n^{des}} \right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{v_n^{des}}} \right\}, \quad (2.5)$$

$$d_n^{max}T + \sqrt{(d_n^{max}T)^2 - d_n^{max} \left[2\{x_{n-1}(t) - s_{n-1}(t) - x_n(t)\} - v_n(t)T - \frac{v_{n-1}(t)^2}{d_{n-1}} \right]}$$

Donde,

t_R : tiempo de reacción

v_n^{des} : es la velocidad deseada del vehículo n

a_n^{max} : es la máxima aceleración del vehículo n

d_n^{max} : es la máxima desaceleración del vehículo n

x_n : es la posición del vehículo n

s_{n-1} : es la longitud efectiva del vehículo $n - 1$

\hat{a}_{n-1} : es la estimación de vehículo n de máxima desaceleración de vehículo $n - 1$.

Las dos formulaciones presentadas representan las restricciones en la velocidad del vehículo n en el tiempo $t + t_R$. El primer término corresponde a la velocidad en condiciones de flujo libre en donde sólo está limitado por sus propias características. En el segundo término la velocidad es restringida por las condiciones del tráfico.

2.2.2.- Comportamiento de Cambio de Pista.

La modelación del comportamiento de cambio de pista es más complejo que la modelación del seguimiento vehicular (AUSTROADS 2006). La decisión para el cambio de pista depende de distintos objetivos como por ejemplo la necesidad de realizar un viraje o de aumentar la velocidad.

En el modelo de Gipps (1986) se modela el comportamiento como un proceso de decisión, donde se analizan las siguientes preguntas:

- i. **¿Es necesario el cambio de pista?** Depende de varios factores, como lo son la necesidad de los virajes, la distancia al siguiente viraje, y las condiciones de tráfico de la pista actual.
- ii. **¿Es deseable cambiar de pista?** Se requiere verificar si habrá una mejora en las condiciones de tráfico al cambiar de pista (medida en términos de velocidad y distancia).
- iii. **¿Es posible cambiar de pista?** Se verifica que haya una suficiente brecha para realizar el cambio. Para esto se calculan las condiciones de frenado del vehículo precedente de la nueva pista y las condiciones de frenado impuestas a los vehículos aguas arriba de la nueva pista.

En la figura 1 se ilustra el comportamiento del conductor en el modelo Aimsun (TSS 2008) en donde se han definido tres zonas en una sección, cada una de las cuales corresponde a distintas motivaciones para el cambio de pistas:

- i. **Zona 1:** la decisión de cambio de pista se rige por las condiciones de tráfico presente.
- ii. **Zona 2:** esta es la zona donde se realizan la mayor cantidad de cambios de pistas. La decisión se rige por el próximo viraje en una intersección o la salida de una autopista. Se busca la brecha necesaria y se realiza el cambio, sin afectar el comportamiento de las pistas adyacentes.
- iii. **Zona 3:** los vehículos están obligados a ingresar a la pista de viraje deseada, reduciendo la velocidad e incluso deteniéndose de manera completa. Asimismo los vehículos de la pista adyacente, alteran su comportamiento, permitiendo que los vehículos que desean realizar el cambio de pista encuentren la brecha necesaria.

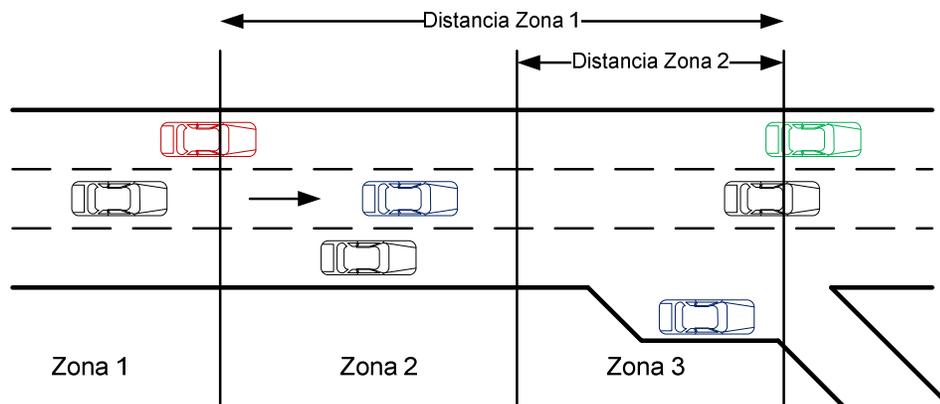


Figura 1. Zonas de cambio de pista antes de una salida

Fuente: Aimsun Manual

2.2.3.- Modelos de Elección de Ruta

En los MMT la asignación de la ruta de vehículos privados entre pares OD se realiza mediante tres métodos: todo o nada, estocástico y dinámico. El costo generalizado de una ruta es en general el tiempo de viaje por ésta, en donde para el cálculo se considera la suma de los costos por todos los arcos que conforman una ruta (Austroads 2006)

En la primera iteración los vehículos se asignan todo o nada por la ruta más corta, en donde para el cálculo se utiliza las velocidades límites de cada arco, sin considerar la capacidad de estos (esto es modificable en Aimsun).

En la asignación dinámica los vehículos se asignan en la red considerando los costos actualizados de la red. Los tiempos de viajes actuales son calculados como el promedio de los tiempos de viajes del periodo anterior.

También es posible indicar que porcentaje de los vehículos tiene un conocimiento total de los costos generalizados de las rutas. De esta manera, cuando se utiliza la opción de asignación dinámica existe un porcentaje de vehículos que siempre utilizara la ruta más corta calculada al inicio de la simulación.

2.3.- Tratamiento de Transporte Público.

Debido a que en general los microsimuladores son desarrollados en países desarrollados (SMARTTEST 2000) el tratamiento del transporte público es más bien limitado en estos modelos (Silva 2001).

En los MMT los servicios de transporte público quedan definidos por un nombre o número que los identifica, el tipo de vehículo, la ruta a seguir, la frecuencia o itinerario de entrada y los paraderos designados (Burgos 2004).

Existe también un conjunto de medidas de prioridad en arcos e intersecciones en variados MMT, como por ejemplo determinar pistas solo bus o tratamiento preferencial en intersecciones con la incorporación de semáforos actuados para buses (Burgos 2004).

La demora en paraderos es modelada generalmente de dos formas, la primera es indicando el tiempo de demora de cada línea o servicio en un determinado paradero, incluyendo la desviación estándar de la demora y la segunda es a través de la demanda de bajada y subida de pasajeros para una línea en un determinado paradero, en donde el tiempo consumido en este proceso varía funcionalmente entre los distintos simuladores.

Una limitación del transporte público es que la demanda no llega de manera variable en cada paradero y que cada usuario no tiene un conjunto de líneas atractivas, modificaciones que sólo son posibles a través de rutinas API. Uno de estos módulos es MISTRANSYT (Burgos 2006) desarrollado a través de API que interactúa con Paramics, simulando de forma simultánea el funcionamiento de los vehículos de transporte público, el comportamiento de pasajeros y la operación de los paraderos.

En la siguiente tabla se presenta un resumen realizado por Burgos (2004), con algunas modificaciones, de las características relacionadas con el transporte público que vienen por defecto en distintos MMT.

Tabla 1. Incorporación de transporte público en algunos microsimuladores de tráfico

Característica	AIMSUN	CORSIM	DRACULA	PARAMICS	VISSIM
Asignación de vehículos en la red	Opción 1, Frecuencia sigue una distribución normal Opción 2, Horario Predefinido	Frecuencia Fija	Frecuencia Fija	Opción 1, Frecuencia Fija Opción 2, Horario Predefinido	Frecuencia Fija
Definición de arco o línea	Secuencia de secciones, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, nodos y paraderos	Secuencia de arcos, conectores y paraderos
Prioridad En Vías	Pistas de uso exclusivo	Pistas de uso exclusivo	Pistas de uso exclusivo	Pistas de uso exclusivo	Pistas de uso exclusivo
Prioridad en Intersecciones	Semáforos Actuados	Semáforos Actuados	Semáforos Actuados	Semáforos Actuados	Semáforos Actuados
Tipo de Paraderos	Tradicionales, bahías y terminales	Tradicionales	Tradicionales y bahías	Tradicionales	Tradicionales y bahías
Modelos de Llegada de Pasajeros al Paradero	No está implementado	Sigüen distribución definida por el usuario	Tasa media de llegada pax/h	Tasa media de llegada pax/h	Tasa media de llegada pax/h
Pasajeros diferenciados por línea	No está implementado	Información no disponible	No se diferencian	Si	Si

Fuente: Burgos, Vanessa (2004)

Capítulo 3

METODOLOGÍA PARA LA ORGANIZACIÓN DE UN ESTUDIO DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

En el presente capítulo se presenta una metodología para la realización de una modelación mediante microsimulación de tráfico. Los siguientes tópicos son considerados:

- Preparación de la información de entrada.
- Chequeo de Errores.
- Información de salida.
- Procedimiento de calibración y validación.

3.1.- Preparación de la información de entrada.

Debido a la complejidad de un MMT comparado a los modelos tradicionales hace que los requerimientos de la información de entrada sean mayores. La información es requerida para los propósitos de construcción de la red y para la calibración y validación de ésta. El uso de dibujos tipo CAD es una herramienta eficiente para la construcción de la red.

La información de entrada puede ser dividida en dos grandes grupos (AUSTROADS 2006):

- **Información estática.** Este tipo de información se refiere a las características físicas y técnicas de la red. Ejemplo de esto son el número de pistas, ancho de pistas, uso de pistas, el control de mecanismo de las intersecciones, ubicación y

geometría de los paraderos y la operación de estos. Esta información puede ser obtenida de:

- Planos de la red de caminos.
 - Información de la red obtenida de otros modelos.
 - Mapas digitales (dibujos CAD) y fotografías aéreas.
 - Catastro operativo
- **Información dinámica.** Está información se refiere a la demanda de tráfico representada por proporción de virajes o una matriz de origen – destino y clasificada por tipo de vehículo. La programación de la red de semáforos también es clasificada como una información dinámica. Las matrices de demanda pueden ser obtenidas de:
- Conteos de tráfico clasificados por tipo de vehículos como por ejemplo vehículos livianos, taxis, camiones, etc.
 - Transporte público (típicamente buses) y su itinerario.
 - Método de las patentes para la generación de matrices OD.
 - Matrices obtenidas de otros modelos.

Es importante considerar también, dependiente del periodo de simulación, recopilar la información de flujos por intervalos de hora o cada 15 minutos.

En la tabla 2 se presenta un listado no exhaustivo de la información requerida para la modelación de una simulación microscópica de tráfico.

Tabla 2. Requerimientos mínimos de información de entrada

Categoría	Parámetro	Comentario
Información para la codificación de la red	Longitud de Arco	Chequear la longitud de las pistas de virajes, pendiente y ancho de cada pista
	Número de Pistas	
	Operación de Intersección	Chequear configuración de las pistas y movimiento prohibidos
	Repartos de Señales	Chequear ciclo, fases, repartos de verdes y desfases. Para señales actuadas, verificar valores máximos y mínimos de verdes, ubicación de los detectores y configuraciones
	Velocidad de Arco (Crucero)	Medida ininterrumpida de tiempos de viaje; utiliza velocidad espacial
Información de demanda	Matriz OD	Obtener de modelos externos
	Flujos por arco y porcentajes de virajes	Chequear el flujo por movimiento y la composición vehicular

Fuente: AUSTRROADS RESEARCH REPORT (2006)

3.2.- Chequeo de Errores e Información de Salida.

Es importante asegurarse que la geometría física de un dispositivo vial (intersección, camino, autopista) sea adecuadamente representada en el modelo. Una vez que la red es construida, es importante realizar una corrida visual – característica permitida en un MMT – para chequear que los vehículos se mueven de manera correcta por la red. Cuando la geometría no es correcta, los vehículos realizan giros indebidos y la velocidad se reduce. Debido al freno de los vehículos, las ondas de choque pueden ocurrir. Esto lleva a la interrupción del flujo, y la generación de vehículos en las zonas cercanas se verá afectada.

En general los MMT proveen una gran cantidad de indicadores a nivel de intersección, arco, área y por tipo de vehículo. También es permitida la ubicación de detectores virtuales para la simulación de una estación de conteo. La mayoría de los MMT simulan distintos eventos, los cuales se incluyen bloqueos de pistas y conflictos de vehículos (AUSTRROADS 2006).

Algunas salidas de los modelos son:

- Animación de la red de simulación. Esto se puede realizar tanto en 2D como en 3D.
- Presentación visual de los diferentes estadísticos. Los resultados numéricos de una corrida individual o el promedio de varias pueden ser observadas seleccionando un arco, intersección o área. La información desplegada en cuadros presenta valores de:
 - Caminos de vehículos simulados
 - Volúmenes de tráfico vehicular por arco e intersección.
 - Longitudes de máxima cola
 - Densidad de tráfico
 - Velocidad y demora
 - Tiempo de viaje por una ruta OD
- La información también puede ser reportada en archivo de texto plano ASCII, el cual puede ser importado en hoja de cálculos, documentos y base de datos.

También es importante considerar que valores deben ser reportados para una apropiada decisión en la gestión de tráfico. Por ejemplo, la capacidad no es un valor explícito en un modelo de microsimulación, por lo cual el nivel de congestión no puede ser evaluado en términos del grado de saturación. Por lo tanto, es importante considerar otras medidas como la velocidad por arcos, las demoras en intersecciones o valores de densidad para la evaluación del nivel del servicio de una red.

3.3.- Proceso de Calibración y Validación.

En el desarrollo de cualquier modelo de tráfico, incluyendo un modelo de microsimulación, es que el modelo necesita ser ajustado para un determinado propósito. La calibración es el proceso de modificar y cambiar los valores de los parámetros de un modelo en orden de ajustar los resultados de la simulación a la información observada.

El objetivo de la calibración es mejorar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento del conductor y el rendimiento de determinados indicadores como los tiempos de viajes, demoras y longitudes de colas variando los valores de los parámetros de sus valores por defecto.

Los cinco pasos recomendados para una correcta calibración (Departamento de Transporte de California, 2002) de un modelo de microsimulación de tráfico son los siguientes:

- Representación de la Red.
- Calibración de la Demanda.
- Calibración de la Capacidad
- Rendimiento de la Calibración.
- Validación

3.3.1.- Representación de la Red.

Se debe chequear (y calibrar), por ejemplo, si todas las intersecciones están consideradas, la velocidad máxima por sección, los números de pistas de cada arco, el uso de las pistas para los movimientos en intersecciones, la ruta de buses y la ubicación de sus respectivas paradas, entre otras características.

3.3.2.- Calibración de la Demanda.

La información de la demanda en un modelo de microsimulación de tráfico se realiza a través de dos opciones:

- Ingresando demanda por arco, composición vehicular y porcentajes de giro.
- Importando una Matriz Origen – Destino en donde el modelo de microsimulación asigna el tráfico a la red; la matriz OD puede ser especificada por periodos para representar la variación de la demanda.

De acuerdo a diferentes estudios de simulación se sugiere la especificación de la demanda a través de una Matriz OD porque permite por una parte que los vehículos tengan oportunidad de planear un cambio de pista, no hay vehículos circulado por rutas cíclicas al interior de la red y permite la asignación de vehículos como consecuencia de algún incidente (AUSTROADS 2006)

La sintonía fina a nivel de arco incluye ajustes a su geometría y velocidades (o costos). A nivel de red, los parámetros asociados a los modelos de asignación dinámica como por ejemplo, la periodicidad de los cálculos, el porcentaje de vehículos que tienen conocimiento de los costos de la red, deben ser también calibrados para lograr el mejor ajuste entre los flujos simulados y observados.

3.3.3.- Calibración de la Capacidad.

En este paso de calibración se ajustan tanto los parámetros globales como específicos de un arco para replicar de la mejor manera posible los valores de capacidad observados o aceptados de valores históricos. Esto es un paso importante porque la capacidad tiene un efecto significativo en predecir el rendimiento de indicadores tales como demoras y colas.

Los parámetros significativos que controlan la capacidad son:

- Headway (parámetro global en Paramics)
- Tiempo de reacción del conductor
- Brecha crítica para cambio de pista
- Mínima separación en condiciones de detención
- Aceptación de brecha

3.3.4.- Rendimiento de Calibración.

Este es el paso final de un proceso de calibración. Para el rendimiento global del modelo de tráfico se utilizan indicadores como tiempo de viaje, demora y/o colas comparando con valores medidos en terreno.

En diferentes estudios de Tesis a nivel nacional (Lacalle, Velasco, Didier, Pavez) el indicador utilizado es la longitud de cola, en donde se utiliza un valor de rendimiento global de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I. D. = \sum_{i=accesos} \frac{|cola_{obs,i} - cola_{sim,i}|}{cola_{obs,i}} \times \frac{cola_{obs,i}}{cola_{obs,red}} \quad (3.1)$$

De esta manera mientras la cola simulada se acerque más a la cola observada el indicador de desempeño disminuirá, y si la modelación fuera exacta el I. D. sería igual a cero. El término final corresponde al peso de las colas, es decir, si el largo de cola es mayor representa mayor importancia.

Otros criterios considerados y sus valores históricamente aceptados se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Criterios de Calibración de Modelos.

Criterio y Mediciones (valores modelados versus observados)	Aceptación de Calibración	Comentarios / Fuente
Flujos de Arcos Individuales dentro de 100 veh/h para flujos < 700 veh/h dentro de 15% para 700 < flujos < 2700 veh/h dentro de 400 veh/h para flujos > 2700 veh/h Suma de todos los flujos por arco Estadístico GEH* < 5 para flujos por arco individual Estadístico GEH* para suma sobre flujos de arco	> 85% de casos > 85% de casos > 85% de casos precisión=5% > 85% de casos < 4	FHWA (2004)
Tiempo de Viajes para rutas seleccionadas Tiempo de Viaje Promedio Relativo a lo Observado Dentro del 15% de los Tiempos Observados (o 1 minuto si es más grande)	Dentro del 10% > 85% de casos	RTA NSW
Patrón de Congestión Inspeccionar la dispersión de colas, la distribución de la demanda por pistas, etc	Satisfacción del modelador	Distribución de pistas del tráfico tiene un significativo efecto en la demora de la red
Estabilidad del Modelo Variación entre el mínimo y máximo del flujo que ingresa a la red Tabulación de máximos y mínimos de flujos por arco y cordón de acuerdo a variaciones del 20% (o 200 veh/h),10% (o 100 veh/h) y 5% (o 50 veh/h)	Dentro del 5% Satisfacción del modelador	Cinco Corridas usando diferentes valores aleatorios de semillas

Fuente: Departamento de Transporte de California (2002)

El estadístico GEH se define como:

$$GEH = \sqrt{\frac{(q_{obs} - q_{sim})^2}{0.5(q_{obs} + q_{sim})}} \quad (3.2)$$

Donde,

q_{obs} : flujo vehicular observado en el periodo considerado

q_{sim} : flujo vehicular simulado en el periodo considerado

3.3.5.- Validación.

La Validación puede ser definida como una comparación de la salida del modelo con la información observada, independiente del proceso de calibración. Es común que de la información recolectada una porción sea para la calibración y el resto para la validación. Para el rendimiento de la validación comúnmente es utilizado los indicadores de tiempo de viaje en arco (segundos, minutos u hora) o el tiempo total de viaje consumido en una red (por ejemplo, en veh-h/h). Demoras o longitudes de colas pueden ser similarmente comparadas.

El tiempo de viaje total consumido en la red y velocidad de la red se definen como sigue:

$$\textit{Tiempo de Viaje en la Red} = \sum_{i=1}^N t_i q_i \quad \left[\frac{\text{veh}}{h} - h \right] \quad (3.3)$$

$$\textit{Velocidad de la Red} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i q_i}{\sum_{i=1}^N t_i q_i} \quad \left[\frac{km}{h} \right] \quad (3.4)$$

donde t_i , d_i y q_i son el tiempo de viaje (horas), distancia (km) y flujo (veh/h) en el arco i respectivamente y N es el número de arcos utilizados para determinar el indicador de rendimiento de la red y comparación.

Capítulo 4

CALIBRACIÓN DE MODELOS DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

En este capítulo se presenta el proceso de calibración de los modelos de microsimulación de tráfico. El principal objetivo de la fase de calibración es replicar de manera realista el movimiento del tráfico observado en el simulador. Los resultados reportados por los simuladores pueden ser observados de manera visual o analítica. El análisis visual consiste en observar los movimientos de los vehículos en la pantalla, en orden de corroborar que el tráfico se comporta de manera realista. El análisis cuantitativo es llevado a cabo en forma paralela, en donde el usuario requiere las salidas estadísticas del modelo para una comparación con la información observada.

Cuando la comparación entre lo observado y simulado no es satisfactoria, es necesario realizar algunos cambios en los valores de los parámetros de cada modelo. Los chequeos y cambios considerados en el proceso de calibración se distribuyen en 4 categorías: red, demanda, configuración general de la simulación y comportamientos del conductor.

Por motivos de extensión de esta memoria, sólo serán revisados los MMT Aimsun y Paramics. En los anexos B y C se presentan las características generales y los parámetros de comportamiento respectivamente de los modelos seleccionados. Mientras que los anexos D y E se presentan los modelos básicos de comportamiento vehicular.

El área de análisis a considerar para el proceso de calibración está conformada por el cuadrante de calles: Pedro de Valdivia, Andrés Bello, Los Leones y Santa María, pertenecientes a la comuna de Providencia. El proceso de medición de datos para la calibración se realizó el viernes 9 de Noviembre del 2009 entre las 10:30 y 11:30 am.



Figura 2. Red de Calibración

Fuente: SECTRA.

4.1.- Diseño y Procedimiento de Experimento de Calibración y Validación.

Como se ha mencionado, el modelo entrega como salida la operación de los vehículos en la red, es decir la velocidad media, largos de cola, número de detenciones, consumo de combustible (parámetro no calibrado), entre otros. Por lo tanto se debe adoptar un criterio de calibración que replique el comportamiento observado y medido en terreno.

Se procedió a definir como indicador de rendimiento de la calibración, uno basado en el largo de cola observado en terreno, debido a que este valor engloba el comportamiento de los vehículos en la red, tanto en la descarga de semáforos como capacidad de intersecciones.

En el procedimiento de análisis se definen 2 niveles que se deben ser revisados durante la calibración:

- **Nivel de Red.** Básicamente corresponde a una verificación general en donde el modelo reproduzca los niveles de flujos
- **Características vehiculares y comportamiento de usuarios.** Tiene relación con la calibración de los parámetros por tipo de vehículos y de comportamiento de los usuarios.

En el primer nivel, también denominado calibración de la demanda, se debe verificar que los flujos simulados repliquen los niveles de flujo observados en terreno. En este proceso se involucran todos aquellos parámetros de red que influyen directamente en la elección de ruta de los usuarios. Así, se deben considerar las penalidades en los giros, la velocidad máxima en los distintos ejes, el nivel de conocimiento de los usuarios de los costos de la red y el modelo de asignación.

En el segundo nivel se calibran los parámetros vehiculares asociados a los conductores de la red con el objetivo de representar el comportamiento de cada tipo de vehículo en diferentes condiciones. A partir de diferentes estudios (Velasco, Didier) se llega a la conclusión que el largo de cola en una intersección corresponde a la mejor variable para conseguir el objetivo de este nivel. Se considera para este segundo nivel la intersección de Av. Santa María con Padre Letelier, en donde se miden las colas por cada acceso y pista.

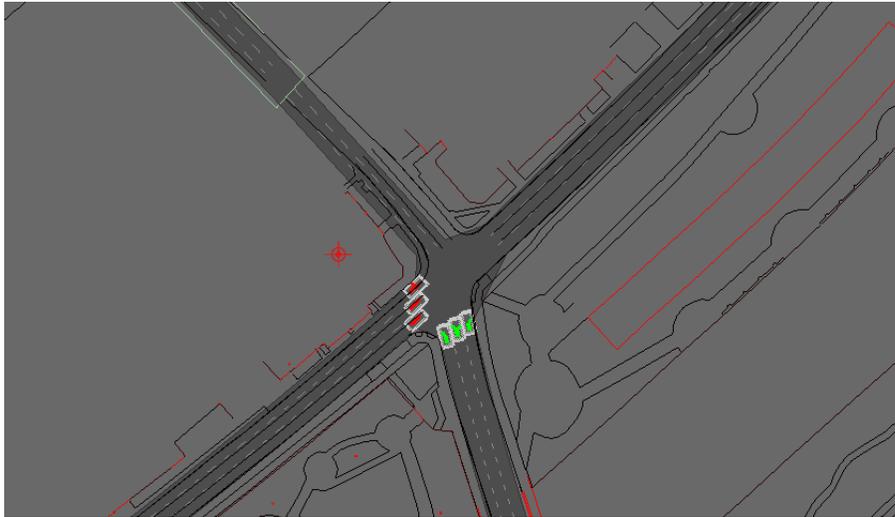


Figura 3. Intersección de Santa María con Padre Letelier codificada en Paramics

Fuente: Elaboración Propia

Para la validación del modelo, se debe considerar un indicador no utilizado durante el proceso de calibración y que capture los dos niveles mencionados anteriormente, es decir, que sea dependiente del nivel de flujo vehicular y del comportamiento del usuario en la red. Para este proceso se considerara por lo tanto el tiempo de viaje de distintos ejes. Se realiza la medición de los tiempos de viajes mediante el método de vehículo flotante de los ejes Santa María y Andrés Bello (en ambas direcciones) entre los cruces de Pedro de Valdivia y Los Leones.

Se utiliza un modelo manual para ir determinando los valores de los parámetros durante la calibración (Shaaban y Radwan 2005). Primero se realiza un análisis de sensibilidad de distintos parámetros de comportamiento en orden de observar que parámetros explican de mejor manera el indicador de rendimiento y cuales logran ir disminuyendo este valor. El parámetro cuyo valor minimiza el indicador de rendimiento se fija, luego se van modificando los valores de los otros parámetros explicativos hasta lograr el mejor valor posible.

4.2.- Indicadores de Rendimiento del Proceso de Calibración y Validación.

Para la calibración de la demanda se utilizara el estadístico GEH (3.2). En donde se considerara a nivel de red que un 85% de arcos con un GEH inferior a 5 es un ajuste satisfactorio.

Para el proceso de calibración de segundo nivel se considera los largos de cola en intersecciones, el indicador a nivel de red es el I.D. (3.1). Con esto, el objetivo del segundo nivel de calibración se resume en encontrar los valores de los parámetros de comportamiento vehicular que minimicen el indicador de desempeño.

Se debe recordar que los largos de cola observados en terreno corresponden a la longitud máxima de cola por ciclo. Dado esto en los modelos AIMSUN y PARAMICS se debe configurar de tal manera de recoger estos datos, para esto se elige como tiempo de captura de datos el ciclo de la intersección analizada y se analiza la variable "Máxima longitud de cola".

Por último, para el proceso de validación se comparan los tiempos de viajes observados y simulados de determinados ejes. En donde se considerará que al menos el 85% de los ejes simulados este dentro del 10% de diferencia relativa con respecto a la medición real.

4.3.- Construcción de la Red de Calibración.

En este punto se procede a crear la red de calibración, para esto se ocuparon los datos de medición realizados el viernes 11 de noviembre del 2009, entre las 10:30 y 11:30 am, además las programaciones de semáforos incluidas representan las condiciones actuales. Se utilizó dicho período y lugar ya que representa una buena combinación entre periodo fuera de punta y punta, ciclos semaforicos de 120 segundos y colas por pista

mayores a 10 veh/ciclo. Los resultados obtenidos del proceso de calibración se utilizarán para el resto de los escenarios a evaluar.

Cabe mencionar que para la correcta definición de la red vial se utilizaron los planos respectivos, de tal manera que se reproduzca la situación real. A continuación se presentan la construcción de la red en el simulador Aimsun.

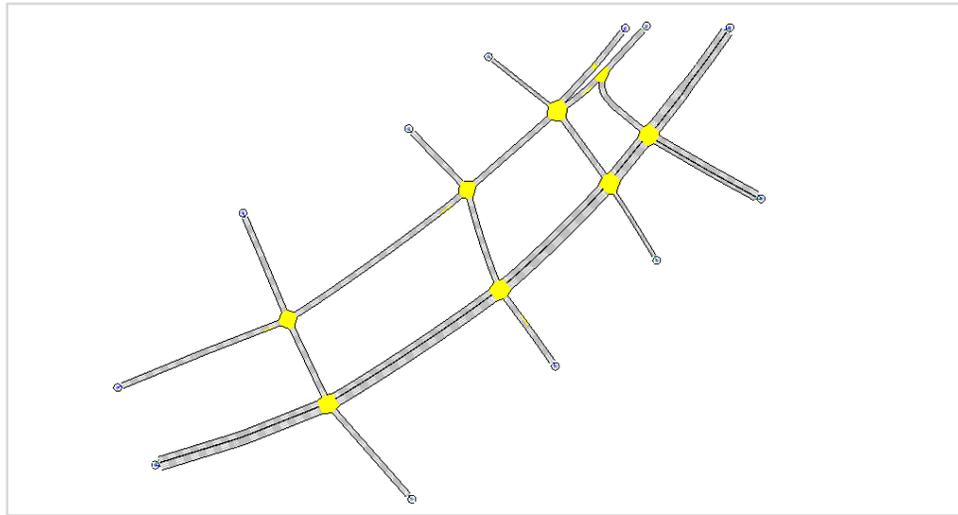


Figura 4. Red de Calibración codificada en Aimsun

Fuente: Elaboración Propia

4.3.1.- Elementos de Red.

Las zonas e intersecciones consideradas, así como las características de los arcos (velocidad límite, ancho de pista, etc.), se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 4. Zonas de Red de Calibración

Zona	Codificación	Tipo
Santa María (Poniente)	Zona 001	Generador
Andrés Bello (Poniente)	Zona 002	Generador / Atractor
Pedro de Valdivia (Sur)	Zona 003	Atractor
Pedro de Valdivia (Norte)	Zona 004	Generador
Lyon	Zona 005	Generador
Padre Letelier	Zona 006	Atractor
Suecia (norte)	Zona 007	Atractor
Suecia (sur)	Zona 008	Atractor
Andrés Bello (oriente)	Zona 009	Generador / Atractor
Santa María (oriente)	Zona 010	Atractor
Gobernador	Zona 011	Generador
Los Leones	Zona 012	Generador / Atractor

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5. Nodos de Red de Calibración

Intersección	Codificación	Prioridad	N° de Fases
Andrés Bello – PDV	Nodo 001	Variable	2
Santa María – PDV	Nodo 002	Variable	2
Andrés Bello – Lyon	Nodo 003	Variable	3
Santa María – PDV	Nodo 004	Variable	2
Andrés Bello – Suecia	Nodo 005	Variable	2
Santa María - Gobernador	Nodo 006	Variable	2
Santa María - Pte. Los Leones	Nodo 007	Variable	2
Andrés Bello - Los Leones	Nodo 008	Variable	2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6. Ejes de Red de Calibración

Eje	Dirección	Numero de pistas	Ancho de Pistas (m)	Velocidad Limite (km/h)
Andrés Bello	Bidireccional (P-O)	3, 4	3 - 3.2	60
Santa María	P-O	3	3.2	70
Pedro de Valdivia	N-S	3	3	50
Suecia	N-S	3	3	50
Lyon	S-N	3	3.5	50
Los Leones	Bidireccional (N-S)	2,3	3.5	50
Santa María (oriente)	O-P	3	3	50
Gobernador	S-N	2	3	50
Pte. Los Leones	S-N	3	3.5	50

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2.- Demanda.

La demanda de vehículos privados en ambos simuladores se ingresa a través de una matriz de origen – destino. Para la construcción de estas matrices se utilizó el estimador de matrices que posee Paramics llamado Estimator. Esta aplicación es alimentada con los flujos en arcos, los flujos por movimiento en intersecciones y los flujos entrantes y salientes de cada zona. Este estimador calcula en cada iteración el GEH entre los flujos observados y simulados en arcos, intersecciones y zonas. Además se puede asignar pesos para indicar una mayor importancia en la convergencia por arco, por cordón o por intersección.

Los resultados obtenidos de la estimación de matrices OD en vehículos equivalentes se presentan a continuación.

Tabla 7. Estimación Matriz OD, 10:30 – 10:45

10.3	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10	Zona 11	Zona 12
Zona 1		0	70			2	1	11	55	136		1
Zona 2			40			4	1	10	337	45		1
Zona 3												
Zona 4		69	71			9	2	19	20	24		4
Zona 5		0	0			61	1	18	6	54		26
Zona 6												
Zona 7												
Zona 8												
Zona 9		294	13			27	1	0		0		27
Zona 10												
Zona 11		1	1			1	10	95	3	5		48
Zona 12		34	1			15	1	0	0	88		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8. Estimación Matriz OD, 10:45 – 11:00

10.4	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10	Zona 11	Zona 12
Zona 1		0	59			6	1	1	64	222		1
Zona 2			44			35	1	27	357	53		1
Zona 3												
Zona 4		35	106			6	1	19	18	3		1
Zona 5		0	0			62	1	13	3	70		38
Zona 6												
Zona 7												
Zona 8												
Zona 9		272	14			48	1	0		8		75
Zona 10												
Zona 11		1	1			0	11	154	4	5		32
Zona 12		78	1			1	1	0	0	92		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9. Estimación Matriz OD, 11:00 – 11:15

11.1	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10	Zona 11	Zona 12
Zona 1		0	63			10	1	1	90	183		2
Zona 2			26			45	1	51	218	40		7
Zona 3												
Zona 4		31	85			15	2	10	11	17		35
Zona 5		0	0			45	1	0	29	102		11
Zona 6												
Zona 7												
Zona 8												
Zona 9		240	15			69	1	0		3		73
Zona 10												
Zona 11		19	1			0	7	131	12	10		3
Zona 12		90	0			1	1	0	0	98		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10. Estimación Matriz OD, 11:15 – 11:30

11.2	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9	Zona 10	Zona 11	Zona 12
Zona 1		0	76			3	1	2	63	178		1
Zona 2			37			72	1	50	274	8		12
Zona 3												
Zona 4		29	72			10	3	45	6	19		7
Zona 5		0	0			53	1	31	14	107		30
Zona 6												
Zona 7												
Zona 8												
Zona 9		263	6			4	1	0		2		64
Zona 10												
Zona 11		17	1			0	10	92	1	10		73
Zona 12		6	0			52	1	0	0	106		

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3.- Líneas de Transporte Público.

4.3.3.1.- Consideraciones Previas.

Paramics tiene incorporado dos tipos de vehículos asociados a transporte público: bus y minibús, cuyas características por defecto no se ajustan a lo que se observa en la zona de análisis. La capacidad por defecto que puede tener un bus en Paramics es de 80 personas, por debajo de las 160 personas de capacidad de los troncales articulados que circulan por esta zona. Sin embargo, estos valores pueden ser modificados al igual que el número de puertas utilizado para subir y bajar. La demanda en los paraderos es por línea (no así por tipo de línea atractiva), la cual tiene una llegada uniforme al paradero. Las demoras en paraderos dependen o del tiempo de transferencia de pasajeros o de un tiempo fijo determinado por el usuario.

Por otra parte, AIMSUN tiene por defecto un vehículo asociado a transporte público: bus. La capacidad de un bus en AIMSUN es ilimitada, con lo cual no se puede ajustar. De esta manera las demoras en paraderos son determinadas por el usuario, en donde se especifica el tiempo medio de demora y su desviación.

4.3.3.2.- Vehículos asociados a Transporte Público.

En la tabla se presentan los tipos de vehículos mayormente utilizados en Transantiago. Se observaron en terreno solamente buses de tipo troncal, en su mayoría los de tipo articulado (capacidad de 160 personas), debido a esto se considerarán estos en la codificación de las líneas fijas de transporte público en ambos simuladores.

Tabla 11. Tipos de Vehículos Asociados a Transporte Público.

Tipo Vehículo	Capacidad [pax/bus]	Longitud [m]	Puertas Subida	Puertas Bajada
Micro	65	9	1	1
Bus Troncal	80	12	1	2
Bus Troncal - Articulado	160	18.5	1	3

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3.3.- Recorridos de Transporte Público.

En la zona de estudio se contabilizaron 4 recorridos de tipo troncal, las líneas de estos recorridos son: 409, 410, 411 y 502. De acuerdo a nuestra codificación los recorridos 409 y 502 van desde la zona 1 a la zona 10, transitando por Santa María y deteniéndose en todos los paraderos de este eje. El recorrido 410 va desde la zona 1 a la zona 3, solo deteniéndose en el paradero ubicado en Santa María con Pedro de Valdivia. Por último el recorrido 411 va desde la zona 5 a la zona 10, comenzado su recorrido por Nueva Lyon, para luego doblar por Santa María, deteniéndose en dos paraderos, uno ubicado en Nueva Lyon con Andrés Bello y el otro en Santa María con Puente Los Leones.

4.3.3.4.- Codificación de Paraderos.

En primer lugar se debe establecer la ubicación de los paraderos. Estos se definen, para ambos simuladores, en arcos de la red. Al codificar paraderos se debe ingresar propiedades de estos como nombres y largo del paradero.

Tabla 12. Paraderos de Transporte Público de Red de Calibración

Código de Paradero	Ubicación	Longitud de Parada[m]	Recorridos Asociados
PC 318	Santa María - Pedro de Valdivia	10	409, 410, 502
PC 350	Nueva Lyon - Andrés Bello	10	411
PC 319	Santa María - Padre Letelier	10	409,502
PC 320	Santa María - Pte. Los Leones	10	409, 411, 502

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3.5.- Codificación de Líneas de Transporte Público.

Una vez añadidos los paraderos se procede a codificar las líneas de transporte público. Este proceso en Aimsun y Paramics queda definido para cada línea de acuerdo a la tabla 1.

Los valores de frecuencia se obtuvieron de las mediciones en terreno, se considera que las líneas operan en intervalos constantes. Debido a la baja demanda, se supone una demora media en paraderos de 10 segundos y una desviación de 2 segundos.

Tabla 13. Líneas de Transporte Público de Red de Calibración

Línea de Recorrido	Tipo de Salida	Intervalo [min/veh]	Demora Media en Paraderos [s]	Desviación [s]
409	Intervalo	8	10	2
410	Intervalo	8	10	2
411	Intervalo	8	10	2
502	Intervalo	4	10	2

Fuente: Elaboración Propia

4.4.- Aplicación de Procedimiento de Calibración.

4.4.1.- Calibración de Demanda.

En este nivel es en donde se comparan los flujos vehiculares simulados con los observados. Aquí se calibra los parámetros a nivel de red, incluyendo el modelo de elección de ruta que se utilizará durante el siguiente nivel de red. Se seleccionan aquellos valores de parámetros que minimicen el GEH promedio global a nivel de red y que además el 85% de la muestra de flujos en arcos tengan un GEH inferior a 5.

Los modelos seleccionados de ambos simuladores se presentan continuación.

Tabla 14. Valores de parámetros de calibración de primer nivel

Simulador	Aimsun	Paramics
Modelo	Binomial	Todo o Nada (dinámico)
Tiempo de Cálculo de los Costos	00:01:00	00:01:00
Parámetros	$p = 1.00$	$a = 1.00 ; b = 0 ; c = 0$

Fuente: Elaboración Propia

Los valores de flujos en arcos obtenidos utilizando la configuración anterior, así como también el valor del GEH en los distintos arcos y a nivel global, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 15. Estadístico GEH de calibración de primer nivel

Intersección	Acceso	Flujos Observados	Flujos Simulados [veh/h]		GEH	
		[veh/h]	Aimsun	Paramics	Aimsun	Paramics
Pedro de Valdivia / Andrés Bello	Pedro de Valdivia	940	910	900	1.0	1.3
	AB (Oriente)	1574	1426	1428	3.8	3.8
	AB (Poniente)	2181	2068	2082	2.5	2.1
Pedro de Valdivia / Santa María	Pedro de Valdivia	866	830	837	1.2	1.0
	Santa María	1385	1296	1317	2.4	1.9
Nueva Lyon / Andrés Bello	Lyon	959	954	969	0.2	0.3
	AB (Oriente)	1765	1597	1585	4.1	4.4
	AB (Poniente)	2267	2048	2038	4.7	4.9
Padre Letelier / Santa María	Padre Letelier	1143	1177	1179	1.0	1.1
	Santa María	1256	1195	1231	1.7	0.7
Suecia / Andrés Bello	Suecia	1109	1067	1036	1.3	2.2
	AB (Oriente)	1517	1572	1602	1.4	2.2
	AB (Poniente)	2094	1924	1955	3.8	3.1
Gobernador / Santa María	Gobernador	812	769	713	1.5	3.6
	Santa María	1562	1705	1746	3.5	4.5
Los Leones / Andrés Bello	Los Leones	668	716	754	1.8	3.2
	AB (Oriente)	1412	1509	1554	2.5	3.7
	AB (Poniente)	1775	2179	2184	9.1	9.2
Pte. Los Leones - Santa María	Los Leones	533	429	455	4.7	3.5
	Santa María	1254	1323	1335	1.9	2.3
GEH < 5					95%	95%
GEH Promedio					2.7	2.7

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla anterior, los flujos se ajustan de gran manera entre lo observado y simulado, siendo solamente el acceso poniente de Los Leones con Andrés Bello, con un valor de GEH por sobre 5, el cual ocurre en ambos simuladores por igual. En general, ambos modelos arrojan los mismos niveles de flujos, incluyendo el valor promedio de GEH.

4.4.2.- Calibración de Capacidad.

En este nivel es en donde se calibra los parámetros de comportamiento vehicular y en donde el indicador a minimizar es el ID de longitud máxima de cola. Como indica la distinta literatura de calibración el primer paso es analizar la sensibilidad del indicador a los distintos parámetros físicos y de comportamiento de cada DVU.

4.4.2.1.- Análisis de Sensibilidad de Parámetros de Aimsun.

Los valores iniciales o por defecto utilizado en el simulador Aimsun se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 16. Valores de Parámetros Generales por Defecto AIMSUN

Nombre	Valor	Unidad
Velocidad de formación de cola	1.0	[m/s]
Velocidad de disipación de cola	4.0	[m/s]
Tiempo de Reacción	0.75	[s]
Tiempo de Reacción en parada	1.35	[s]

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17. Valores de Parámetros por Defecto AIMSUN Autos Livianos

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	4	0.5	3.4	4.6	Metros
Ancho	2	0	2	2	Metros
Velocidad máx. deseada	110	10	80	150	Km/h
Aceleración máx.	3	0.2	2.6	3.4	m/s ²
Desaceleración normal	4	0.25	3.5	4.5	m/s ²
Desaceleración máx.	6	0	6	6	m/s ²
Aceptación de Velocidad	1.1	0.1	0.9	1.3	
Distancia mín. entre veh.	1	0.3	0.5	1.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. Valores de Parámetros por Defecto AIMSUN Buses

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	12	2	9	15	Metros
Ancho	2.3	0.5	1.9	3	Metros
Velocidad máx. deseada	90	10	80	120	Km/h
Aceleración máx.	1	0.3	0.8	1.8	m/s ²
Desaceleración normal	2	2	1.5	4.8	m/s2
Desaceleración máx.	6	2	4.5	8	m/s2
Aceptación de Velocidad	1	0.1	0.9	1.1	
Distancia mín. entre veh.	1.5	0.5	1	2.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19. Valores de Parámetros por Defecto AIMSUN Camiones

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	7.5	2	6	10	Metros
Ancho	2.3	0.5	1.9	3	Metros
Velocidad máx. deseada	85	10	70	100	Km/h
Aceleración máx.	1	0.5	0.6	1.8	m/s ²
Desaceleración normal	3.5	1	2.5	4.8	m/s2
Desaceleración máx.	6	0.5	4	6	m/s2
Aceptación de Velocidad	1	0	1	1	
Distancia mín. entre veh.	1.5	0.5	1	2.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración Propia

Se considera para el resto del análisis que se ha seleccionado el modelo Binomial con parámetro $p = 1$, el cual es equivalente a un modelo todo o nada. Además se considera que la desaceleración estimada por el vehículo seguidor del modelo de Gipps es de acuerdo al factor de sensibilidad (Anexo E).

a) Paso de Simulación o Tiempo de Reacción

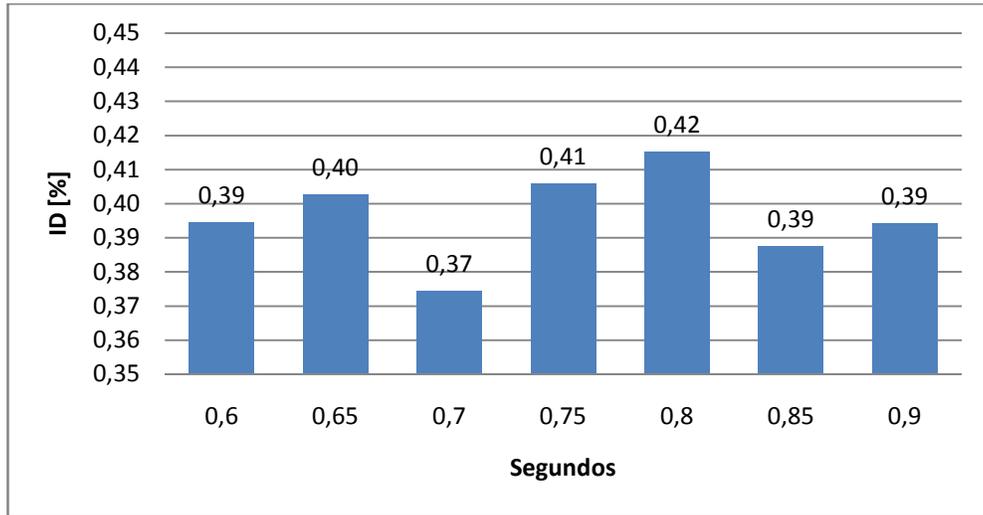


Figura 5. Análisis de Sensibilidad Parámetro Paso de Simulación

Fuente: Elaboración Propia

Del grafico anterior se desprende la variación del indicador ID que se obtiene al mover este parámetro, aunque esta variación no es regular, ya que crece y disminuye para valores mayores y menores que el por defecto. Con el valor de 0.7 del tiempo de reacción es en donde se obtiene el mejor ID.

b) Tiempo de Reacción en Reposo

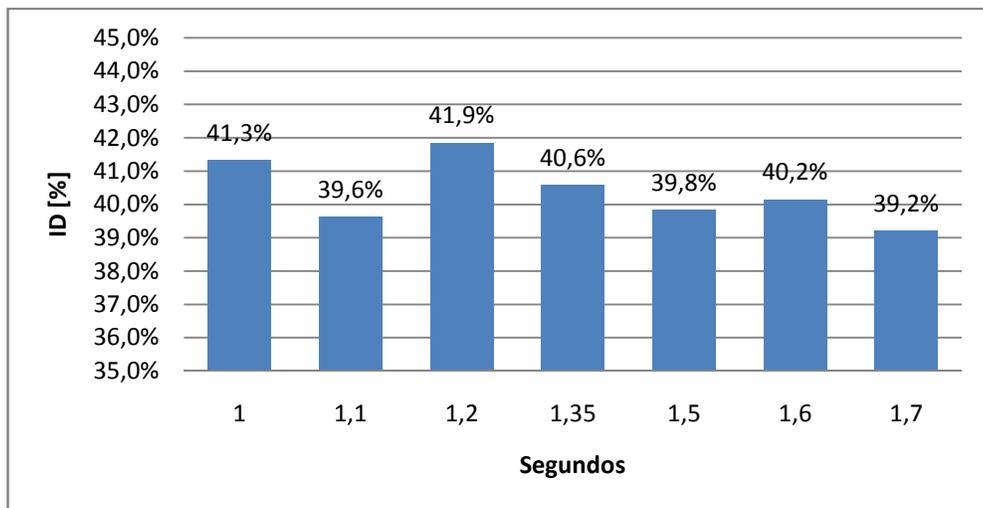


Figura 6. Análisis de Sensibilidad Parámetro Tiempo de Reacción en Reposo

Fuente: Elaboración Propia

En este caso, la variación con respecto al valor por defecto es insignificante, obteniendo una variación máxima de 1,4% con respecto al valor por defecto.

c) Velocidad Deseada (vehículos livianos)

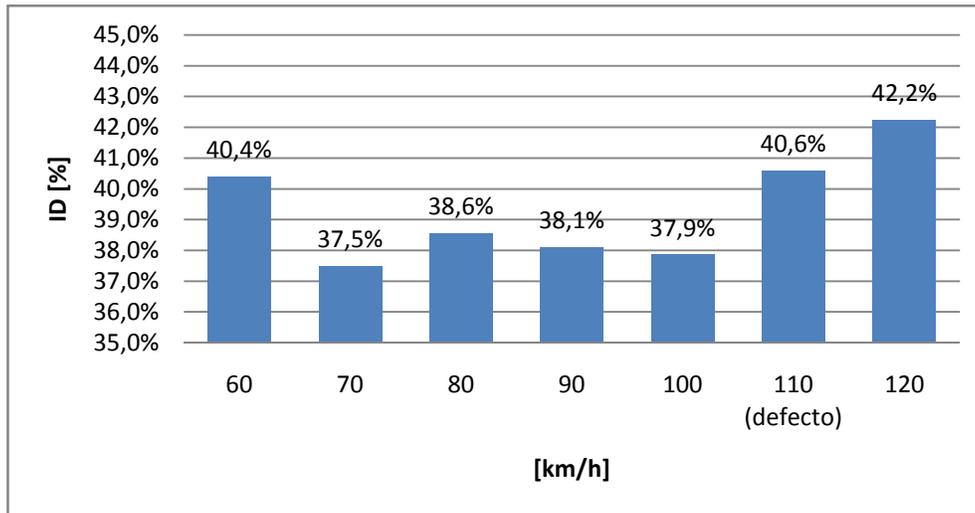


Figura 7. Análisis de Sensibilidad Parámetro Velocidad Deseada

Fuente: Elaboración Propia

Este parámetro también hace disminuir de manera significativa el indicador ID, obteniendo una mejoría en un 3.1%. Se observa que a medida que el parámetro disminuye el ID también hasta el valor de 60 [km/h]. Esto puede ocurrir ya que la velocidad máxima límite en Santa María es de 70 [km/h]. Además se debe considerar que estamos frente a un periodo fuera de punta; en estudios similares este valor se ha calibrado en un valor de 55 [km/h] (Velasco 2004) para vehículos livianos en un período de punta mañana.

d) Máxima Aceleración (vehículos livianos)

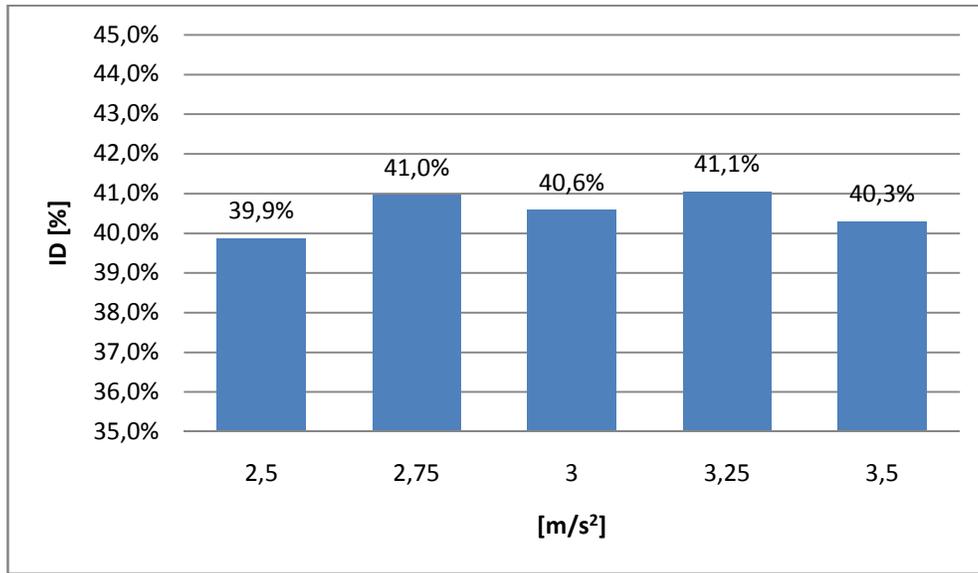


Figura 8. Análisis de Sensibilidad Parámetro Max. Aceleración

Fuente: Elaboración Propia

La variación del indicador ID es insignificante con respecto a este parámetro, alcanzándose un valor máximo de 0.7% de diferencia con respecto al valor por defecto.

e) Máxima Desaceleración (vehículos livianos)

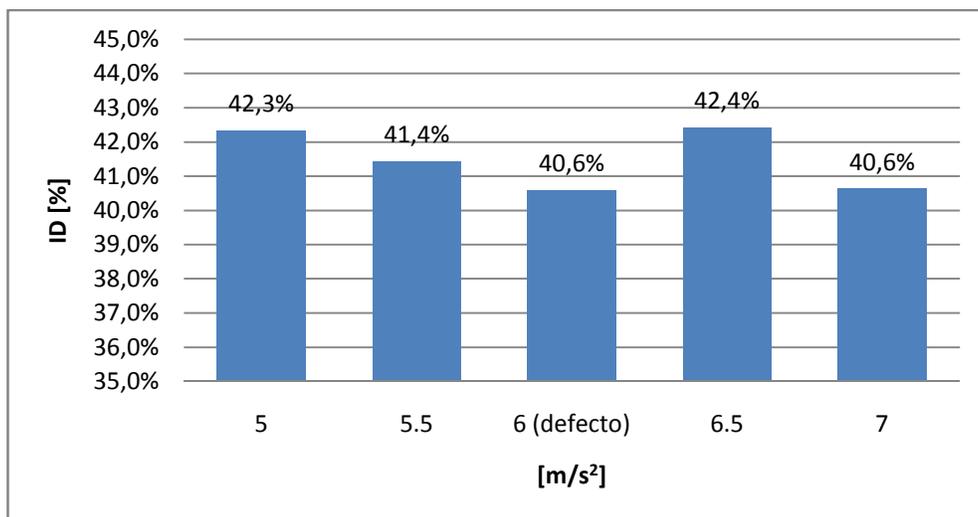


Figura 9. Análisis de Sensibilidad Parámetro Max. Desaceleración

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que no se obtienen nuevas mejoras al mover este parámetro con respecto al valor por defecto.

f) Velocidad de Formación de Cola

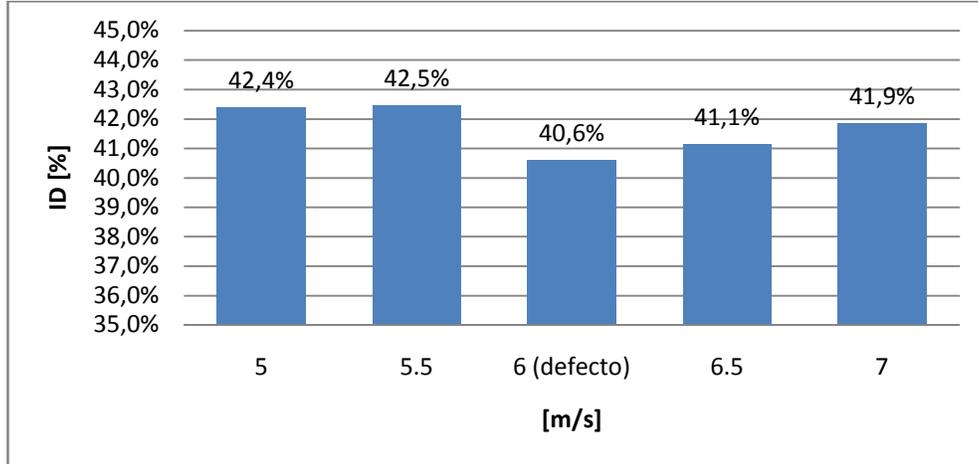


Figura 10. Análisis de Sensibilidad Parámetro Velocidad Formación de Cola

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que no se obtienen nuevas mejoras al mover este parámetro con respecto al valor por defecto.

g) Velocidad de Disipación de Cola

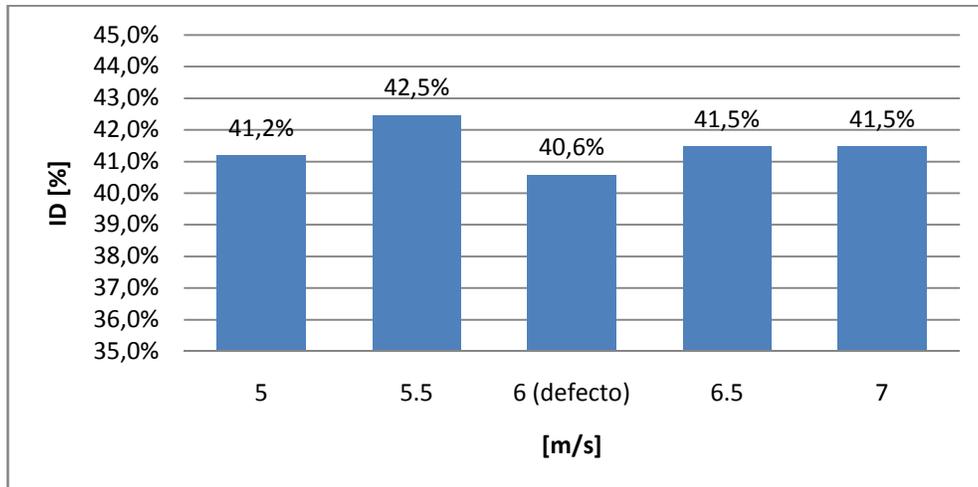


Figura 11. Análisis de Sensibilidad Parámetro Velocidad Salida de Cola

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que no se obtienen nuevas mejoras al mover este parámetro con respecto al valor por defecto.

h) Distancia mínima entre vehículos (vehículos livianos)

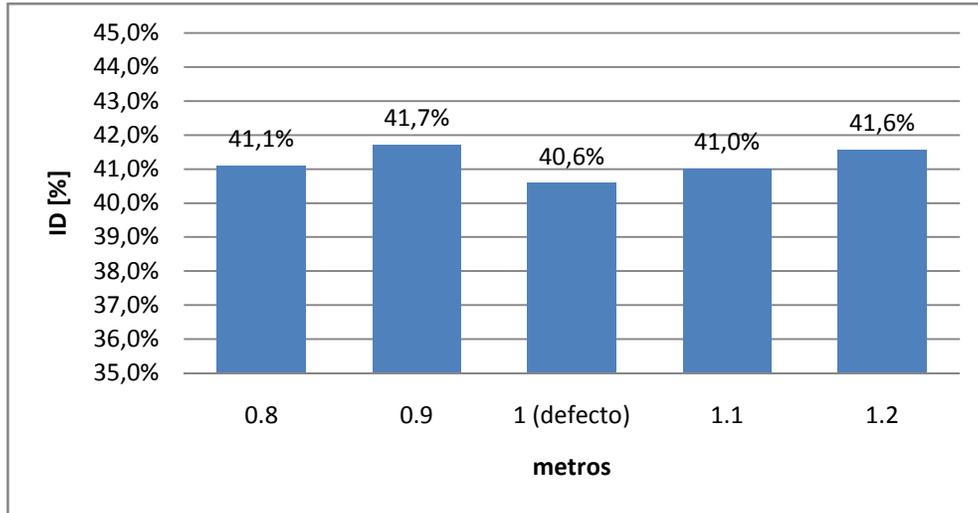


Figura 12. Análisis de Sensibilidad Parámetro Distancia Mínima

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que no se obtienen nuevas mejoras al mover este parámetro con respecto al valor por defecto.

i) Sensibilidad (vehículos livianos)

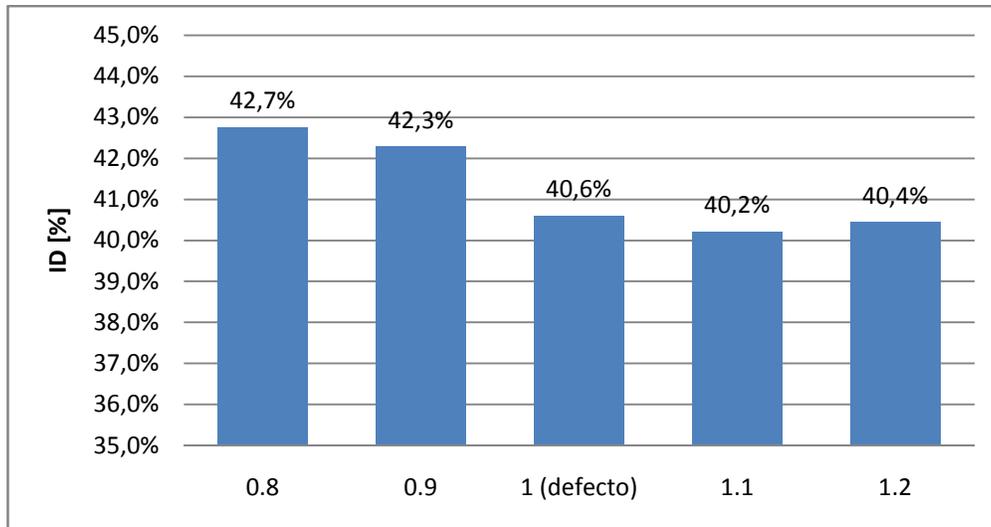


Figura 13. Análisis de Sensibilidad Parámetro Sensibilidad.

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que no se obtienen mejoras significativas al mover este parámetro con respecto al valor por defecto, obteniéndose una mejora máxima de 0.4%.

En la tabla N° 20 se muestra un resumen del proceso de análisis revisado anteriormente, en donde se presenta el coeficiente de variación del indicador de rendimiento y la mejora máxima obtenida dependiente del valor de cada parámetro de comportamiento.

Tabla 20. Resumen Análisis de Sensibilidad en Aimsun

Parámetro	Coefficiente de Variación ID	Mejora Obtenida ID [%]
Paso de Simulación	0.033	3.2
Tiempo de Reacción en Reposo	0.023	1.4
Velocidad Deseada	0.045	3.1
Max. Aceleración	0.011	0.7
Max. Desaceleración	0.021	0
Velocidad Formación de Cola	0.019	0
Velocidad Disipación de Cola	0.016	0
Distancia Mínima	0.028	0
Sensibilidad	0.011	0.4

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la tabla anterior los parámetros más explicativos del indicador de rendimiento son el paso de simulación, el tiempo de reacción en reposo, la velocidad deseada y la distancia mínima. Sin embargo, sólo se tienen mejoras significativas con los primeros tres nombrados, por lo cual se utilizaran estos parámetros para mejorar el indicador de rendimiento de la red.

4.4.2.2.- Análisis de Sensibilidad de Parámetros de Paramics.

Los valores iniciales o por defecto utilizado en el simulador Paramics se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 21. Valores de Parámetros por Defecto PARAMICS

Parámetro	Tipo	Valor
Headway [s]	Global	1
Gap Mínimo [m]	Global	2
Tiempo reacción [s]	Global	1
Distancia Entrada en Cola [m]	Global	10
Velocidad entrada en Cola [km/h]	Global	7.2
Aceleración máxima [m/s ²]	auto	2.5
	CAM	1.7
	TP	0.9
Desaceleración máxima [m/s ²]	auto	4.7
	CAM	3.2
	TP	3.2
Velocidad máxima [km/h]	auto	160
	CAM	100
	Bus	65

Fuente: Elaboración Propia

Se considera para el análisis de sensibilidad un modelo de elección de ruta todo o nada con un periodo de retroalimentación en los costos por ruta de un minuto, además de un valor de familiaridad para todos los tipos de vehículos de un 85%. Cada conjunto de parámetros es simulado con cinco semillas de valores aleatorios.

a) Headway

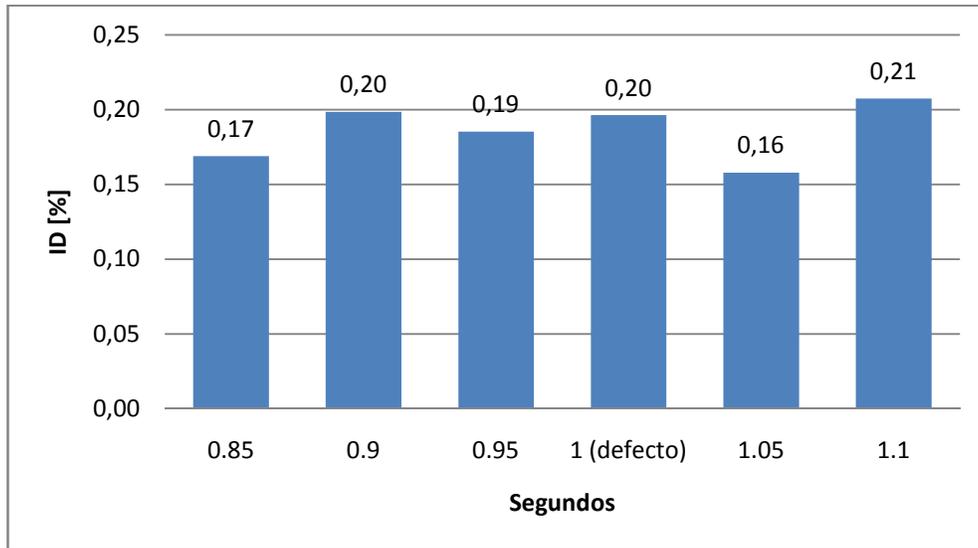


Figura 14. Análisis de Sensibilidad Parámetro Headway.

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende la relevancia del parámetro Headway en el indicador ID, obteniéndose una mejora del 3.8% en el valor de 1.05 [s].

b) Tiempo de Reacción

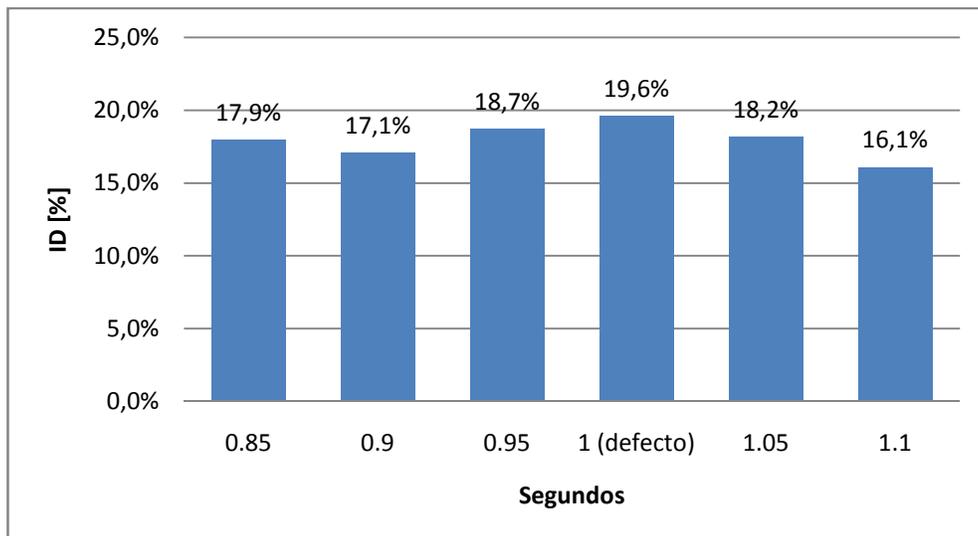


Figura 15. Análisis de Sensibilidad Parámetro Tiempo de Reacción

Fuente: Elaboración Propia

Al igual que en el parámetro Headway, se obtienen diferencias significativas del indicador ID al mover este parámetro. La mejora máxima se obtiene en el valor de reacción de 1.1 [s], mejorando un 3.5% con respecto al valor por defecto.

c) Gap Mínimo

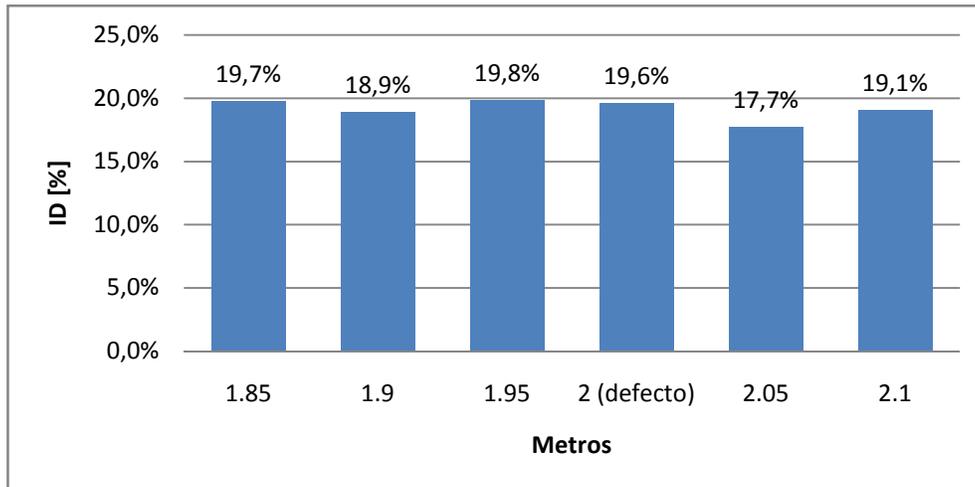


Figura 16. Análisis de Sensibilidad Parámetro Gap Mínimo.

Fuente: Elaboración Propia

En este parámetro también se observan mejoras del indicador ID con respecto al valor por defecto, sin embargo fluctúa de menor manera que en los casos anteriores. La máxima mejora se obtiene en el valor de 2.05 [m].

d) Máxima Aceleración (vehículos livianos)

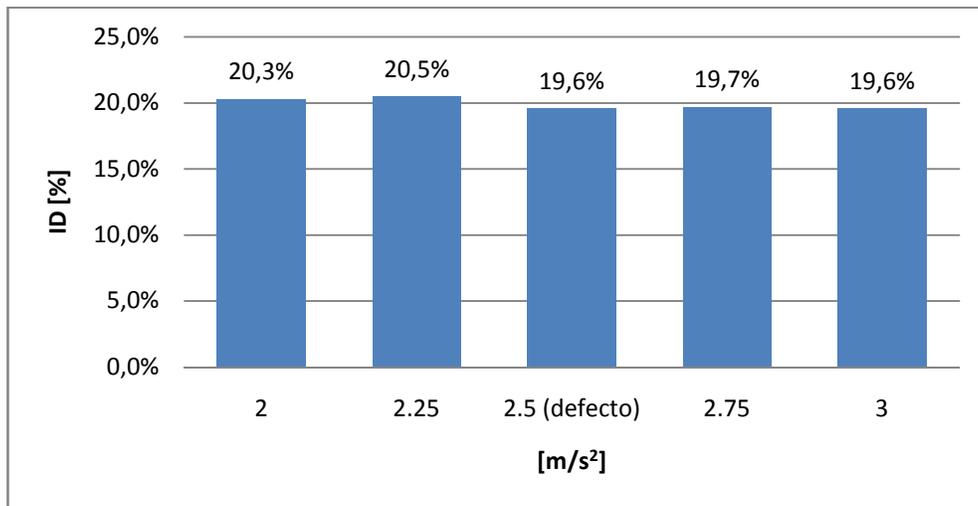


Figura 17. Análisis de Sensibilidad Parámetro Max. Aceleración

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que no se obtienen nuevas mejoras al mover este parámetro con respecto al valor por defecto.

e) Máxima Desaceleración (vehículos livianos)

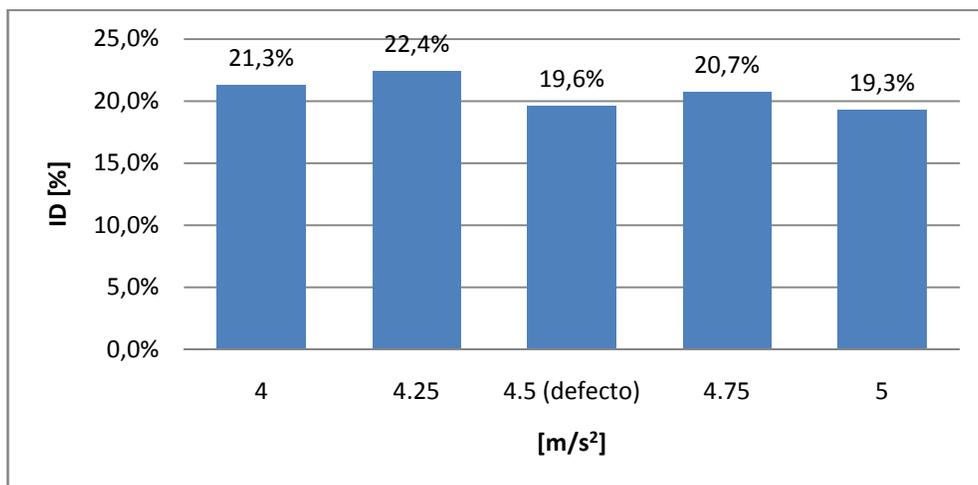


Figura 18. Análisis de Sensibilidad Parámetro Max. Desaceleración

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que no se obtienen mejoras significativas al mover este parámetro con respecto al valor por defecto, obteniéndose una mejora máxima de 0.3%.

f) Velocidad Máxima (vehículos livianos)

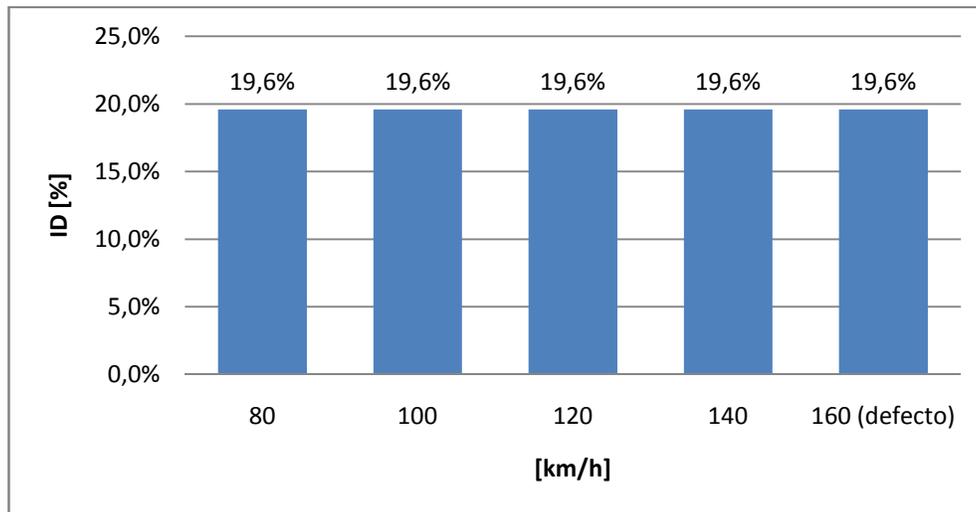


Figura 19. Análisis de Sensibilidad Parámetro Velocidad Máxima

Fuente: Elaboración Propia

Del gráfico anterior se desprende que este parámetro no es relevante en el indicador ID ni el comportamiento vehicular. La velocidad máxima no influye directamente en el modelo de seguimiento vehicular, siendo solamente una característica física del vehículo, la cual tiene efecto cuando es menor que la velocidad límite máxima impuesta en un arco. Cabe recordar que la velocidad máxima de un vehículo es el máximo entre esta velocidad y la velocidad límite, en donde esta última es sobrepasada en un 10% (Quadstone Paramics Manual). De acuerdo a Hidas (2005) la velocidad deseada es dependiente, entre otros parámetros, del valor de agresividad de los usuarios, el cual no es modificable en esta licencia de Paramics.

En la tabla N° 22 se muestra un resumen del proceso de análisis revisado anteriormente, en donde se presenta el coeficiente de variación del indicador de rendimiento y la mejora máxima obtenida dependiente del valor de cada parámetro de comportamiento.

Tabla 22. Resumen Análisis de Sensibilidad en Paramics

Parámetro	Coefficiente de Variación ID	Mejora Obtenida ID [%]
Headway	0.102	3.8
Tiempo de Reacción	0.068	3.5
Gap Mínimo	0.041	1.9
Max. Aceleración	0.021	0
Max. Desaceleración	0.061	0.3
Velocidad Máxima	0	0

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo al análisis de sensibilidad efectuado, los parámetros más relevantes en el indicador ID son: Headway, Tiempo de reacción y el Gap mínimo. Estos parámetros son los mismos modificados por Didier (2009) en su estudio de calibración de Paramics, con lo cual se recomienda para el proceso de calibración de este simulador enfocarse en estos parámetros.

4.4.2.3.- Resultados Finales Calibración de Capacidad.

Luego de analizar cuáles son los parámetros relevantes en el comportamiento de cada vehículo, se procedió a modificar los valores de estos parámetros en un proceso iterativo con el fin de mejorar el indicador ID en cada simulador.

Los resultados obtenidos del proceso de calibración para el simulador AIMSUN se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 23. Valores de Parámetros Generales Calibrados en AIMSUN

Nombre	Valor	Unidad
Velocidad de formación de cola	1.0	[m/s]
Velocidad de disipación de cola	4.0	[m/s]
Tiempo de Reacción	0.7	[s]
Tiempo de Reacción en parada	1.35	[s]

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24. Valores de Parámetros Calibrados AIMSUN Autos Livianos

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	4	0.5	3.4	4.6	Metros
Ancho	2	0	2	2	Metros
Velocidad máx. deseada	70	10	50	100	Km/h
Aceleración máx.	3	0.2	2.6	3.4	m/s ²
Desaceleración normal	4	0.25	3.5	4.5	m/s ²
Desaceleración máx.	6	0	6	6	m/s ²
Aceptación de Velocidad	1.1	0.1	0.9	1.3	
Distancia mín. entre veh.	1	0.3	0.5	1.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25. Valores de Parámetros Calibrados AIMSUN Buses

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	18	0	18	18	Metros
Ancho	2.3	0.5	1.9	3	Metros
Velocidad máx. deseada	60	10	50	80	Km/h
Aceleración máx.	1	0.3	0.8	1.8	m/s ²
Desaceleración normal	2	2	1.5	4.8	m/s ²
Desaceleración máx.	6	2	4.5	8	m/s ²
Aceptación de Velocidad	1	0.1	0.9	1.1	
Distancia mín. entre veh.	1.5	0.5	1	2.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26. Valores de Parámetros Calibrados AIMSUN Camiones

Nombre	Media	Desviación	Mín.	Máx.	Unidad
Largo	7.5	2	6	10	Metros
Ancho	2.3	0.5	1.9	3	Metros
Velocidad máx. deseada	60	10	50	80	Km/h
Aceleración máx.	1	0.5	0.6	1.8	m/s ²
Desaceleración normal	3.5	1	2.5	4.8	m/s ²
Desaceleración máx.	6	0.5	4	6	m/s ²
Aceptación de Velocidad	1	0	1	1	
Distancia mín. entre veh.	1.5	0.5	1	2.5	Metros
Sensibilidad	1	0	1	1	

Fuente: Elaboración Propia

El indicador ID calibrado arroja un valor de 15.1%, el cual es una disminución en un 11% relativo al valor de este indicador con los valores de los parámetros por defecto.

Los resultados obtenidos para el simulador PARAMICS se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 27. Valores de Parámetros Calibrados en PARAMICS

Parámetro	Tipo	Valor
Headway [s]	Global	1.05
Gap Mínimo [m]	Global	2.05
Tiempo reacción [s]	Global	1
Distancia Entrada en Cola [m]	Global	10
Velocidad entrada en Cola [km/h]	Global	7.2
Aceleración máxima [m/s ²]	auto	2.5
	CAM	1.7
	TP	0.9
Desaceleración máxima [m/s ²]	auto	4.7
	CAM	3.2
	TP	3.2
Velocidad máxima [km/h]	auto	160
	CAM	100
	Bus	65

Fuente: Elaboración Propia

El indicador ID calibrado arroja un valor de 15.0%, el cual es una disminución en un 23% relativo al valor de este indicador con los valores de los parámetros por defecto.

4.4.3.- Validación.

En este proceso se analiza como indicador los tiempos de viajes en determinadas rutas. Las rutas consideradas son aquellas utilizadas por los ejes principales de la red de Calibración: Av. Santa María y Av. Andrés Bello. Cabe recordar que en este nivel se consideran los parámetros finales obtenidos de los niveles anteriores, en otras palabras, en este nivel es en donde finalmente se valida todo el proceso de calibración.

Se considera como tiempo de viaje, el tiempo total desde un origen hasta un destino, incluyendo los tiempos de detención. Los resultados de tiempo de viaje obtenidos para ambos simuladores se presentan a continuación.

Tabla 28. Validación de los MMT Aimsun y Paramics

Vía	Entre	Tiempo de Viaje Promedio [s/veh]			Diferencia Relativa [%]	
		Observado	Aimsun	Paramics	Aimsun	Paramics
Santa María	Pedro de Valdivia - Los Leones	51.3	60.4	60.2	17.74	17.35
Andrés Bello	Pedro de Valdivia - Los Leones	93.7	88.7	93.1	5.34	0.64
Andrés Bello	Los Leones - Pedro de Valdivia	118.3	120.3	114.1	1.69	3.55

Fuente: Elaboración Propia

En los resultados anteriores se observa una gran similitud entre los tiempos de viajes observados y simulados. El único eje que está por arriba del 10% de diferencia relativa entre los tiempos de viajes observados y simulados es el de Santa María, sin embargo, la diferencia es inferior a un minuto, siendo solamente de 9.1 segundos. De acuerdo a los criterios de tiempos de viajes presentados en la Tabla 3 la validación de los modelos de microsimulación resulta satisfactoria.

4.5.- Análisis de Proceso de Calibración.

De manera similar y complementaria de estudios similares de calibración (Velasco 2004, Didier 2009), aquí se presenta un proceso lógico de calibración el cual debe ser efectuado en cada modelación microscópica de una determinada red. Los tres niveles de calibración presentados engloban todos los modelos microscópicos de tráfico, en donde se comienza por el tema de la distribución de viajes entre pares origen – destino y la asignación de estos vehículos en la red, hasta ya un proceso más detallado de calibrar aquellos parámetros de comportamiento de los vehículos, los cuales rigen los modelos microscópicos de seguimiento vehicular y cambio de pista.

El tiempo consumido en este proceso es función básicamente del tamaño de la red (calibración del primer nivel), la cantidad de arcos en donde se miden colas (calibración del segundo nivel) y la cantidad de parámetros a calibrar en cada modelo. Es en esto último, la cantidad de parámetros, en donde se diferencia el tiempo consumido entre uno y otro simulador. Así pues, debido a una mayor cantidad de modelos de elección de ruta, y una mayor cantidad de parámetros de comportamiento es que en el simulador AIMSUN este proceso consume una mayor cantidad de tiempo.

Otro aspecto importante de este proceso, es que los parámetros de comportamiento de Paramics tienen el mismo nivel de sensibilidad que los parámetros en Aimsun. Sin embargo, la disminución relativa del indicador de rendimiento en sus valores por defecto fue mayor en Paramics que en Aimsun. Finalmente, de igual manera que en otros estudios (Velasco 2004, Didier 2009), los valores más sensibles al indicador de rendimiento en Aimsun y Paramics es la Velocidad Deseada y el Headway respectivamente.

Capítulo 5

APLICACIÓN DE MODELOS DE MICROSIMULACIÓN

En este capítulo se presentan aplicaciones de los microsimuladores en distintos escenarios considerados por la Unidad Operativa de Control de Tránsito. Estos escenarios en general representan situaciones proyectadas a futuro en dónde se analizan modificaciones a la operación actual de una determinada red. Se considera dentro de este análisis la aplicación de los microsimuladores en conjunto con otro tipo de simuladores como Transyt 8S y Saturn 10.

5.1.- Definición de Escenarios de Evaluación.

5.1.1.- Escenario 1: Medidas de Mitigación del Impacto Vial del Costanera Center (Etapa 3 y 4 del Proyecto).

A modo de estudio de los simuladores, este escenario permite evaluar impactos en mejoras de infraestructura y analizar la asignación de rutas y comparar con resultados obtenidos de una red Saturn de tipo inner. En este escenario se evalúa la operación de la red con la entrada en operación del túnel San Cristóbal, la habilitación de un nuevo puente y la modificación de Andrés Bello.

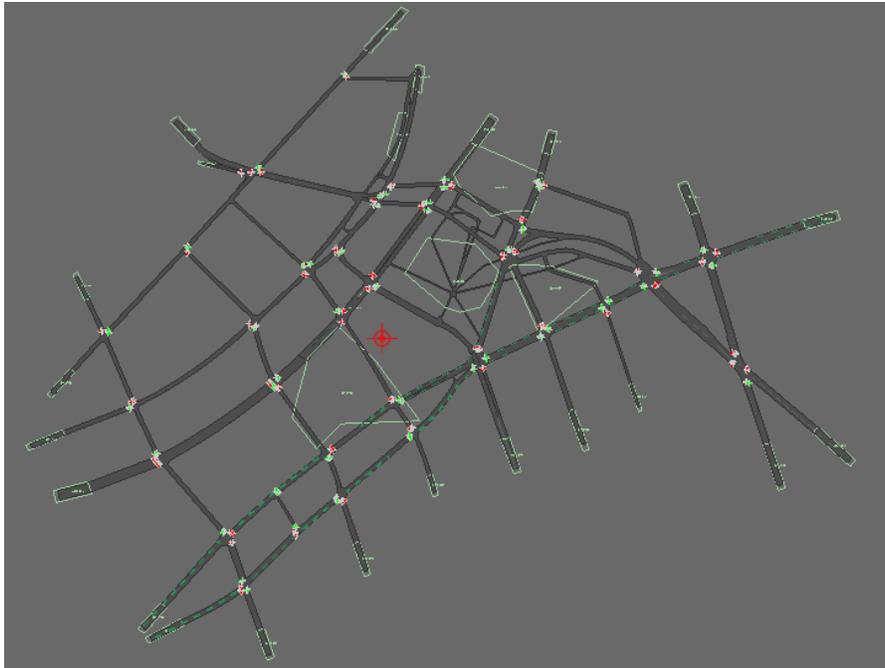


Figura 20. Red de Providencia Projectada para el año 2011

Fuente: Elaboración Propia

5.1.2.- Escenario 2: Modificación Operacional de Cuadrante Las Brujas.

En este escenario se considera la simulación en la operación de un área con gran impacto producto de la instalación de un centro comercial. Se analiza la modificación en la operación de la calle Carlos Silva Vildósola entre Valenzuela Llanos y Nueva Padre Hurtado de bidireccional a una vía unidireccional. Además se considera como medida de mitigación la semaforización de Av. Las Perdices con Valenzuela Llanos, y la prolongación de Av. Las Perdices hasta Carlos Silva Vildósola.

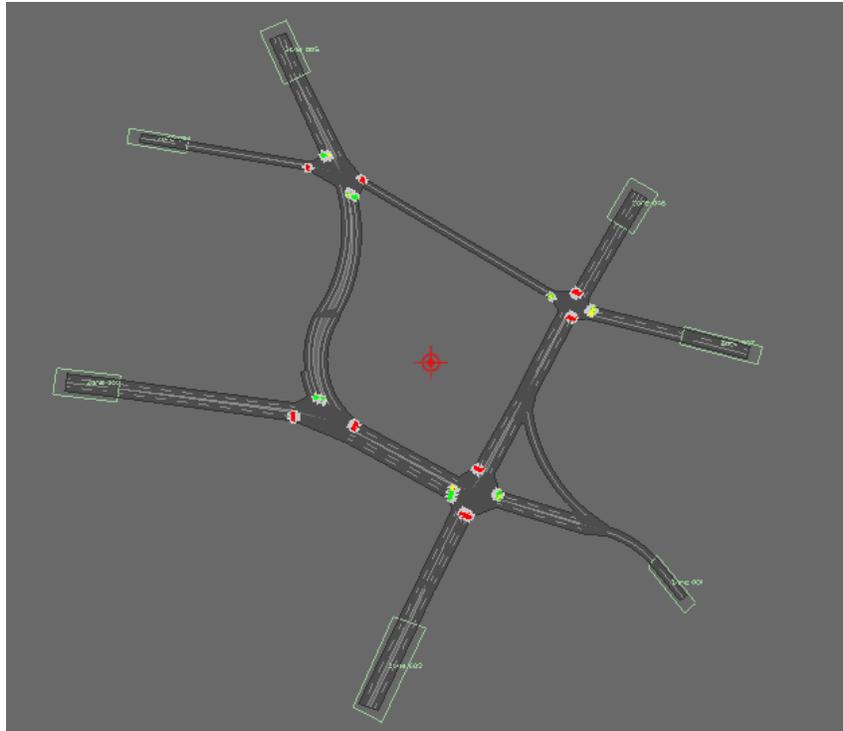


Figura 21. Red de Cuadrante Las Brujas

Fuente: Elaboración Propia

5.1.3.- Escenario 3: Modificación Pista Central Eje San Martín.

En este escenario se analiza la reversibilidad de la pista central del Eje San Martín, entre las calles Francisco Vergara y Américo Vespucio. Actualmente este eje es bidireccional con una calzada de 3 pistas, de las cuales dos se utilizan en dirección norte sur desde Ernesto Riquelme hasta Américo Vespucio y dos se utilizan en la dirección sur norte desde Ernesto Riquelme hasta Francisco Vergara. Se proyecta por tanto utilizar 2 pistas en dirección norte sur desde Francisco Vergara hasta Américo Vespucio en el periodo punta mañana (7:15–8:15) y dos pistas en dirección sur norte en el periodo punta tarde (19:00–20:00).

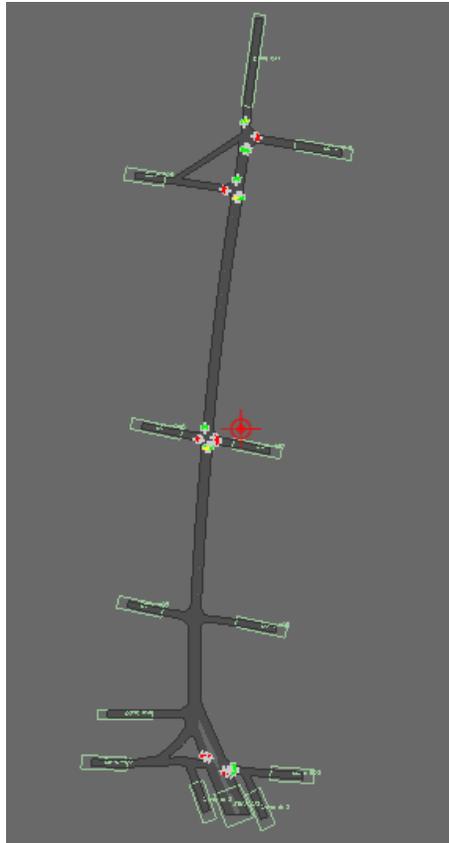


Figura 22. Red de Eje San Martín

Fuente: Elaboración Propia

5.1.4.- Escenario 4: Simulación de un Incidente Temporal.

Este escenario tiene el propósito de simular un evento que impacte la operación de una red vial temporalmente. El objetivo es simular con los dos programas bajo análisis, un incidente en la vía. Se utilizará la red de Cuadrante Las Brujas para este análisis.

5.2.- Simulación de Escenarios de Evaluación.

En este acápite se presentan las simulaciones de los distintos escenarios presentados anteriormente. Los parámetros utilizados de segundo nivel son aquellos

obtenidos del capítulo anterior. Por otra parte el modelo de elección de ruta utilizado es aquél que minimiza el indicador de GEH en cada red.

5.2.1.- Simulación de Escenario 1.

5.2.1.1.- Construcción de la Red.

Para la construcción de este escenario se utiliza una red SATURN del proyecto Costanera Center en la etapa 3 y 4 para el periodo Punta Mañana Laboral. A partir de esta red, previamente validada y calibrada, se construye la red de microsimulación junto con la matriz OD.

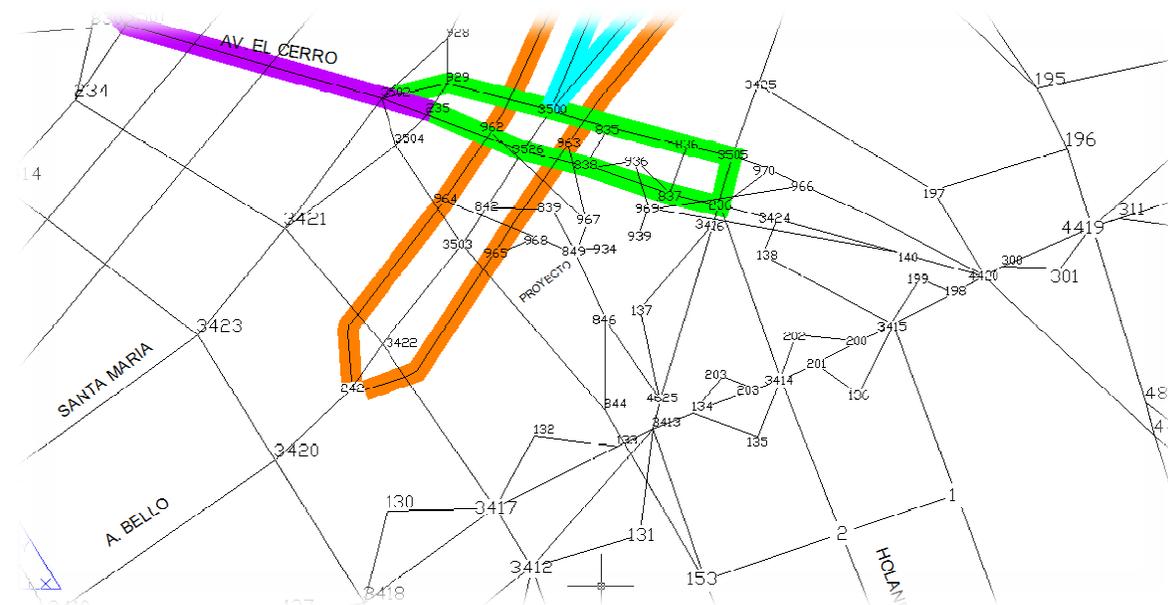


Figura 23. Red Saturn Proyecto Costanera Center (Etapas 3 y 4)

Fuente: UOCT

Se consideran las líneas de Transporte Público que en la actualidad circulan dentro del área de simulación. Se enumera un total de 24 recorridos y 13 líneas de Transporte Público, estas son: 104, 222, 401, 405, 406, 407, 409, 411, 413, 421, 426, 503 y C06. Las frecuencias y paraderos de los recorridos se obtuvieron de la página oficial de

TranSantiago. En la siguiente tabla se presenta el listado de recorridos junto con las calles principales de circulación y la frecuencia de operación.

Tabla 29. Líneas de Transporte Público Red Providencia

Recorrido	Trazado	Intervalo de Frecuencia [min]
104	Los Leones - Providencia - Suecia	2
212	Los Leones - Providencia - Suecia	5
401 ida	11 de Septiembre	4
401 vuelta	11 de Septiembre - Providencia	4
405 ida	11 de Septiembre	3
405 vuelta	Vitacura - Providencia	3
406 ida	11 de Septiembre	3
406 vuelta	11 de Septiembre - Providencia	3
407 ida	11 de Septiembre	4
407 vuelta	11 de Septiembre - Providencia	4
409 ida	Santa María	3
409 vuelta	Los Conquistadores	3
411	11 de Sept. - Lyon - Santa María	7
413 ida	11 de Septiembre	2
413 vuelta	Tobalaba - Vitacura - Providencia	2
421 ida	11 de Septiembre	5
421 vuelta	11 de Septiembre - Providencia	5
426 ida	11 de Septiembre	3
426 vuelta	11 de Septiembre - Providencia	3
503 ida	11 de Septiembre - Tobalaba	3
503 vuelta	Tobalaba - Vitacura - Providencia	3
C06	Tobalaba - Nueva Tajamar - Holanda - 11 de Sept.	7

Fuente: Transantiago

5.2.1.2.- Escenario de Evaluación.

En este escenario se evalúa la puesta en marcha de las medidas de mitigación propuestas para las etapas 3 y 4 del Proyecto Costanera Center. En estas etapas se incluyen la construcción del Puente Tajamar II (nombre no oficial), dando continuidad a Av. El Cerro hacia el Oriente; la modificación de Andrés Bello y la incorporación de la Costanera Sur.

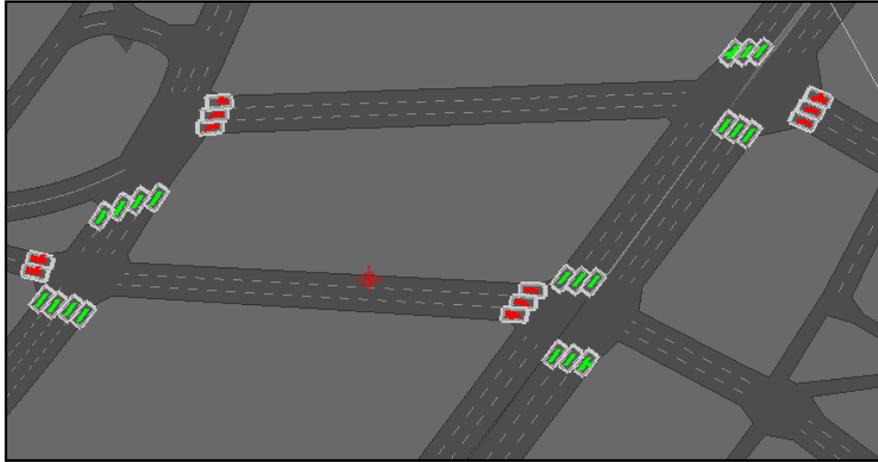


Figura 23. Puente Futuro, al sur de Puente Nueva Tajamar

Fuente: Elaboración Propia

Actualmente la Av. Andrés Bello opera de manera reversible en los períodos de punta mañana y punta tarde. Debido a que en la situación futura se considera la construcción de la Costanera Sur, se modela Andrés Bello sin reversibilidad entre Nueva Tajamar y Nueva Lyon, de acuerdo a la definición del proyecto considerado. El número de pistas entre Tajamar y Los Leones es de 3 pistas por sentido, como lo ilustra la figura siguiente.

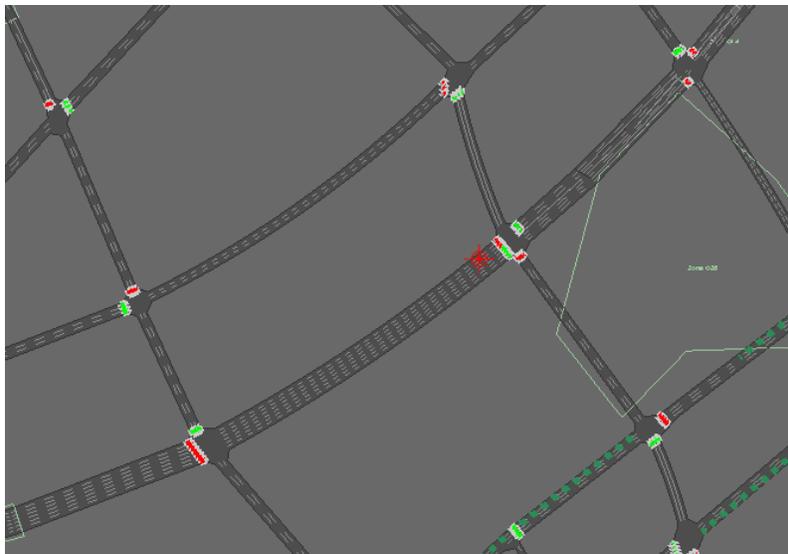


Figura 24. Modificaciones Andrés Bello entre Nueva Tajamar y Los Leones

Fuente: Elaboración Propia

5.2.1.3.- Calibración de Primer Nivel.

Debido a que se realiza una microsimulación de los resultados de una situación futura modelada con Saturn 10, es necesario seleccionar el modelo de elección de ruta y los valores de los parámetros relacionados con el modelo de asignación que replique de cierta manera la distribución de los flujos asignados por Saturn. Para esto se realiza un análisis de calibración similar al efectuado en el capítulo anterior, es decir se selecciona aquél modelo que minimice el valor de GEH global.

Para el caso de Aimsun, los resultados de esta calibración se presentan a continuación.

Tabla 30. Calibración de Primer Nivel Aimsun

	Binomial (defecto)	Proporcional (defecto)	Logit (defecto)	Calibrado
GEH Global Promedio	4.42	5.56	9.45	4.16
5 < GEH	72%	54%	33%	72%
5 < GEH < 10	21%	36%	26%	21%
10 < GEH	8%	10%	41%	8%

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la calibración de primer nivel en Paramics se presentan a continuación.

Tabla 31. Calibración de Primer Nivel Paramics

	Todo o Nada (dinámico)	Percentage (FP=25)	SquareRoot (FP=25)	Calibrado
GEH Global Promedio	9.63	10.58	9.88	9.63
5 < GEH	43%	35%	41%	72%
5 < GEH < 10	19%	27%	22%	21%
10 < GEH	38%	38%	38%	8%

Fuente: Elaboración Propia

Los modelos finalmente considerados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 32. Resultados finales primer nivel de Calibración

Simulador	Aimsun	Paramics
Modelo	Proporcional	Todo o Nada (dinámico)
Tiempo de Cálculo de los Costos	0:01:00	0:01:00
Parámetros	a = 4	a = 1.00 ; b = 0; c = 0
Familiaridad		85%

Fuente: Elaboración Propia

5.2.1.4.- Resultados de Simulación.

Se presentan tramos de velocidad en distintos tramos de la red para analizar los impactos viales que causará el proyecto Costanera Center. Los resultados para ambos simuladores se presentan a continuación.

Tabla 33. Resultados de Velocidad por Tramo

Tramo	Entre	Velocidad [km/h]	
		Aimsun	Paramics
Av. El Cerro Oriente	Conquistadores - Santa María	50.8	45.5
Av. El Cerro Poniente	Santa María - Conquistadores	43.9	48.5
Los Conquistadores	Hidalgos - Av. El Cerro	11.1	22
Los Conquistadores	Nueva Lyon - Pedro de Valdivia	43.4	43
Los Hidalgos	Santa María - Conquistadores	33.5	4
Santa María	Pte. Los Leones - Av. El Cerro	8.43	6.8
Santa María	Padre Letelier - El Gobernador	31.7	4.7
Pte Nueva Tajamar		8.9	8.9
Pte Futuro		20.8	8.3
Pte Los Leones		42.2	40.4
Pte Suecia		26.4	8.8
Pte Padre Letelier		30.4	8.2
Andrés Bello O-P	Nva. Tajamar - Los Leones	34.6	24.2
Andrés Bello O-P	Los Leones - Suecia	25.8	6.9
Andrés Bello O-P	Suecia - Lyon	26.1	10.3
Andrés Bello P-O	Lyon - Suecia	19.3	18
Andrés Bello P-O	Suecia - Los Leones	7.38	4.3
Andrés Bello P-O	Los Leones - Nva. Tajamar	53.5	50.3
	Promedio	28.8	20.2

5.2.1.5.- Análisis de Resultados de Simulación.

Los resultados presentados, tanto en la calibración como en los valores de velocidad por arco, difieren en ambos simuladores. De acuerdo a la simulación visual de este escenario el MMT Paramics presenta un comportamiento más caótico que Aimsun. Este hecho se comienza a generar en determinadas intersecciones en donde se comienzan a generar sobre saturaciones que son transmitidas a intersecciones aguas arriba de la red.

De acuerdo a lo reportado por la simulación en Paramics, se concluye que las medidas de mitigación propuestas para el proyecto Costanera Center son insuficientes, ya que los niveles de velocidad en diversos arcos de la red están por bajo los 20 [km/h], obteniéndose un promedio a nivel de red de 20.2 [km/h]. De manera contraria, de acuerdo a lo reportado por la simulación en Aimsun, las medidas de mitigación propuestas controlan el impacto generado por el aumento en el flujo vehicular.

Si bien el simulador Paramics recoge parte del fenómeno de la congestión, en la simulación animada se observa que esto aún debe mejorar. Así, existen periodos prolongados de tiempo, al menos los últimos 15 minutos de la simulación, en donde algunos vehículos permanecen detenidos, sin variar su posición.

Un problema surgido en ambos simuladores de modelar redes tipo Saturn son aquellos arcos conectados mediante conectores al interior de la red. Esta es una gran diferencia con modelos de tipo estratégico, debido a que no es “real” simular arcos en donde aparecen y desaparecen vehículos, cuestión que genera grandes problemas de congestión. Otro aspecto importante a considerar son aquellas zonas conformadas por varios arcos, ya que los vehículos son ingresados a la red de manera equitativa por cada tramo. Una manera de mejorar el problema de conectores, es especificar de la manera más detallada posible aquellos lugares de estacionamientos de vehículos.

5.2.2.- Simulación de Escenario 2.

5.2.2.1.- Construcción de la Red.

Para la construcción de la red se considera el área de análisis presentada en la figura 21. La construcción virtual se realizó utilizando como referencia el plano de la situación futura del cuadrante, es decir con la habilitación de la calle que da continuidad a Avenida Las Perdices y que empalma con Carlos Silva Vildósola. La codificación de la red, así como la estimación de la Demanda OD, se hizo utilizando Paramics, mientras que en Aimsun, se utilizó la importación de redes Paramics para la construcción.

Se consideran las líneas de Transporte Público que actualmente circulan por el área de simulación, estas son: 412, D08 y D18.

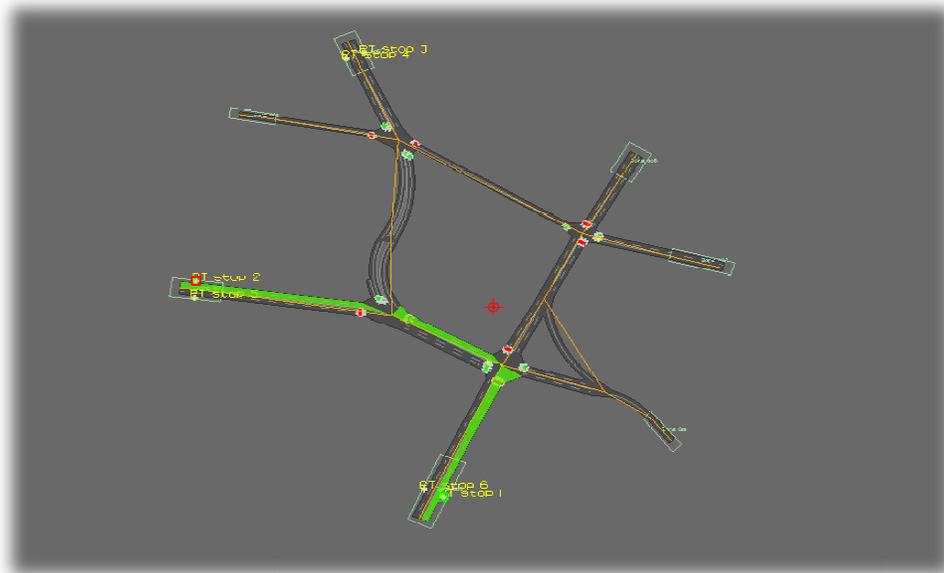


Figura 25. Codificación de Línea de Transporte Público 412

Fuente: Elaboración Propia

La Codificación de las zonas es la siguiente.

Tabla 34. Zonas de Área de Modelación

Zonas	Calle
1	Av. Las Perdices
2	Valenzuela Llanos Acceso Sur
3	Príncipe de Gales
4	Carlos Silva Acceso Poniente
5	Padre Hurtado
6	Valenzuela Llanos Acceso Norte
7	Carlos Silva Acceso Oriente

Fuente: Elaboración Propia

La Matriz OD para vehículos livianos se presenta a continuación.

Tabla 35. Matriz OD, Periodo PM

Zonas	1	2	3	4	5	6	7
1		4	305	7	153	130	54
2	55		218	12	200	270	120
3	101	74		20	30	100	34
4	50	43	17		9	2	19
5	345	360	27	7		5	9
6	55	137	14	10	13		31
7	40	91	100	92	128	64	

Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.2.- Escenarios de Evaluación.

En este escenario se analizan 3 casos: la situación actual, en donde se considera la demanda actual y la programación actual de semáforos; una situación con proyecto, en donde se considera la continuidad de Av. Las Perdices y la unidireccionalidad de Carlos Vildósola en el sentido oriente – poniente; y una situación de proyecto mejorado, en donde se considera la semaforización de Valenzuela Llanos con Av. Las Perdices y se optimiza la programación de semáforos de toda la red. En todos los casos anteriormente enunciados se considera la matriz origen – destino de la situación actual.

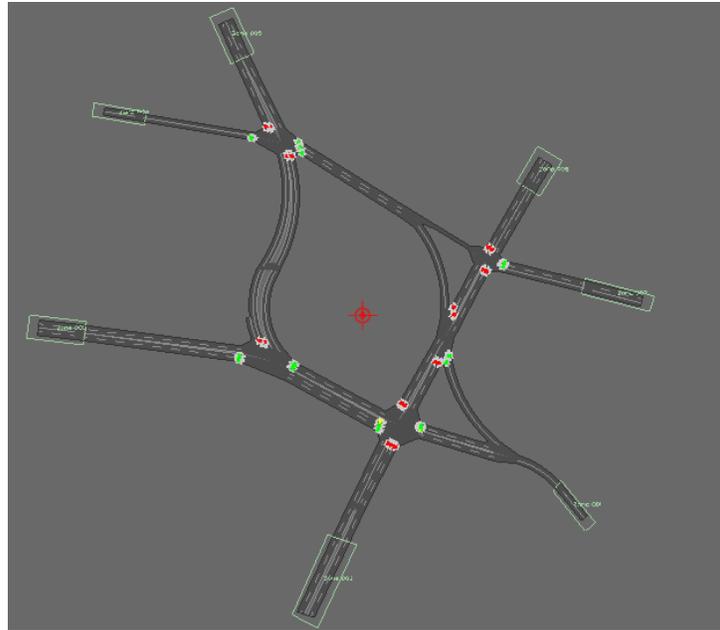


Figura 26. Proyecto Mejorado Escenario 2

Fuente: Elaboración Propia

En las siguientes tablas se presentan las programaciones de la situación actual y de proyecto mejorado. La programación del proyecto mejorado fue optimizada por Transyt 8S.

Tabla 36. Programación Actual Cuadrante Las Brujas, Periodo PM

INTERSECCIÓN	Ciclo	INICIO TRANSYT			ENTREVERDE VEH			INICIO VERDE			TIEMPO VERDE		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
V. Llanos - P. de Gales	90	19	47	62	4	4	4	23	51	66	24	11	43
P. Hurtado - P. de Gales	90	71	23		5	4		76	27		37	44	
Padre Hurtado - C. Vildósola	90	61	33		5	4		66	37		57	24	
V. Llanos - C. Vildósola	90	32	77		4	4		36	81		41	41	

Fuente: UOCT

Tabla 37. Programación Futura Optimizada Cuadrante Las Brujas, Periodo PM

INTERSECCIÓN	Ciclo	INICIO TRANSYT			ENTREVERDE VEH			INICIO VERDE			TIEMPO VERDE		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
V. Llanos - P. de Gales	90	3	30	46	4	4	4	7	34	50	23	12	43
P. Hurtado - P. de Gales	90	42	80		5	4		47	84		33	48	
Padre Hurtado - C. Vildósola	90	21	69		5	4		26	73		43	38	
V. Llanos - C. Vildósola	90	4	69		4	4		8	73		61	21	
V. Llanos - Las Parcelas	90	3	57		4	4		7	61		50	32	

Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.3.- Calibración de Primer Nivel.

Los resultados finales y modelos de elección de ruta seleccionados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 38. Resultados finales primer nivel de Calibración Escenario 2

Simulador	Aimsun	Paramics
Modelo	Proporcional	Todo o Nada (dinámico)
Tiempo de Cálculo de los Costos	0:01:00	0:01:00
Parámetros	a = 10.0	a = 1.00 ; b = 0; c = 0
GEH Global Promedio	2.31	1.65
GEH < 5	94	94

Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.4.- Resultados de Simulación.

Se presentan a continuación los resultados globales de la red.

Tabla 39. Resultados Globales a Nivel de Red MMT Aimsun

Variables	ESCENARIOS		
	Actual	Proyecto	Proyecto Mejorado
Flujo Vehicular [veh/h]	3520	3587	3580
Tiempo de Demora [s/Km]	114.3	108.9	102.9
Tiempo de Viaje [s/Km]	170.7	165.3	159.5
Tiempo Total de Viaje [horas]	78.2	76	73.1

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40. Resultados Globales a Nivel de Red MMT Paramics

Variables	ESCENARIOS		
	Actual	Proyecto	Proyecto Mejorado
Flujo Vehicular [veh/h]	3506	3534	3543
Tiempo de Viaje [s/veh]	93.7	99	99
Tiempo Total de Viaje [horas]	74	74.4	72.7

Fuente: Elaboración Propia

También se presentan los resultados de las distintas asignaciones proyectadas como consecuencia de la puesta en marcha del proyecto. Se analizan aquellas zonas de origen y destino que pueden verse afectadas por el proyecto.

Tabla 41. Asignación de flujo vehicular MMT Aimsun

O - D	Ruta	Flujo (tiempo) [veh/h(s)]		
		Actual	Proyecto	Proyecto Mejorado
Zona 1 - Zona 4	P. de Gales - Padre Hurtado	5 (121)	3 (128)	2 (121)
	V. Llanos - C. S. Vildósola	1 (138)		
	Las Perdices - C. S. Vildósola		6 (69)	5 (64)
Zona 1 - Zona 5	P. de Gales - Padre Hurtado	123 (109)	74 (109)	51 (93)
	V. Llanos - C. S. Vildósola	20 (184)	2 (201)	20 (133)
	Las Perdices - C. S. Vildósola		72 (84)	60 (56)
Zona 2 - Zona 4	P. de Gales - Padre Hurtado	10 (119)	7 (88)	7 (90)
	V. Llanos - C. S. Vildósola	3 (189)	4 (143)	5 (99)
Zona 2 - Zona 5	P. de Gales - Padre Hurtado	162 (97)	156 (76)	121 (74)
	V. Llanos - C. S. Vildósola	41 (202)	48 (133)	72 (96)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 42. Asignación de flujo vehicular MMT Paramics

O - D	Ruta	Flujo (tiempo) [veh/h(s)]		
		Actual	Proyecto	Proyecto Mejorado
Zona 1 - Zona 4	P. de Gales - Padre Hurtado	5 (121)		
	V. Llanos - C. S. Vildósola			
	Las Perdices - C. S. Vildósola		7 (79)	7 (79)
Zona 1 - Zona 5	P. de Gales - Padre Hurtado	144 (112)	74 (95)	
	V. Llanos - C. S. Vildósola			
	Las Perdices - C. S. Vildósola		70 (103)	146 (64)
Zona 2 - Zona 4	P. de Gales - Padre Hurtado	10 (125)	8 (120)	3 (116)
	V. Llanos - C. S. Vildósola			7 (122)
Zona 2 - Zona 5	P. de Gales - Padre Hurtado	186(102)	196 (102)	106 (90)
	V. Llanos - C. S. Vildósola			112 (97)

Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.5.- Análisis de Resultados de Simulación.

En esta ocasión, a diferencia del Escenario 1, ambos simuladores arrojan resultados similares. Esto puede deberse a que la red analizada no presenta mayores problemas de congestión en el período analizado, además el tamaño de la red es bastante más pequeño, por lo cual el comportamiento de los simuladores es bastante más estable.

A modo de análisis de los resultados, en ambos se observa que la situación con proyecto mejorada es el mejor escenario. Esto es esperable ya que en el periodo analizado el flujo vehicular por Carlos Silva Vildósola en dirección poniente – oriente en el tramo en estudio es bastante bajo (46 [veh/h]).

En la reasignación vehicular es donde se ve una mayor diferencia entre ambos simuladores. El simulador Paramics arroja resultados más esperables, en donde las asignaciones se realizan por aquellas rutas de menor costo generalizado, y en aquellos pares origen – destino en donde hay asignaciones por dos rutas, los valores de tiempo de viaje son bastante similares.

5.2.3.- Simulación de Escenario 3.

5.2.3.1.- Construcción de la Red.

El área a considerar para esta modelación es el Eje San Martín entre Francisco Vergara y Américo Vespucio, incluyendo aquellas intersecciones relevantes durante el tramo, tal como se presenta en la figura 22.

Las zonas de atracción y generación de viajes construidas en Aimsun y Paramics se presentan a continuación.

Tabla 43. Zonas de Área de Modelación Escenario 3

Zonas	Tipo	Acceso
1	Atractor / Generador	Eje San Martín Sur
2	Generador	Américo Vespucio Oriente
3	Atractor	Américo Vespucio Poniente
4	Atractor / Generador	Intendente Saavedra
5	Atractor	Blanco Encalada Oriente
6	Atractor / Generador	Blanco Encalada Poniente
7	Generador	Guardiamarina Riquelme Oriente
8	Atractor / Generador	Guardiamarina Riquelme Poniente
9	Atractor / Generador	San Luis Poniente
10	Atractor / Generador	Francisco Vergara Oriente
11	Atractor / Generador	Eje San Martín Norte
12	Atractor	San Martín Viraje Oriente
13	Generador	San Martín Viraje Poniente

Fuente: Elaboración Propia

Para la estimación de las matrices OD se utiliza el programa Estimator. Esta matriz alimentara los modelos de Paramics y Aimsun. Los resultados de las matrices OD, en los períodos Punta Mañana y Punta Tarde se presentan a continuación.

Tabla 44. Matriz OD, período Punta Mañana (07:15 – 08:15)

O / D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	108	57	200	20	0	12	43	87	215	0	0
2	0	0	568	5	77	5	0	6	5	9	4	298	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	216	0	100	0	2	1	0	3	1	1	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	82	0	77	2	19	0	0	0	0	0	1	0	0
7	112	0	107	6	9	3	0	87	9	3	6	0	0
8	77	0	73	5	5	2	0	0	2	1	1	0	0
9	24	0	23	2	2	1	0	3	0	11	170	0	0
10	53	0	51	5	6	2	0	11	200	0	27	0	0
11	300	0	43	4	4	1	0	7	12	19	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45. Matriz OD, período Punta Tarde (19:00 – 20:00)

O / D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	32	64	144	34	0	31	34	42	272	0	0
2	0	0	395	26	56	19	0	20	24	44	33	433	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	41	0	41	0	3	1	0	2	4	4	4	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	33	0	33	1	23	0	0	0	0	2	1	0	0
7	105	0	103	10	9	1	0	84	11	19	24	0	0
8	32	0	31	2	1	1	0	0	1	2	2	0	0
9	28	0	28	4	3	1	0	1	0	30	180	0	0
10	52	0	51	8	7	1	0	2	257	0	88	0	0
11	125	0	123	21	18	2	0	9	21	29	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración Propia

5.2.3.2.- Escenarios de Evaluación.

❖ Período Punta Mañana

En este período se analizará la reversibilidad de la pista central del Eje San Martín en la dirección norte sur. Debido a que la operación de las pistas será modificada, la programación de los semáforos tendrá un proceso de optimización. Los repartos y desfases optimizados por Transyt 8S se presentan a continuación.

Tabla 46. Programación Futura Optimizada Eje San Martín, Periodo PM

INTERSECCIÓN	CICLO	ENTREVERDE VEH			INICIO VERDE			TIEMPO VERDE		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
San Martín - Vergara	120	4	4	4	6	62	102	52	36	20
San Martín - San Luis	120	4	4	4	8	58	99	46	37	25
San Martín - Guardiamarina Riquelme	120	4	4		1	64		59	53	

Fuente: Elaboración Propia

❖ Período Punta Tarde

En este período se analizará la reversibilidad de la pista central del Eje San Martín en la dirección sur norte. Debido a que la operación de las pistas será modificada, la programación de los semáforos tendrá un proceso de optimización. Los repartos y desfases optimizados por Transyt 8S se presentan a continuación.

Tabla 47. Programación Futura Optimizada Eje San Martín, Periodo PT

INTERSECCIÓN	CICLO	ENTREVERDE VEH			INICIO VERDE			TIEMPO VERDE		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
San Martín - Vergara	84	4	4	4	3	38	69	31	27	14
San Martín - San Luis	84	4	4	4	5	34	66	25	28	19
San Martín - Guardiamarina Riquelme	84	4	4		7	63		52	24	

Fuente: Elaboración Propia

5.2.3.3.- Resultados de Simulación.

Se analizan los impactos generales en términos de tiempo de viaje con la finalidad de validar y corregir el diseño operacional propuesto. Para el análisis de tiempos de viajes, por un motivo de sencillez y de claridad en los resultados, se eligen aquellos pares OD que utilicen mayormente el tramo a analizar, es decir, aquellas rutas que utilicen San Martín, entre Francisco Vergara e Intendente Saavedra. Para este caso, existe una única ruta entre cada para origen – destino, por lo cual se selecciono una asignación todo o nada estático.

❖ Período Punta Mañana

Se presentan los resultados de la simulación de tiempos de viajes para ambos simuladores en el período de punta mañana.

Tabla 48. Resultados tiempos de Viajes MMT Aimsun, Período PM

Ruta		Tiempo de Viaje [s]		Flujo Vehicular [veh/h]		Tiempo Total [horas]	
Desde	Hacia	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto
Zona 1	Zona 9	124	168	28	40	0.96	1.87
Zona 1	Zona 10	114	148	79	74	2.5	3.04
Zona 1	Zona 11	105	158	219	208	6.39	9.13
Zona 2	Zona 9	139	139	4	4	0.15	0.15
Zona 2	Zona 10	147	170	7	5	0.29	0.24
Zona 2	Zona 11	129	193	5	3	0.18	0.16
Zona 9	Zona 1	134	128	18	18	0.67	0.64
Zona 9	Zona 3	131	92	19	14	0.69	0.36
Zona 10	Zona 1	139	114	51	53	1.97	1.68
Zona 10	Zona 3	138	116	54	41	2.07	1.32
Zona 11	Zona 1	108	98	270	296	8.1	8.06
Zona 11	Zona 3	95	99	44	37	1.16	1.02
TOTAL						25.13	27.66

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 49. Resultados tiempos de Viajes MMT Paramics, Período PM

Ruta		Tiempo de Viaje [s]		Flujo Vehicular [veh/h]		Tiempo Total [horas]	
Desde	Hacia	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto
Zona 1	Zona 9	127	130	44	44	1.55	1.59
Zona 1	Zona 10	125	131	72	71	2.5	2.58
Zona 1	Zona 11	117	126	209	204	6.79	7.14
Zona 2	Zona 9	148	144	6	5	0.25	0.2
Zona 2	Zona 10	134	143	10	9	0.37	0.36
Zona 2	Zona 11	131	150	3	4	0.11	0.17
Zona 9	Zona 1	123	109	22	22	0.75	0.67
Zona 9	Zona 3	129	115	18	18	0.65	0.58
Zona 10	Zona 1	135	130	50	50	1.88	1.81
Zona 10	Zona 3	137	128	48	48	1.83	1.71
Zona 11	Zona 1	103	98	275	273	7.87	7.43
Zona 11	Zona 3	103	97	42	41	1.2	1.1
TOTAL						25.74	25.33

Fuente: Elaboración Propia

❖ Período Punta Tarde

Se presentan los resultados de la simulación de tiempos de viajes para ambos simuladores en el período de punta tarde.

Tabla 50. Resultados tiempos de Viajes MMT Aimsun, Período PT

Ruta		Tiempo de Viaje [s]		Flujo Vehicular [veh/h]		Tiempo Total [horas]	
Desde	Hacia	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto
Zona 1	Zona 9	137	127	32	40	1.22	1.41
Zona 1	Zona 10	112	105	45	33	1.4	0.96
Zona 1	Zona 11	117	103	288	281	9.36	8.04
Zona 2	Zona 9	138	137	33	25	1.27	0.95
Zona 2	Zona 10	116	106	30	49	0.97	1.44
Zona 2	Zona 11	112	102	42	32	1.31	0.91
Zona 9	Zona 1	106	136	27	24	0.8	0.91
Zona 9	Zona 3	96	121	34	25	0.91	0.84
Zona 10	Zona 1	154	160	44	45	1.88	2
Zona 10	Zona 3	147	150	49	42	2	1.75
Zona 11	Zona 1	109	139	112	111	3.39	4.29
Zona 11	Zona 3	94	127	140	121	3.66	4.27
TOTAL						28.15	27.77

Tabla 51. Resultados tiempos de Viajes MMT Paramics, Período PT

Ruta		Tiempo de Viaje [s]		Flujo Vehicular [veh/h]		Tiempo Total [horas]	
Desde	Hacia	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto	Actual	Proyecto
Zona 1	Zona 9	126	105	28	29	0.98	0.85
Zona 1	Zona 10	150	96	31	33	1.29	0.88
Zona 1	Zona 11	151	100	244	244	10.23	6.78
Zona 2	Zona 9	158	125	25	26	1.1	0.9
Zona 2	Zona 10	182	127	40	42	2.02	1.48
Zona 2	Zona 11	169	127	34	36	1.6	1.27
Zona 9	Zona 1	102	98	24	25	0.68	0.68
Zona 9	Zona 3	86	103	23	22	0.55	0.63
Zona 10	Zona 1	125	114	45	48	1.56	1.52
Zona 10	Zona 3	112	111	52	53	1.62	1.63
Zona 11	Zona 1	89	95	121	122	2.99	3.22
Zona 11	Zona 3	79	94	120	124	2.63	3.24
TOTAL						27.26	23.08

Fuente: Elaboración Propia

5.2.3.4.- Análisis de Resultados de Simulación.

En este caso, donde no existen asignaciones y una zona no congestionada, los resultados a nivel de red y en tiempos de viajes son bastante similares entre ambos modelos microscópicos.

En el periodo punta mañana se observa sin embargo diferencias en el tiempo total de viaje consumido entre ambos simuladores, en donde de acuerdo a este indicador la situación proyectada es la mejor alternativa según Paramics y la situación actual es la mejor alternativa según Aimsun. La aseveración anterior es errada para el caso de la simulación en Paramics, debido a que el flujo vehicular que realizó de manera completa su viaje disminuyó en 10 [veh/h] y por ende resulta un menor valor en el tiempo total de viaje consumido. Por otra parte, para el periodo de punta tarde, en ambos simuladores se obtiene que la situación proyectada es el mejor escenario. Se concluye por lo tanto que la modificación de la pista central es recomendable sólo en el periodo punta tarde.

De igual manera a lo observado en el escenario anterior, los microsimuladores presentan una mayor estabilidad y un mejor ajuste entre los flujos observados y modelados en zonas de menor tamaño y en donde las asignaciones son menores.

5.2.4.- Simulación de Escenario 4.

En este escenario se analiza los impactos causados al tránsito vial por incidentes. Básicamente los incidentes simulados en una red de microsimulación son vehículos (o un espacio ficticio de la vía) detenidos por un tiempo excesivo en un determinado lugar impidiendo, de esta manera, el tránsito normal del flujo vehicular.

En ambos simuladores en estudio se pueden generar incidentes viales, en el caso de AIMSUN se determinan los incidentes en cada sección, en donde se configura el área de impacto (la variación de esta indica la “gravedad” del incidente) y el tiempo de ocurrencia y duración del incidente. Por otra parte, en PARAMICS se pueden generar dentro de una intersección o en un arco, además de indicar el tiempo de inicio y duración del incidente, también se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de algún incidente en una vía.

5.2.4.1.- Escenario de Modelación.

La red a analizar será el Cuadrante Las Brujas (Escenario 3 Proyecto Mejorado) en donde se crea un incidente en Av. Las Perdices tal como se muestra en la siguiente imagen.

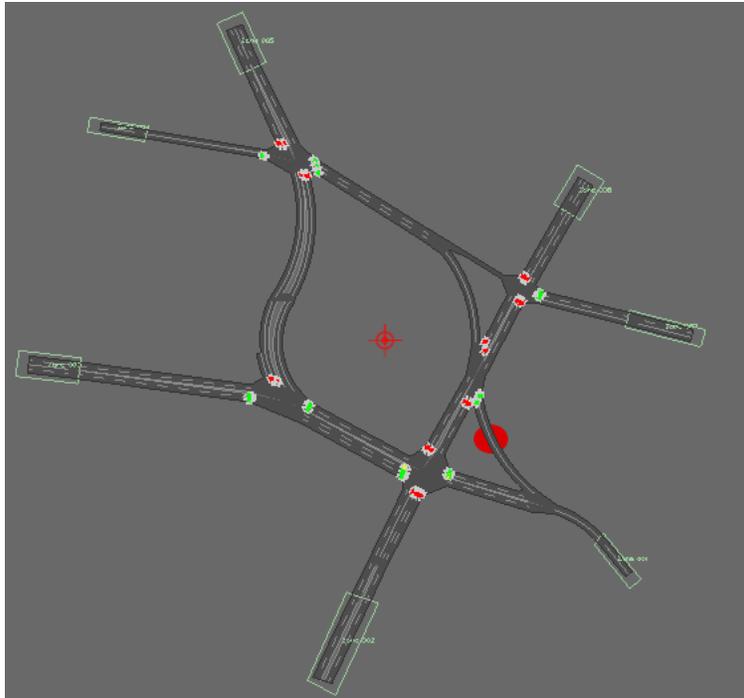


Figura 27. Lugar de Incidente en Cuadrante Las Brujas

Fuente: Elaboración Propia

En ambos simuladores se considera un evento de simulación de incidente en la pista 1 que comienza a las 7:38 am y que transcurre durante 20, 30 y 40 minutos. Se recalculan los costos cada 1 minuto para observar las reasignaciones del modelo y de esta manera ver las diferencias con los resultados de la situación con proyecto semaforizado del escenario 2.

5.2.4.2.- Resultados de Simulación.

Se presenta para ambos simuladores los resultados comparativos entre el escenario 2 con el nodo semaforizado en Av. Las Perdices con Valenzuela Llanos y el escenario con incidente. Se observan los tiempos de viajes y flujo vehicular por ruta, entre el nodo origen 1 y los nodos destinos 4 y 5, esto ya que son las rutas más afectadas por el incidente. En ambos escenarios se consideran un cálculo de los costos cada 1 minuto, para capturar el efecto del incidente en la función de costos de rutas.

Tabla 52. Asignación de flujo vehicular MMT Aimsun

O - D	Ruta	Flujo (tiempo) [veh/h]([s])			
		Escenario 3	Esc 9 (20 min de Incidente)	Esc 9 (30 min de Incidente)	Esc 9 (40 min de Incidente)
Zona 1 - Zona 4	P. de Gales - Padre Hurtado	2 (121)	3 (108)	3 (96)	3 (112)
	V. Llanos - C. Silva Vildósola		1 (155)	1 (156)	1 (127)
	Las Perdices - C. Silva Vildósola	5 (64)	4 (59)	4 (65)	3 (63)
Zona 1 - Zona 5	P. de Gales - Padre Hurtado	51 (93)	57 (88)	57 (88)	57 (89)
	V. Llanos - C. Silva Vildósola	20 (133)	21 (133)	17 (137)	19 (135)
	Las Perdices - C. Silva Vildósola	60 (56)	56 (56)	55 (55)	58 (56)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 53. Asignación de flujo vehicular MMT Paramics

O - D	Ruta	Flujo (tiempo) [veh/h]([s])			
		Escenario 3	Esc 9 (20 min de Incidente)	Esc 9 (30 min de Incidente)	Esc 9 (40 min de Incidente)
Zona 1 - Zona 4	P. de Gales - Padre Hurtado	0 (80)	0 (80)	0 (81)	0 (87)
	V. Llanos - C. Silva Vildósola	0 (77)	0 (80)	0 (83)	0 (101)
	Las Perdices - C. Silva Vildósola	7 (69)	7 (72)	7 (76)	7 (94)
Zona 1 - Zona 5	P. de Gales - Padre Hurtado	31 (78)	32 (79)	49 (79)	41 (86)
	V. Llanos - C. Silva Vildósola	0 (76)	0 (78)	0 (81)	0 (99)
	Las Perdices - C. Silva Vildósola	115 (68)	114 (71)	106 (74)	94 (92)

Fuente: Elaboración Propia

5.2.4.3.- Análisis de Resultados de Simulación.

De los resultados anteriores se desprende del simulador AIMSUN que los incidentes afectan de manera marginal al comportamiento de la red. Las asignaciones mayormente no se ven afectadas al igual que los costos por ruta.

Por otra parte la tabla muestra que en Paramics se cumple una correlación directa entre el tiempo de duración del incidente y el aumento en los costos de la ruta. Esto se ve reflejado en aquellas rutas de flujo nulo (observar rutas entre zona 1 y zona 4) en donde el

tiempo a flujo libre aumenta. También es interesante notar las asignaciones que se van produciendo, por ejemplo el flujo entre la zona 1 y zona 5 por Av. Las Perdices disminuye, así como por otro lado el flujo entre este mismo par O – D por la ruta de Príncipe de Gales aumenta. Por último, nuevamente es importante destacar que los tiempos de viajes entre distintas rutas en un mismo par O – D son bastante parecidas, lo que muestra una convergencia al equilibrio estático de un modelo dinámico de asignación.

Capítulo 6

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MICROSIMULADORES DE TRÁFICO AIMSUN Y PARAMICS

El objetivo de este capítulo es analizar las diferentes características y herramientas de simulación de los modelos Aimsun y Paramics tales como el tratamiento de intersecciones, arcos, transporte público y el tipo de salidas. Además se comparan los modelos básicos de comportamiento vehicular a través de las relaciones macroscópicas flujo – demora y flujo – velocidad. Finalmente es analizado el tiempo consumido durante una simulación en función de la demanda vehicular.

EDICIÓN DE RED

Toda red de microsimulación tiene como punto de partida el importar un apoyo visual de fondo. AIMSUN soporta variados tipos de imágenes: .jpg, .bmp, .tiff, .ecw, etc. además de archivo de dibujos .cad y .dxf. El performance del simulador con las imágenes de fondo es bastante aceptable, sin embargo se comporta de manera muy inestable con los archivos de planos. Por su parte PARAMICS solo soporta imágenes .jpg y .bmp, además de archivos dxf, el problema de no importar archivos .tiff o .ecw, es que las imágenes deben ser escaladas, proceso que se realiza de manera manual, los archivos .dxf también tienen problemas de estabilidad cuando son muy pesados o poseen muchas capas de dibujos, sin embargo esto es solucionable (quitando ciertas capas) y el software trabaja de mejor manera.

En ninguno de los dos microsimuladores de tráfico existe un límite en el tamaño de la red que puede ser modelada. La velocidad de la corrida obviamente disminuirá si el tamaño de la red y el número de vehículos excede la memoria disponible en el computador.

En Aimsun se construyen primero las secciones y luego se crean los cruces en donde se van especificando los movimientos permitidos, el uso de pistas y la prioridad de cada movimiento. En Paramics se crean primero los nodos y luego los arcos. Los nodos en Paramics son intersecciones o puntos que conectan dos o más arcos, estos son utilizados también para indicar modificaciones durante el camino (número de pistas, curvatura, pendiente, etc).

Para generar una pendiente en Aimsun se especifica en una sección su altura inicial y su altura final. En Paramics esto se determina en un nodo, en donde se puede especificar su coordenada de altura (plano Z).

Los arcos curvos en Aimsun son una sucesión de secciones. En Paramics un arco puede ser identificado como curvo, el cual puede ser editado como parte de un círculo y especificar de esta manera el radio de curvatura. En ninguno de los dos simuladores es posible construir diseño de curvas más complejos, como el caso de una clotoide.

La regulación de las intersecciones es bastante similar en ambos modelos. En Aimsun se puede determinar si una vía es de prioridad o secundaria, la cual puede ser regulada mediante un letrero de ceda al paso o disco pare, esta elección influye directamente en el tiempo en que el vehículo determina su tiempo de brecha. En Paramics la vía secundaria se determina indicando si un movimiento o acceso es de prioridad media o menor, aunque en este caso la diferencia en la brecha no es tan notoria como en Aimsun. Otra manera de regular una intersección es mediante un semáforo, en donde se especifica si este control es fijo o actuado. El control actuado se realiza en conjunto con la información obtenida de detectores virtuales en la red. En el control fijo, Aimsun permite crear una periodización en el control semafórico de la red, cuestión que no es posible realizar en Paramics, lo que es una desventaja del modelo debido a que no permite simular distintos periodos de manera continua.

Con el fin de evitar bloqueos en las intersecciones Aimsun tiene la opción "Yellow Box", el cual logra disminuir este problema. Paramics por otra parte trabaja esto de manera aún más detallada, ya que el usuario puede especificar el porcentaje (desde 0 a 100%) de vehículos que intenta no bloquear un determinado cruce. Esto es un aspecto

más a considerar cuando se modelan intersecciones congestionadas que presentan este problema.

Mientras una simulación se está corriendo en Paramics, es posible modificar aspectos operacionales de una red, como por ejemplo: cierre de pistas, programación semafórica, velocidad límite, entre otros. En Aimsun esto no es posible sin detener de manera completa una simulación.

MODELACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR

El tiempo entre dos vehículos sucesivos que ingresan a la red en Paramics es gobernada por una distribución Binomial negativa (Zhi 2003), mientras que en Aimsun esto es determinado por el usuario, el cual puede elegir entre una distribución Uniforme, Exponencial negativa o Normal (Aimsun User Manual 2009).

Los movimientos de los vehículos al interior de la red son gobernados por modelos de seguimiento vehicular y cambio de pista. En Aimsun el modelo de seguimiento vehicular es una variación del modelo de Gipps (Aimsun User Manual 2009), mientras que en Paramics es una variación del modelo de Fritzsche (Quadstone Paramics Manual 2009).

El cambio de pista en Aimsun está determinado por los parámetros “Distancia Zona 1” y “Distancia Zona 2”, el cual divide en 3 zonas el distinto comportamiento del conductor, por otra parte en Paramics el modelo está determinado por el parámetro “Signpost” que divide las zonas de comportamiento en dos.

La demanda en ambos modelos puede ser ingresada mediante matrices OD. Los vehículos se desplazan en la red desde un origen a un destino por una ruta determinada de acuerdo a 3 modelos de asignación: todo o nada, estocástico y dinámico. La opción estocástica en Aimsun es en base a modelos de elección discreta: binomial, proporcional, logit y c-logit. En Paramics la aleatoriedad se realiza mediante una perturbación en los costos generalizados. La ventaja en esto último es que durante la primera iteración los vehículos pueden ser asignados por distintas rutas, además los modelos de elección

discreta asignan por todas las rutas posibles, lo cual en ciertas ocasiones puede generar rutas poco realistas.

MODELACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO

El tratamiento del transporte público en Aimsun es bastante limitado. Por ejemplo, no ha desarrollado modelos de llegada de pasajeros a los paraderos y los vehículos no tienen una capacidad de éstos. La demora media en paraderos es ingresada por el usuario junto con la desviación estándar, la cual se distribuye de acuerdo a una distribución Normal. Una de las cualidades que tiene es que permite ingresar la frecuencia junto a una desviación estándar, lo que permite recoger la variación de la operación de un servicio de transporte público.

En Paramics, aunque con limitaciones, el tratamiento del transporte público es mejor que en Aimsun. Considera un modelo de tasa constante de la llegada de pasajeros a un paradero. El usuario puede indicar el número de puertas de subida y bajada y la capacidad de los buses. Cuando la capacidad es alcanzada, los buses no se detienen en los paraderos. A pesar de no contar con la opción de paraderos tipo bahía, igual pueden ser construidos mediante la creación de una pista extra e indicando que es sólo bus. La demora en paraderos es calculada de dos maneras, la primera es considerando la tasa de subida y bajada de pasajeros y un modelo secuencial de operación, en donde se considera que el tiempo de bajada por persona es la mitad del tiempo consumido en la subida y un tiempo de abertura y cierre de puertas de 5 segundos (Burgos 2004); la segunda manera, al igual que en Aimsun, es indicando la demora media y la desviación estándar que se distribuye de manera Normal.

En ambos modelos existe la opción de prioridad en arcos e intersecciones. En arcos se puede especificar pistas sólo para buses y en intersecciones se pueden programar semáforos de manera actuada, las cuales son los tipos de prioridad que generalmente se utilizan en la realidad. En los paraderos también es posible la detención múltiple de buses, el cual se realiza definiendo una longitud de parada para que esto sea posible.

Las limitaciones de ambos modelos sin embargo se pueden superar con los desarrollos de módulos especiales. En Paramics se ha desarrollado el modulo Mistransit que permite definir un conjunto de líneas comunes o atractivas para los usuarios, un modelo de llegada aleatoria de pasajeros a los paraderos, parámetros de transferencia y transbordos entre líneas, velocidad de caminata y una demora en paraderos que considera la congestión vehicular (Didier 2009).

SALIDAS DEL MODELO

En ambos modelos las salidas pueden ser visualizadas de manera visual y analítica. Estos difieren en la forma de presentar los resultados, ya que las variables son prácticamente las mismas. Los principales indicadores reportados son el tiempo de demora, la velocidad, densidad, longitud de colas máximas y el flujo vehicular. Se puede indicar la periodicidad de las salidas. Además, es posible filtrar por tipo de vehículo y ruta. Los detectores pueden recoger información de flujo, velocidad promedio, intervalo entre vehículos y tiempo de ocupación. Las salidas pueden ser reportadas por cada corrida o el promedio de varias. En Paramics existe la posibilidad también de comparar entre dos salidas con distintos valores de semillas.

En Aimsun los resultados visuales se ejecutan dentro del mismo ambiente integrado y se presentan mediante estilos de vista en la red o en tablas de información. Las salidas analíticas pueden ser grabadas en base de datos, con lo cual resulta más fácil la manipulación de los resultados.

En Paramics las salidas se visualizan mediante el programa Analyser, que permite visualizar la información con estilos de vista a nivel de red y obtener los valores analíticos al pinchar sobre un arco o nodo determinado. También se pueden generar archivos de salida, en formato .csv o .html.

APOYO TÉCNICO

Ambos software cuentan con un servicio vía internet en donde se pueden realizar consultas en el foro del sitio web (previamente inscrito) y una zona de usuario, en donde

se pueden descargar las distintas actualizaciones. Como complemento de esto, el sitio web de Paramics entrega información multimedia para la codificación de redes, guiando mediante videos la construcción de estas.

Ambos programas cuentan además con manuales de ayuda. El manual de AIMSUN es un archivo de lectura en formato .pdf, cuestión que es una dificultad para el usuario a la hora de buscar algo específico. Por otra parte el manual de ayuda de Paramics es un archivo de ayuda tipo Html, que cuenta con paneles de navegación lo que facilita la búsqueda de algún tema en específico, además es muy claro y sencillo.

RELACIÓN FLUJO – DEMORA

El experimento considerado para este análisis es simular una vía lineal de una pista con una velocidad límite de 50 [km/h] (fig. N° 28). Los parámetros físicos y de comportamiento de cada DVU se mantendrán en sus valores por defecto en cada simulador. Los resultados obtenidos para distintas variaciones de flujo vehicular se presentan en la tabla N° 54.

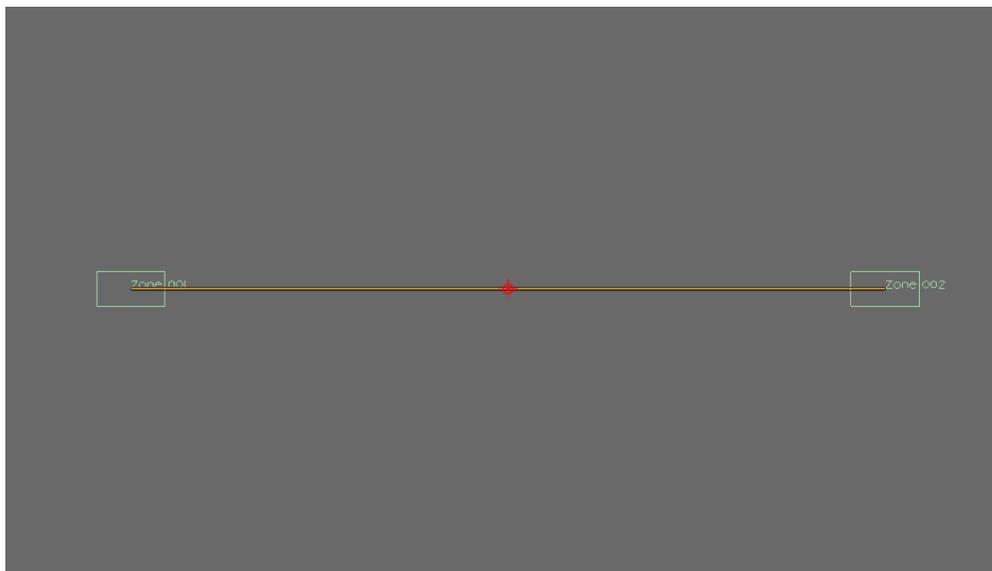


Figura 28. Red lineal de experimento Flujo - Demora

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 54. Resultados de Relación Flujo – Tiempo de Viaje Promedio

Demanda	q [veh/h]		Tiempo de Viaje Promedio	
	Demanda Simulada		[s/veh]	
	Aimsun	Paramics	Aimsun	Paramics
1	1	1	84	70
500	482	497	87	77
1000	987	987	90	78
1500	1446	1456	92	80
2000	1986	1962	96	85
2100	2017	2051	96	86
2200	2155	2155	97	92
2300	2194	2250	98	102
2400	2280	2308	100	127
2500	2298	2313	100	187
3000	2300	2320	101	278

Fuente: Elaboración Propia

Se desprende de la tabla anterior que el máximo flujo simulado son 2300 [veh/h-pista]. Se obtiene, por lo tanto, que la capacidad vial simulada por pista es de 2300 [ade/h-pista].

Considerando lo anterior y teniendo en cuenta que la demora es la diferencia entre el tiempo de viaje actual y el tiempo de viaje a flujo libre, la relación grado de saturación – demora se describe de acuerdo a la siguiente figura.

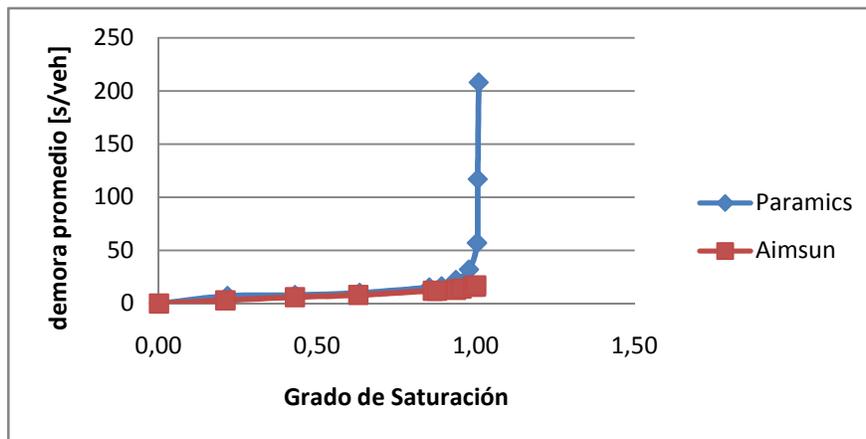


Figura 29. Relación Flujo – Demora en los MMT Aimsun y Paramics

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura anterior los efectos de la congestión solo son capturados por el simulador Paramics, en donde se observa un comportamiento estable hasta el valor 0.9 de grado de saturación, aumentando luego de manera abrupta. El simulador Aimsun por otra parte presenta un aumento lineal en la demora con respecto al grado de saturación, no presentando ninguna variación a medida que la vía se sobresatura.

RELACIÓN FLUJO – VELOCIDAD

De manera complementaria al análisis anterior, se construye una vía expresa ficticia para analizar la relación entre flujo y velocidad. Se colocan detectores a lo largo de la vía expresa de la figura N° 30 con la finalidad de capturar el flujo vehicular y la velocidad por pista. La información de los detectores es recogida cada un minuto. La demanda se va incrementando paulatinamente para tener un mayor rango de flujo vehicular y de esta manera determinar la relación con la velocidad. Se considera como variable operacional de la modelación, una velocidad límite de 100 [km/h] de la vía expresa, con un número de 5 pistas en el comienzo y 3 al final. Se utilizan las variables físicas y de comportamiento de cada DVU en su situación por defecto. Para el caso de Aimsun, la aceptación de la velocidad límite tiene un valor promedio de 1.1.

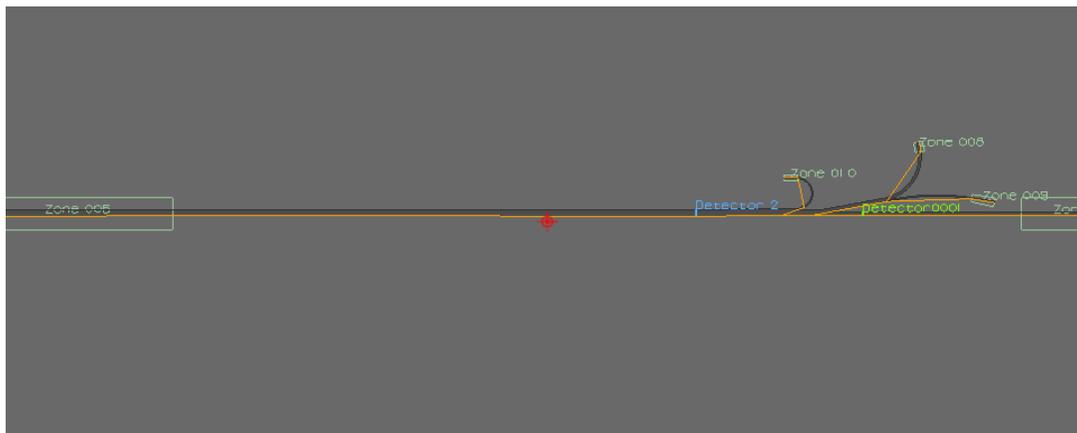


Figura 30. Red de Experimento Flujo – Velocidad

Fuente: Elaboración Propia

Para un flujo vehicular bajo ambos modelos tienen velocidad en torno a la velocidad límite de la vía, lo cual para el caso de Aimsun es del orden de los 110 [km/h]. En ambos modelos el flujo vehicular detectado por pista tiene un límite del orden de los

2600 [veh/h-pista], el cual después de ser sobrepasado el flujo tiende a disminuir junto con la velocidad (efecto sobresaturación). La distribución de la velocidad en Aimsun para niveles de flujo vehicular entre los 1000 y 1500 [veh/h-pista] tiene una dispersión bastante baja, cosa contraria a lo observado en Paramics que la distribución de velocidad es mayor. De manera contraria, para flujos vehiculares entre los 1500 y 2000 [veh/h-pista] la dispersión de la velocidad en Aimsun crece y en Paramics disminuye.

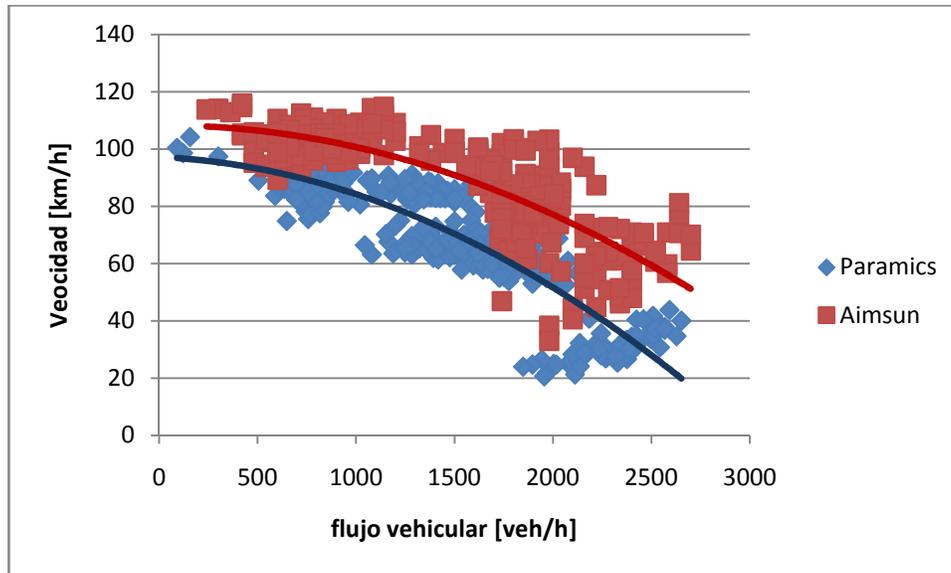


Figura 31. Relación Flujo – Velocidad de MMT Aimsun y Paramics

Fuente: Elaboración Propia

DESEMPEÑO DE TIEMPO DE SIMULACIÓN

Considerando la red de calibración utilizada en el capítulo 4, se analiza la velocidad relativa de las simulaciones entre los simuladores Aimsun y Paramics. El experimento fue realizado en el mismo computador personal con un procesador Intel Core Duo 2 de 2.1 ghz y 4 GB Ram. Las corridas fueron repetidas con un factor de 50%, 100% y 200% de la matriz OD. Se considero un tiempo de simulación de 0.5 segundos. Las corridas fueron realizadas de manera Batch en dónde se guardo la información del tiempo consumido. Los resultados presentados en la figura N° 31 arrojan que para un nivel de demanda del 200% Aimsun es un 30% más rápido que Paramics.

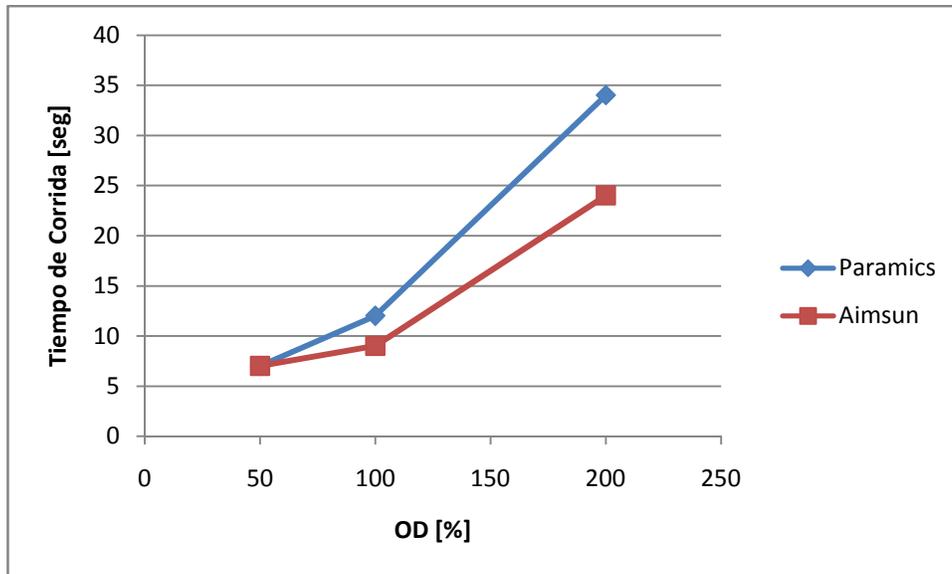


Figura 32. Comparación de tiempo de corrida para diferentes niveles de demanda

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los programas de microsimulación de tráfico en la actualidad ofrecen un complemento interesante en la modelación de redes de transporte y en la evaluación de medidas de gestión de tránsito. A diferencia de modelos de tipo mesoscópicos o macroscópico, aquí se puede evaluar de manera detallada cada elemento de una red vial, analizar situaciones no predictivas (por ejemplo incidentes), analizar la operación del transporte público y evaluar distintos sistemas inteligentes de transporte, como por ejemplo: control actuado, sistemas de mensajes variables de re-ruteo y facilidades al transporte público.

El proceso de calibración de este tipo de simuladores es un proceso que consume una gran cantidad de tiempo debido a la gran cantidad de parámetros existentes. Siguiendo con otro tipo de trabajos similares, el enfoque de calibración ocupado es el propuesto por el Departamento de Transporte de California (2002) quien considera la existencia de parámetros de distintos niveles que pueden ser calibrados de manera consecutiva e independiente. En el primer nivel, se calibran los parámetros asociados a la elección a ruta y al costo generalizado, esto con el fin de que los flujos observados se asimilen a los simulados. En el segundo nivel se calibra los parámetros de comportamiento vehicular utilizando como indicador la longitud de colas en intersecciones. Por último, se validan los dos procesos anteriores con los tiempos de viajes de determinadas rutas.

Los resultados obtenidos en el proceso de calibración difieren de otros estudios similares (Velasco 2004, Pavez 2009, Didier 2009). Así como se menciona en el estudio Smartest (2000), uno de los problemas de los simuladores microscópicos es la baja transferencia de los valores de parámetros calibrados entre una zona y otra. No obstante

lo anterior, existe una similitud entre cuales son los parámetros a calibrar dentro de cada simulador, así para el caso de Paramics estos parámetros son: el Headway, el tiempo de reacción y el Gap Mínimo. En Aimsun los parámetros más relevantes son la velocidad deseada y el tiempo de reacción.

De acuerdo a los distintos escenarios evaluados, los modelos microscópicos deben ser utilizados en redes de tamaño medio y menor, evitando simular redes extensas, debido a los diversos problemas presentados de convergencia en los flujos y de estabilidad computacional.

Del análisis efectuado se concluye que el microsimulador de tráfico Paramics es más sensible a los incrementos de demanda. Se observa un caso extremo de bloqueo en la red en la simulación del Escenario 1. Esto puede deberse, de acuerdo al análisis macroscópico efectuado, al modelo de seguimiento vehicular utilizado en Paramics. Se observa en momentos de sobre saturación que la velocidad no solo disminuye en un 70% sino también que la dispersión es baja, es decir todos los vehículos se comportan de similar manera.

También se destaca que el simulador Paramics asigna de mejor manera para situaciones no predictivas. Esto se deriva de la evaluación del escenario 4 en donde los tiempos de viajes de las distintas rutas convergen a un equilibrio estático, mientras que en Aimsun no se presenta mayores variaciones en la asignación.

En el aspecto de la codificación y salida de la red ambos simuladores presentan similares características. La principal ventaja de Aimsun es la facilidad de codificar una red, proceso que es realizado de una manera bastante intuitiva. Además permite crear un plan de control semafórico, cuestión que no es posible en Paramics. Por otra parte, en Paramics es posible realizar modificaciones a la red mientras se está corriendo una simulación, lo cual no es posible en Aimsun.

La aplicación del módulo MISTRANSIT es un aporte interesante desde el punto de vista de la simulación de medidas de gestión del transporte público. Incorpora por ejemplo la existencia de conjuntos de líneas atractivas para los usuarios, el tratamiento de transbordos y un mejor comportamiento del transporte público en paraderos.

Finalmente, es importante destacar que este estudio fue realizado con licencias de tipo Standard. En Aimsun se utilizó la versión 6.0.6 y en Paramics la versión 6.6.1. Las nuevas actualizaciones durante la realización de este estudio han incorporado por ejemplo, la interacción vehículo – peatón en el simulador Aimsun y la posibilidad de incorporar tranvías en el simulador Paramics.

Las líneas futuras de investigación están en el desarrollo de nuevos módulos especiales, que permitan por ejemplo, considerar nuevas medidas de gestión de transporte público, estimación de contaminantes de fuentes móviles y el control dinámico de una red de semáforos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ADAMS, S. and L. YOU (2000). An Evaluation of Traffic Microsimulation Models for Supporting ITS Models. Texas Southern University (1677602-1)
2. AUSTRROADS RESEARCH REPORT (2006). The Use and Application of Microsimulation Traffic Models.
3. BURGOS, Vanessa (2004). Revisión de la incorporación del transporte público en modelos microscópicos de tráfico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
4. BURGOS, Vanessa (2006). Modelación de Pasajeros, Buses y Paraderos en Microsimuladores de Tráfico, Revisión y Extensiones. Tesis de Grado, Universidad de Chile.
5. DIDIER, Arturo (2009). Calibración y simulación de un corredor de transporte público en microsimulador de tráfico Paramics. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Industrias. Pontificia Universidad Católica de Chile.
6. DOWLING, R., J. HOLLAND and A. HUANG (2002). Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. California Department of Transportation. pp. 35 – 46.
7. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2004), Traffic analysis toolbox volume III: guidelines for applying traffic microsimulation modelling software, FHWA-FRT-04-040, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC
8. FERNÁNDEZ, Rodrigo (2008). Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular. pp. 40 – 48.
9. GIPPS, P. G. (1981). A behavioral Car – following model for computer simulation. Transportation Research Board, 15 – B, pp. 105 - 111
10. GIPPS, P. G. (1986). A model for the structure of lane changing decisions. Transportation Research Board, 20 – B, pp. 403 – 414.

11. HIDAS, P. (2005). Modelling Individual Behavior in Microsimulation Models. University of New South Wales.
12. HOURDAKIS, J., MICHALOPOULOS, P. G., KOTTOMMANIL, J. V. (2003). A Practical Procedure For Calibrating Microscopic Simulation Models. Transportation Research Board 2002 Annual Meeting.
13. LACALLE, Mariano (2003). Calibración del microsimulador Aimsun para flujo ininterrumpido en la ciudad de Santiago. Tesis de Magister. Pontificia Universidad Católica de Chile.
14. Lind, G, Schmidt, K, Andersson, H, Algers, S, Canepari, G, Di Taranto, C, Bernauer, E, Bréheret, L, Gabard, J-F & Fox, K (2000), SMARTTEST: best practice manual, contract report RO-97-SC.1059, University of Leeds.
15. QUADSTONE LIMITED (2004). Quadstone Paramics v5.0 – Technical Notes.
16. QUADSTONE LIMITED (2009). The Paramics Manual v6.6
17. ROADS AND TRAFFIC AUTHORITY (2009). Paramics Microsimulation Modelling. RTA Manual.
18. SBAYTI H. and D. RODEN (2010). Best Practices in the Use of Microsimulation Models. Prepared for: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
19. SHAABAN, K. S., RADWAN, E. (2005). A calibration and validation procedure for microscopic simulation model: a case study of sim traffic arterial streets. In: Proceedings of the 84rd TRB Annual Meeting, Washington, DC.
20. TSS – Transport Simulation Systems (2008). AIMSUN Users Manual v6.
21. VANDERSCHUREN, M. (2007). Calibrating microscopic simulation models. University of Cape Town. pp. 610 – 621.
22. VELASCO, L. M. (2004). Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: Getram en Santiago. Tesis de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile.

ANEXOS

ANEXO A: MODELOS DE SEGUIMIENTO VEHICULAR.

De la familia de modelos de seguimiento vehicular de la forma:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + t_R) = \frac{\alpha_{ml} [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$$

Se presenta en la tabla 1 un resumen de los diferentes valores de m y l según las hipótesis que han diferentes autores sobre la sensibilidad de los conductores.

Tabla 1. Resumen de modelos de Seguimiento Vehicular

Modelo	m	l
Herman	0	0
Greenberg	0	1
Greenshields	0	2
Underwood	1	2
May & Keller (empíricos)	0.6 - 0.8	2.1 - 2.8

Fuente: Fernández, R. Elementos de la Teoría de Flujo Vehicular (2009)

ANEXO B: REVISIÓN DE MICROSIMULADORES AIMSUN Y PARAMICS.

1. Simulador AIMSUN (v 6.0.6 licencia Standard, 2009)

La última versión comercial de AIMSUN NG disponible (versión 6.0.6) continúa la línea de la versión 5.1, integrando en un solo ambiente modelos de simulación como el editor de redes TEDI y el simulador de tráfico AIMSUN. Además, integra modelos de transporte mesoscópicos y macroscópicos, siguiendo la línea de desarrollo de modelos híbridos.

Estructura y Características del Modelo.

En Aimsun el comportamiento de cada vehículo en la red es continuamente modelado a través del período de simulación, utilizando modelos de comportamiento como seguimiento vehicular, cambio de pista y aceptación de brecha. La simulación puede estar basada en flujos de entrada a la red y porcentajes de virajes en intersecciones, como a través de matrices origen – destino y modelos de elección de rutas.

Los modelos de comportamiento son función de diversos parámetros los cuales caracterizan distintos tipos de vehículos (autos, buses, camiones, etc.). Existen parámetros que especifican atributos del conductor, por ejemplo: velocidad máxima deseada, aceptación de velocidad límite, factor de sensibilidad, entre otros; y parámetros que especifican atributos físicos del vehículo como: longitud, consumo de combustible, emisión de contaminantes, entre otros. Los parámetros se distribuyen de manera aleatoria determinado por una función normal truncada, el usuario especifica los valores mínimo, máximo y la media de cada parámetro.

En general se pueden modificar diversos aspectos de la modelación, como por ejemplo, el patrón de generación de flujos de entrada a la red: constante, uniforme, normal, exponencial o alguno definido por el usuario.

En relación a los modelos de asignación, existen varios disponibles: fijo, binomial, proporcional y logit. Estos modelos pueden actuar de manera estática, es decir calculando los costes a flujo libre, o de manera dinámica, en donde se puede especificar cada cuanto tiempo se recalculan los costes de rutas. Para el cálculo de costes existen distintas alternativas provistas en una “librería” de funciones de costes o simplemente ser especificados por el usuario.

En lo que respecta a la modelación del transporte público, los buses son despachados de acuerdo a un itinerario siguiendo una ruta definida y deteniéndose por un lapso definido en los paraderos designados.

Se disponen de distintos tipos de regulación de intersecciones: prioridad, semafórica, acceso a autopistas y rotondas. Dentro de la regulación semafórica, se pueden crear planes de control que operan en determinados periodos del día, permitiendo de esta manera simular entre distintos periodos de demanda vehicular.

Además de estas características, AIMSUN es capaz de importar redes desde otros simuladores como por ejemplo PARAMICS y VISSIM.

Editores y Despliegues.

AIMSUN usa un editor gráfico que simplifica el proceso de entrada de datos de la red a simular. Para la definición geométrica de la red también existen facilidades gráficas como el despliegue de planos AutoCad o fotografías aéreas como fondo referencial.

La simulación puede ser vista directamente en pantalla facilitando el análisis de la operación. A través de la interfaz gráfica se puede acceder a información de resultados de la simulación como velocidades, colas, etc.

AIMSUN también puede visualizar escenarios en 3D, emulando la visualización de una cámara localizada por el usuario. En la Figura N° 1 se ilustra un ejemplo de de la interfase de AIMSUN.

La red puede ser exportada en formato shape para ser visualizada en un SIG. Los resultados de la simulación pueden ser guardados en formato Microsoft Open Database Connectivity (ODBC) o una base de datos tipo Access, para ser utilizados externamente.

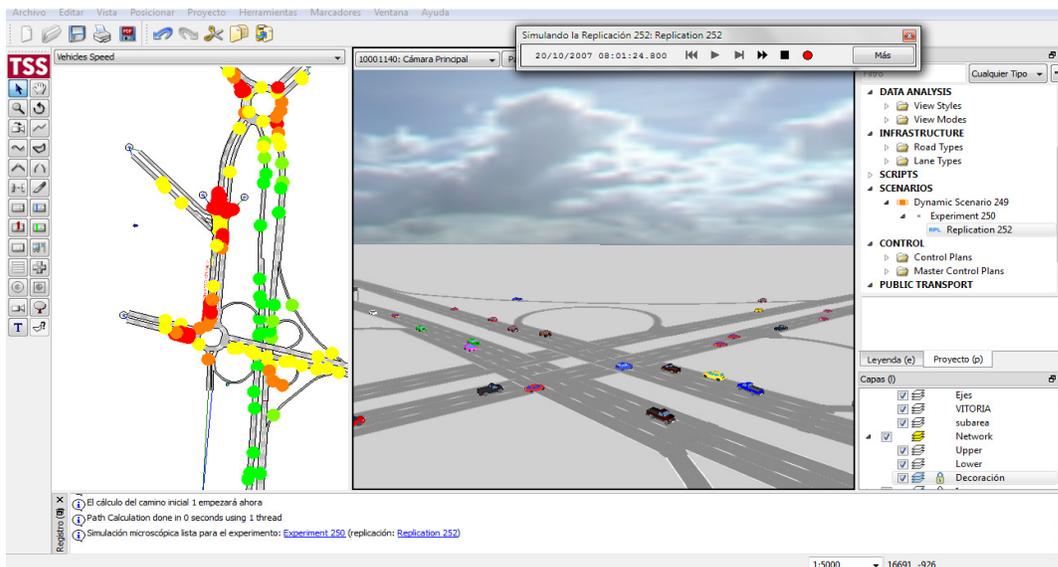


Figura 1. Despliegue gráfico de Aimsun

Fuente: Elaboración Propia

2. Simulador PARAMICS (v 6.6.1 licencia Standard, 2009)

Actualmente se está comercializando la versión 6.6, la cual presenta avances en la simulación de prioridades a transporte público, como posibilidades de definir distintas opciones de tasas de embarque de pasajeros. También reporta avances en la definición de distintas alternativas de itinerarios de rutas.

También se ha incorporado en esta versión la simulación de pistas tarifadas con indicación de señalización variable. En que el usuario de acuerdo a la información desplegada de ahorro de tiempo y tarifa decide si se incorpora o no.

Características del Modelo.

Uno de los principales propósitos de este modelo es modelar redes congestionadas y aplicaciones de infraestructura ITS. Además puede simular el impacto al tráfico de señales variables, detectores de demanda e indicaciones de reruteo.

Bajo condiciones de saturación la modelación efectiva de los distintos tipos de intersección es de vital importancia para la precisión del modelo de simulación, ya que la congestión comienza en una intersección y se traslada a los arcos aguas arriba. PARAMICS define en forma rigurosa la localización de cada elemento de la intersección y la circulación a través de ella.

Con relación a los tipos de vehículos, tiene predefinidos 7 tipos, pudiendo el usuario incorporar más si lo desea. Entre las características de los vehículos se encuentran la velocidad máxima, la aceleración máxima, la desaceleración máxima, la velocidad de arrastre, la longitud, el ancho y el número de años y para el caso de buses de transporte público, la capacidad y el número de puertas de bajada y subida. Estos valores son fijos por tipo de vehículo, y no se distribuyen de acuerdo a una función aleatoria.

La habilidad de los vehículos de redefinir rutas de acuerdo a cambios en los costos es una característica central de PARAMICS. La elección de rutas está basada en tablas de costos de las rutas y los vehículos viajan a sus destinos de acuerdo a esta información y no con rutas fijas predefinidas. Las tablas de costos de rutas permiten variaciones de acuerdo a las características de los usuarios y situaciones de la red.

Características especiales que distinguen a PARAMICS son:

- **Simulación de alta velocidad.** Está programado para simular grandes redes a alta velocidad de procesamiento.

- **Interfase con contadores de flujo.** Esto permite simular directamente con flujos de contadores externos. Esto permite interactuar con sistemas de Control de Tránsito.

Editores y Despliegues.

PARAMICS está compuesto por diversos módulos de trabajo para la construcción y análisis de la simulación de una red. El editor gráfico para la construcción de redes e ingreso de la demanda, y de los distintos componentes: sistema de control, mensajes variables, líneas de transporte público, etc. son realizados en el módulo Modeller (Figura N° 2). En este módulo se puede importar imágenes de tipo mapa de bits o archivos dxf para la construcción de una red. Una característica muy importante de este modelador, es que una red queda guardada en archivos de texto plano (ASCII), lo que hace posible la construcción y modificación de una red sin ejecutar este módulo.

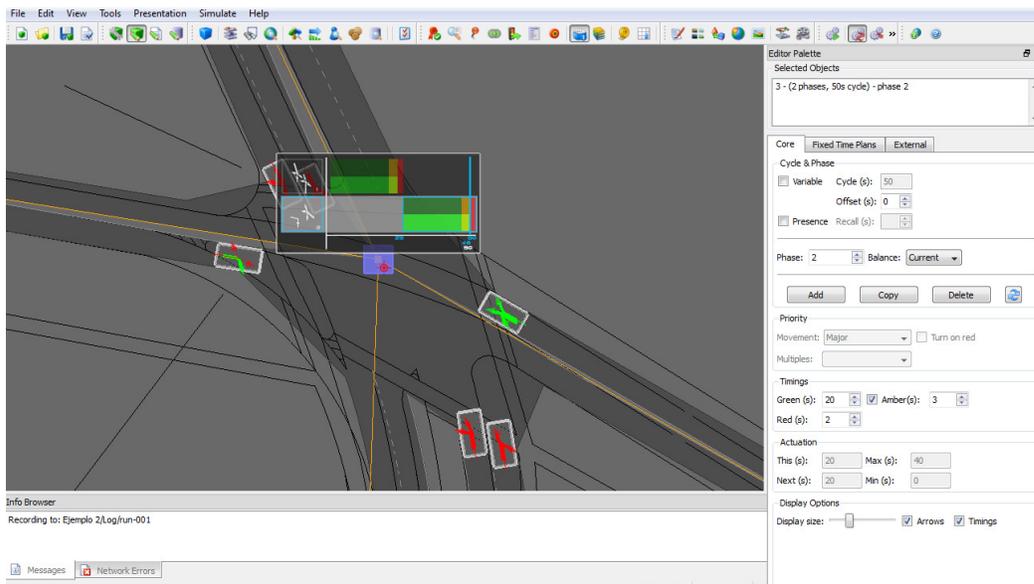


Figura 2. Despliegue gráfico de Modulo Modeller de Paramics

Fuente: Elaboración Propia

Además en Paramics, existen un módulo para generar las corridas Batch, y designar distintas semillas aleatorias en la simulación de una red, llamado Processor.

Otro modulo es el Estimator el cual permite construir las matrices origen – destino a partir de la información de flujos y de alguna matriz a priori en la red.

Un último modulo es el Analyser (Figura N° 3) que es en donde se revisan las salidas y los distintos estadísticos e indicadores de la operación de una red. Se pueden visualizar o exportar a un archivo tipo Excel las salidas de una corrida (o el promedio de varias). Entre los indicadores se encuentran los flujos por arco, la velocidad por arco, las demoras en intersecciones, la longitud de colas, los posibles bloqueos, los tiempos de viajes por ruta, los niveles de servicio de una intersección, etc.

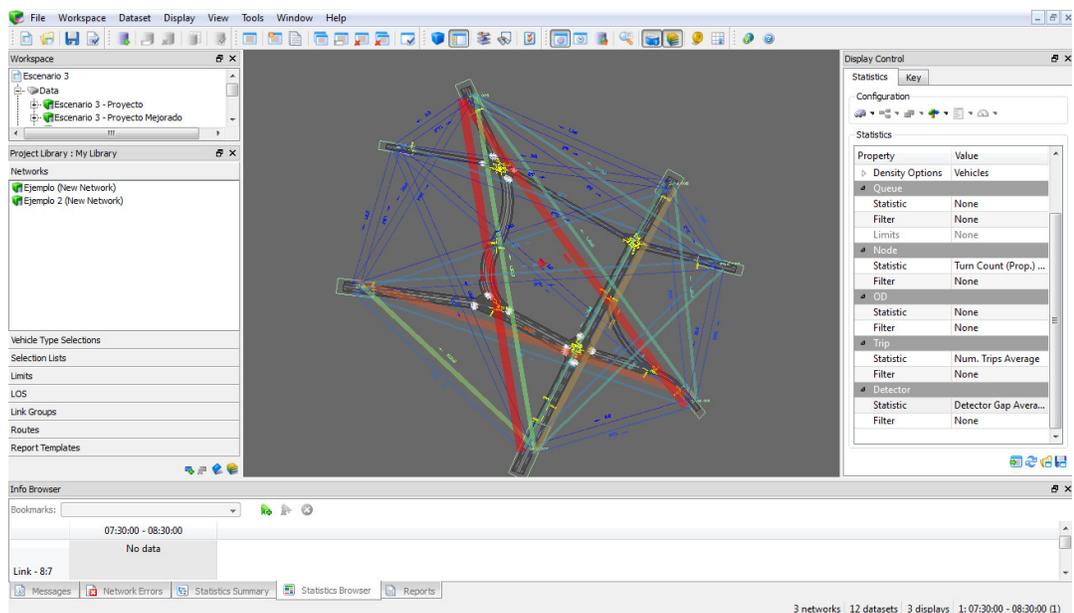


Figura 3. Despliegue gráfico de Modulo Analyser de Paramics

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO C: PARÁMETROS DE COMPORTAMIENTO VEHICULAR DE LOS MODELOS AIMSUN Y PARAMICS

En la tabla 2 se presenta un resumen comparativo de los parámetros de comportamiento utilizado en los modelos Aimsun y Paramics.

Tabla 2. Parámetros de Comportamiento Vehicular

AIMSUN	PARAMICS
Parámetros relacionados a Aceleración	
Max. Aceleración, V, D Max. Desaceleración, V, D Desaceleración Normal, V,D	Max. Aceleración, V, F Max. Desaceleración, V, F
Parámetros relacionados a la Velocidad Deseada	
Velocidad deseada, V, D Velocidad límite, R, F Aceptación de velocidad, V, D	Max. Velocidad, V, F Velocidad límite, R, F Control de Velocidad, R/V, F Agresividad, G, D Sensibilidad, G, D
Parámetros relacionados a Seguimiento Vehicular	
Brecha Mínima, V, D Tiempo de Reacción, G, F	Intervalo Objetivo, G/R, F Tiempo de Reacción, G, F Brecha Mínima, G, F Agresividad, G, D Sensibilidad, G, D
Parámetros relacionados a Aceptación de brecha	
Tiempo de Reacción, G, F Max. Tiempo de espera, V, D	Tiempo de Reacción, G, F Agresividad, G, D Paciencia, G, D
Parámetros relacionados a Cambio de Pista	
Distancia Zona 1, R, F Distancia Zona 2, R, F Max. Tiempo de espera, V, D Porcentaje de Adelantamiento, G, F Porcentaje de Recuperación, G, F	SignPosting, R, F Equivocación de pista, G, F Agresividad, G, D Sensibilidad, G, D
Parámetros relacionados a Elección de ruta	
Aceptación de guía, V, D Función de costo generalizado, R/V, F	Familiaridad, V, F Función de costo generalizado, R/V, F Factor de Costo, R, F Factor de Perturbación de Costo, V, F
Notación <Nombre de parámetro>, <alcance>, <valor>	
Alcance	Valor
G - Global V - Por tipo de Vehículo R - Por arco	D - Distribución F - Fijo (constante)

Fuente: Hidas, Peter (2005)

ANEXO D: MODELOS DE COMPORTAMIENTO VEHICULAR DE MICROSIMULADOR AIMSUN

A continuación se presentan los modelos básicos que sustentan el comportamiento de los vehículos en Aimsun (Aimsun User Manual v6 2009).

Modelo de Seguimiento Vehicular.

En este modelo los vehículos son considerados libres o restringidos. Cuando un vehículo es libre su intención es alcanzar una cierta velocidad deseada acelerando lo más rápido posible. Por otra parte, un vehículo restringido intenta ajustar su velocidad a las limitaciones impuestas por el vehículo precedente.

La máxima velocidad que un vehículo n puede acelerar durante un intervalo de tiempo $[t, t + T]$ es:

$$v_n^a(t + T) = v_n(t) + 2,5a_n^{max}T\left(1 - \frac{v_n(t)}{v_n^{des}}\right)\sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{v_n^{des}}} \quad (1)$$

Donde,

$v_n^a(t)$: velocidad de vehículo n en el tiempo t ;

v_n^{des} : velocidad deseada del vehículo n ;

a_n^{max} : máxima aceleración del vehículo n ;

T : tiempo de reacción o paso de simulación.

La máxima velocidad que un vehículo n puede alcanzar cuando está limitado por la presencia de un vehículo $n - 1$ (vehículo antecesor) es:

$$v_n^b(t + T) = d_n^{max}T + \sqrt{(d_n^{max}T)^2 - d_n^{max}\left[2\{x_{n-1}(t) - s_{n-1}(t) - x_n(t)\} - v_n(t)T - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{d}_{n-1}}\right]} \quad (2)$$

Donde,

d_n^{max} : máxima desaceleración del vehículo n ;

$x_n(t)$: posición del vehículo n en el tiempo t ;

s_{n-1} : longitud efectiva del vehículo $n - 1$;

\hat{d}_{n-1} : estimación de vehículo n de máxima desaceleración de vehículo $n - 1$.

Para la estimación de la desaceleración del vehículo delantero Aimsun ofrece tres alternativas. La primera de esta es considerar que la desaceleración estimada es exactamente la misma que la desaceleración del vehículo líder.

$$\hat{d}_{n-1} = d_{n-1} \quad (3)$$

Una segunda alternativa es considerar que la desaceleración estimada es el promedio entre la desaceleración del vehículo seguidor y el vehículo líder.

$$\hat{d}_{n-1} = \frac{(d_{n-1} + d_n)}{2} \quad (4)$$

La última alternativa es considerar un factor de sensibilidad α en la estimación de la desaceleración del vehículo líder.

$$\hat{d}_{n-1} = \alpha \cdot d_{n-1} \quad (5)$$

La velocidad definitiva del vehículo n en el tiempo de simulación $t + T$ es la mínima entre las dos definidas anteriormente (ecuaciones (1) y (2)). Considerando además los límites de velocidad entre las distintas secciones de caminos, la velocidad del vehículo n se calcula como:

$$V_n(t + T) = \min \{v_n(t + T), \theta_n V_{lim}\} \quad (6)$$

Donde,

θ_n : aceptación de límite de velocidad de vehículo n ;

V_{lim} : velocidad límite de sección S.

Por lo tanto, la posición del vehículo n es actualizada considerando la siguiente ecuación:

$$x_n(t + T) = x_n(t) + V_n(t + T)T \quad (7)$$

Modelo de Cambio de Pista.

Este modelo puede ser considerado como un desarrollo del modelo de cambio de pista de Gipps. Se modela el comportamiento como un proceso de decisión, donde se analizan las siguientes preguntas:

- iv. **¿Es necesario el cambio de pista?** Depende de varios factores, como lo son la necesidad de los virajes, la distancia al siguiente viraje, y las condiciones de tráfico de la pista actual.
- v. **¿Es deseable cambiar de pista?** Se requiere verificar si habrá una mejora en las condiciones de tráfico al cambiar de pista (medida en términos de velocidad y distancia).
- vi. **¿Es posible cambiar de pista?** Se verifica que haya una suficiente brecha para realizar el cambio. Para esto se calculan las condiciones de frenado del vehículo precedente de la nueva pista y las condiciones de frenado impuestas a los vehículos aguas arriba de la nueva pista.

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:

- iv. **Zona 1:** la decisión de cambio de pista se rige por las condiciones de tráfico presente.
- v. **Zona 2:** esta es la zona donde se realizan la mayor cantidad de cambios de pistas. La decisión se rige por el próximo viraje en una intersección o la

salida de una autopista. Se busca la brecha necesaria y se realiza el cambio, sin afectar el comportamiento de las pistas adyacentes.

- vi. **Zona 3:** los vehículos están obligados a ingresar a la pista de viraje deseada, reduciendo la velocidad e incluso deteniéndose de manera completa. Asimismo los vehículos de la pista adyacente, alteran su comportamiento, permitiendo que los vehículos que desean realizar el cambio de pista encuentren la brecha necesaria.

Modelo de Aceptación de Brecha.

Este modelo es utilizado para reflejar el comportamiento de cesión de paso. Determina si un vehículo que cede prioridad puede o no cruzar una intersección dependiendo de las circunstancias de vehículo con mayor prioridad (posición y velocidad). El modelo considera la distancia de los vehículos desde el punto de impacto hipotético, sus velocidades y sus tasas de aceleración. Luego determina el tiempo necesario para los vehículos para despejar la intersección y produce la decisión para cruzar o no, que también es función del nivel de cada conductor.

Varios parámetros influyen en el comportamiento del modelo aceptación de brecha, como son la tasa de aceleración, velocidad deseada, aceptación de velocidad, máximo tiempo de cesión de paso, distancia de visibilidad en intersecciones y velocidad de viraje.

Respecto a los dos modelos de prioridad, pare y ceda el paso, ambos funcionan de la misma manera respecto a la aceptación de la brecha, pero el primero implica que el vehículo se detiene completamente en la intersección, mientras que en el segundo intervienen otras variables entre las que está la visibilidad, aceleración (máxima y normal) y desaceleración normal como las más importantes y el vehículo toma la decisión de detenerse o cruzar la intersección.

3.1.1.4.- Modelo de Elección de Ruta.

Dos tipos de costos generalizados son provistos por defecto para el cálculo de las rutas más cortas: los costos iniciales y los costos actuales. En ambos casos, la función de costos representa el viaje por una sección en segundos, incluyendo la penalidad por virajes, si es que existen.

El costo inicial de una sección S, $CostIni_s$, considera la penalidad para el giro i-ésimo al final de cada sección y la capacidad CT_{si} del i-ésimo viraje en sección s, y se calcula como:

$$CostIni_s = TTF_s + TTF_s \phi \left(1 - \frac{CT_{si}}{MaxCapacidad}\right) \quad (8)$$

Donde TTF_s es el tiempo estimado de viaje a flujo libre de la sección S, ϕ es un parámetro de peso (que varía entre 0 y 1) definido por el usuario para controlar la influencia de la capacidad de una sección en el costo en relación al tiempo de viaje, y $MaxCapacidad$, es teóricamente la máxima capacidad estimada en la sección.

La función de costo actual se calcula cuando hay información de tiempos de viaje simulado. El costo actual para cada sección es el promedio de tiempo de viaje de los vehículos simulados.

AIMSUN ofrece tres métodos de asignación: todo o nada, estocástico y dinámico. La ruta más corta puede ser recalculada en intervalos definido por el usuario, en donde se utiliza los tiempos de viajes actualizados de los arcos. Los modelos de elección discreta implementados en AIMSUN se presentan a continuación:

- i. **Tiempos de viajes fijos calculados en condiciones de flujo libre.** Se calculan los tiempos de viajes al inicio y se asigna todo o nada por rutas de menor costo generalizado.
- ii. **Tiempos de viajes fijos calculados al final del periodo de calentamiento de la red.** Se calculan los tiempos de viajes considerando

una alimentación previa de la red (2 minutos por defecto) y se asigna todo o nada por las rutas de menor costo generalizado.

- iii. **Binomial.** Este modelo sigue una distribución $Binomial(k - 1, p)$ para determinar la probabilidad de elegir cierto camino. El parámetro k es el número de caminos disponibles y p es la probabilidad de ocurrencia del suceso. Valores de p pequeño harán que los caminos de mayor costo generalizado tengan mayor probabilidad de ser elegidos, y de manera contraria, valores de p cercanos a 1, harán que los caminos de menor costo generalizado tengan una mayor probabilidad de ser escogidos.
- iv. **Proporcional.** La probabilidad de elegir la ruta k de un conjunto K de rutas disponibles para un determinado par O-D es:

$$P_k = \frac{CP_k^{-\alpha}}{\sum_{l \in K} CP_l^{-\alpha}} \quad (9)$$

Donde CP_k es el costo de la ruta k , y α es un parámetro del modelo cuyo valor debe ser calibrado.

- v. **Logit.** La probabilidad de elegir la ruta k de un conjunto K de rutas disponibles para un determinado par O-D es:

$$P_k = \frac{e^{\theta V_k}}{\sum_{l \in I_{rs}} e^{\theta V_l}} \quad (10)$$

Donde V_k es la utilidad percibida por la alternativa k (es decir, el opuesto al costo generalizado de la ruta) y θ es un factor de escala que juega dos roles, determinar la decisión de acuerdo a las diferencias de utilidades e influyendo en la desviación estándar de la distribución de utilidad, determinando de esta manera si se consideran pocas o muchas alternativas de caminos.

- vi. **C – Logit.** La probabilidad de elegir la ruta k de un conjunto K de rutas disponibles para un determinado par O-D es:

$$P_k = \frac{e^{\theta(V_k - CF_k)}}{\sum_{l \in I_{rs}} e^{\theta(V_l - CF_l)}} \quad (11)$$

Donde V_k es la utilidad percibida para la alternativa k , y θ es un factor de escala, como en el caso del modelo Logit tradicional. El término CF_k denotado como “factor común” del camino k , es directamente proporcional al grado de superposición del camino k con las rutas alternativas. CF_k se calcula como:

$$CF_k = \beta \ln \left(\sum_{l \in I_{rs}} \left(\frac{L_{lk}}{L_l^{1/2} L_k^{1/2}} \right)^\gamma \right) \quad (12)$$

Donde L_{lk} es el largo de los arcos comunes a las rutas L y K , mientras L_l y L_k son el largo de las rutas l y k respectivamente. Los parámetros β y γ determinan la importancia del factor común.

ANEXO E: MODELOS DE COMPORTAMIENTO VEHICULAR DE MICROSIMULADOR PARAMICS

A continuación se presentan los modelos básicos que sustentan el comportamiento de los vehículos en Paramics (Quadstone Paramics Manual v6.6 2009).

Modelo de Seguimiento Vehicular.

Se basa en el modelo de Fritzche, en donde el vehículo modifica su velocidad de acuerdo a la percepción de la velocidad del vehículo precedente. Este comportamiento varía de acuerdo a las diferencias de velocidades y distancia entre los vehículos, generando de esta manera 3 modos de seguimiento llamados *frenado*, *crucero* y *aceleración*.

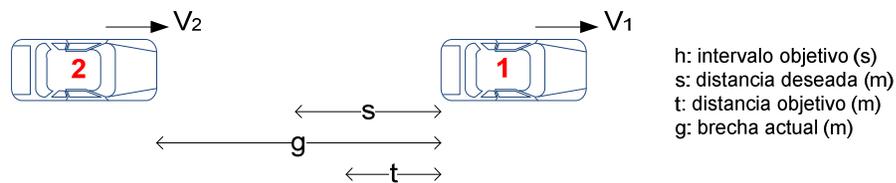


Figura 4. Variables de Modelo de Seguimiento Vehicular

Fuente: Quadstone Paramics Manual

Para cada modo de seguimiento se utiliza el *punto objetivo t*. Este punto depende de la distancia de separación *s* entre el vehículo delantero y seguidor, el cual se calcula con la velocidad percibida del vehículo delantero y el *intervalo objetivo h* que tiene el vehículo seguidor. Debemos notar que la velocidad percibida del vehículo delantero es la velocidad de algún tiempo anterior, debido a la influencia del tiempo de reacción en la modelación.

La distancia *s* es calculada como:

$$s = h\Delta V \quad (13)$$

Donde

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (14)$$

La posición del punto objetivo es:

$$t = \frac{s^2}{g} \quad (15)$$

Donde g es la distancia entre los vehículos.

Además del uso del punto objetivo, es usada una *aceleración de agrupación*, c , para agrupar a los vehículos lo más rápido posible.

$$c = k_1 \frac{g-2,0}{g} \quad (16)$$

Donde $k_1 = 1,0$ [ms^{-2}].

Existen cinco áreas discretas denominadas con las letras A, B, C, D y E en el espacio de fases de diferencias de intervalo y velocidades, tal como se presenta en la figura N° 5. Cada una de estas regiones tiene expresiones propias para la aceleración del seguidor, denotadas como a_A hasta a_E , y que se derivan más abajo.

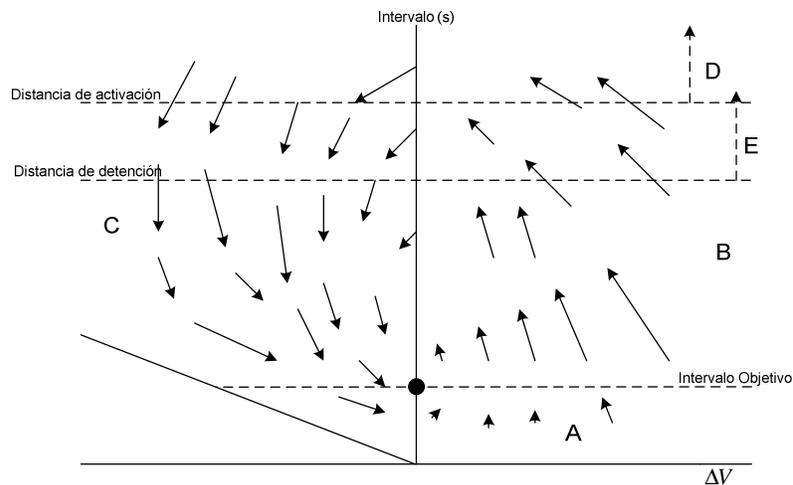


Figura 5. Modos de Aceleración del Modelo de Fritzsche

Fuente: Quadstone Paramics Manual

- i. **Modo Crucero.** De los cinco regímenes de la figura anterior, 3 corresponden a condiciones donde el vehículo delantero va con velocidad crucero.
- En Región A, el vehículo seguidor ha sobrepasado el punto objetivo e intenta llegar a la velocidad deseada tan rápido sea posible, es decir, tan rápido como las restricciones físicas del vehículo lo permitan.
 - En Región B, el vehículo líder se aleja del vehículo seguidor.
 - En Región C, los vehículos mantienen una separación constante ó van acercándose.

Los valores de aceleración (con dimensiones de $[\text{ms}^{-2}]$) para cada una de estas regiones son:

$$a_A = k_2 \Delta V + k_3 \frac{g-t}{g} \quad (17)$$

$$a_B = k_2 \Delta V + k_1 \frac{g-t}{g} \quad (18)$$

$$a_C = c - \frac{(\Delta V)^2}{g-t} \quad (19)$$

Donde $k_1 = 1,0 [\text{ms}^{-2}]$, $k_2 = 1,0 [\text{s}^{-1}]$, y $k_3 = 0,005 [\text{ms}^{-2}]$.

- ii. **Modo de Frenado.** Corresponde a la condición en donde se percibe que el vehículo delantero está frenando (su velocidad percibida decrece dependiente de la máxima tasa de desaceleración). Este modelo crea una expectativa del conductor seguidor tal que si el vehículo delantero está frenando, su velocidad en el siguiente paso de tiempo disminuirá considerablemente. Debido a que la velocidad del vehículo delantero es predicha por el seguidor, y probablemente disminuya a un valor nulo, un umbral es utilizado para probar si el vehículo seguidor está lo suficientemente cerca de estar en peligro de colisión. De no ser así, la

aceleración toma un valor positivo. Esto corresponde a la Región D de la figura. Así,

$$a_D = k_3 \quad (20)$$

Donde $k_3 = 1,0 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$.

- iii. **Modo de Aceleración.** Corresponde a la condición donde el vehículo delantero acelera fuertemente, ubicándose mas allá de la distancia segura del vehículo seguidor, por lo cual éste ultimo acelerará a su máximo valor de aceleración. Esto corresponde a la Región E. Así,

$$a_D = a_{max} \quad (21)$$

Donde a_{max} corresponde a la máxima aceleración.

Modelo de Cambio de Pista.

Para representar el comportamiento del conductor al momento de cambiarse de pista se definen dos zonas por arco, las cuales están determinadas, en el límite entre ambas, por el parámetro *Signposting*. Este parámetro tiene un valor de 250 metros por defecto para arterias y de 750 metros para vías expresas. En la zona 1, los vehículos no tienen presión de realizar el cambio de pista, y el único objetivo es adelantar al vehículo en frente. En la zona 2, en cambio, se urge la necesidad de cambiar de pista debido a que se debe realizar algún viraje.

Si tanto en la pista actual como la pista objetivo los vehículos se mueven a una velocidad constante, entonces para que se realice el cambio de pista para un vehículo debe existir una brecha suficiente entre los vehículos aguas abajo y arriba de la posición que ocupará, la cual debiera ser mayor o igual que el intervalo objetivo de este vehículo. Si hay una diferencia de velocidad entre ambas pistas, esta expresión es extendida para tomar en cuenta el tiempo que le tomara al vehículo alcanzar la velocidad del vehículo aguas arriba de la pista objetivo.

Así, si DVU_0 es el vehículo a considerar en el cambio de pista, y DVU_1 y DVU_2 son los vehículos que estarán por delante y por detrás respectivamente en la pista objetivo, luego para que el cambio de pista se realice se deben cumplir las siguientes relaciones:

$$g_1 > d_{\Delta V_1} + hv_1 \quad \text{y} \quad g_2 > d_{\Delta V_2} + hv_2 \quad (22)$$

Donde,

$$d_{\Delta V_1} = t_0 + \frac{(\Delta V_1)^2}{D_1} \quad (23)$$

$$d_{\Delta V_2} = t_0 + \frac{(\Delta V_2)^2}{D_2} \quad (24)$$

$$\Delta V_1 = v_1 - v_0 \quad (25)$$

$$\Delta V_2 = v_0 - v_2 \quad (26)$$

Donde D_n es la máxima desaceleración del vehículo n , g_n es la distancia entre el DVU_n y el DVU_0 y t_0 es el punto objetivo del DVU_0 .

Modelo de Aceptación de Brecha.

En PARAMICS el comportamiento de aceptación de brechas está modelado por la *Agresividad* que cada vehículo posee. Así aquellos conductores con alta agresividad aceptaran brechas más cortas. PARAMICS utiliza también otro parámetro de comportamiento, *Paciencia*, como un parámetro global, para estimular el crecimiento de la impaciencia en los conductores en una vía secundaria, así cuando un vehículo excede su nivel de paciencia, el conductor simplemente tratará de cruzar la vía. El uso de este parámetro de comportamiento puede ser encendido o apagado por el usuario, pero los valores de *Paciencia* son auto-asignados por el modelo, basados en otros modelos de comportamiento como la agresividad.

Modelo de Elección de Ruta.

El costo generalizado por arco está representado por una combinación de tres variables: tiempo, distancia y tarifas. El costo, medido en minutos, esta descrito por la siguiente ecuación:

$$C = aT + bD + cP \quad (27)$$

Donde,

T : tiempo de viaje [minutos]

D : longitud del arco [km]

P : tarifa del camino [\\$]

Para la generación de distintas rutas, se le asigna a cada vehículo un valor de *Familiaridad*. Además de esto, es posible asignar penalidades en cada arco para los conductores familiares y no familiares. Esto intenta modelar el conocimiento extra que puede tener un conductor habitual en la red vial, donde una calle lateral podría ofrecer una mejor ruta para el destino.

PARAMICS ofrece tres métodos de asignación: todo o nada, estocástico y dinámico. La ruta más corta puede ser recalculada en intervalos definido por el usuario, en donde se utiliza los costos generalizados de los arcos.

Un valor aleatorio de error es agregado al costo total percibido como una manera de modelar las variaciones introducidas por diferentes percepciones de costo. En PARAMICS, la cantidad de ruido aleatorio puede ser variada con la aplicación de uno o dos algoritmos disponibles. La opción estándar es referirse al algoritmo de porcentaje que se expresa como:

$$C' = \left(\frac{100-\mu}{100} + N_1 \right) C \quad (28)$$

Donde C' es el costo percibido; C es el costo original; μ es el factor de perturbación, el cual es determinado por el usuario para cada tipo de vehículo (entre 0 y 100) y N_1 es un valor aleatorio entre 0 y $2\mu/100$.

Alternativamente, puede ser usado un algoritmo de raíz cuadrada que se escribe como:

$$C' = C + \frac{(N_2+5)\mu\sqrt{C}}{500} \quad (29)$$

Donde C' , C y μ es lo mismo de antes y N_2 es un valor aleatorio entre 0 y 10.