

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL



**“Incorporación de Peatones en la Calibración de
un Modelo de Microsimulación para Flujo Mixto
Interrumpido”**

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

FELIPE ZAVALA RIQUELME

Prof. Guía: Ricardo Briones Huerta

Concepción, Junio de 2008

A mis padres, mi familia y mis amigos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a mi profesor guía Ricardo Briones y los integrantes de la comisión Álvaro Suazo y Franco Benedetti, por los constantes aportes y comentarios a mi trabajo.

También agradezco a los profesionales de la Unidad Operativa de Control de Tránsito de Concepción, Lorena Ortiz, Antonio Michela y Alejandro Núñez, del mismo modo que a Italo San Nicolo, profesional de Sectra Sur, por sus comentarios, explicaciones, ideas y en especial por la gran disposición que siempre dispensaron.

Agradezco la colaboración de todos aquellos amigos que participaron en la recolección de datos: José Sandoval, Eric Pérez, Karla Toledo, Marco Muñoz y Carlos Cabrera.

Por último no puedo dejar de agradecer a mi familia por el cariño y apoyo incondicional de siempre.

RESUMEN

El presente proyecto de título estudia la incorporación de peatones en modelos de microsimulación. Se basa en estudios anteriores que han calibrado modelos para la ciudad de Concepción, Chile, utilizando el software AIMSUN NG, anteriormente conocido como Getram, de Transport Simulation Systems, pero que no incluyen a los peatones. Para tal efecto se ha calibrado una intersección céntrica de Concepción donde los flujos vehiculares y peatonales son importantes, de manera que la interacción entre ellos resulta relevante, especialmente en cuanto a longitudes de cola. La elección de una intersección calibrada anteriormente en un horario con poca presencia peatonal, permite comparar y corroborar las posibles mejoras en los modelos que consideran el flujo peatonal.

Este trabajo aborda diferentes estrategias de modelación peatonal en el simulador AIMSUN NG y determina la mejor de ellas, luego se calibran los parámetros relevantes de vehículos y peatones, se obtiene el modelo calibrado y finalmente se valida el modelo en otra intersección del centro urbano de Concepción que presente condiciones similares de geometría y flujos. Los resultados finales muestran que es posible incorporar peatones en modelos de simulación, obteniéndose mejoras con respecto a modelos que no los consideran.

INDICE

INDICE	v
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCES Y METODOLOGÍA.....	3
1.3 AREA DE ESTUDIO.....	3
1.4 COMPOSICIÓN VEHICULAR	3
1.5 SECUENCIA DE ACTIVIDADES	3
1.6 CONTENIDO.....	4
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DEL FLUJO PEATONAL.....	6
2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	6
2.1.2 PRINCIPIOS DE LA CIRCULACIÓN PEATONAL	6
2.1.3 VARIABLES DEL FLUJO PEATONAL	6
2.1.3.1 FLUJO PEATONAL.....	7
2.1.3.2 VELOCIDAD PEATONAL.....	7
2.1.3.3 DENSIDAD PEATONAL	8
2.1.3.4 ESPACIO PEATONAL	9
2.2 ANÁLISIS DE INTERACCIÓN ENTRE FLUJO VEHICULAR MIXTO Y FLUJO PEATONAL EN INTERSECCIONES	11
2.2.1 PARADAS DE VEHÍCULOS	11
2.2.2 OBSTACULIZACIÓN EN VIRAJES DE VEHÍCULOS.....	12
2.3 CALIBRACIÓN DE MODELOS DE MICROSIMULACIÓN	14
2.3.1 SIMULACIÓN DE TRÁFICO.....	15
2.3.2 MODELO MICROSCÓPICO	15
2.3.3 MICROSIMULADOR AIMSUN NG.....	16
2.3.3.1 PARÁMETROS DEL MODELO	18
2.3.3.2 MODELOS UTILIZADOS POR AIMSUN.....	31
CAPÍTULO III: PROCESO DE CALIBRACIÓN	37
3.1 PROCEDIMIENTO UTILIZADO	38
3.1.2 ETAPA DE PREPARACIÓN	38
3.1.3 ETAPA DE CALIBRACIÓN.....	39

CAPÍTULO IV: ETAPA DE PREPARACIÓN	41
4.1 INDICADOR DE DESEMPEÑO	42
4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	42
4.2.1 LONGITUD DE COLA	43
4.2.2 PARÁMETROS SENSIBILIZADOS DE VEHÍCULOS	44
4.2.2.1 VELOCIDAD PERMITIDA	44
4.2.2.2 TIEMPO DE REACCION EN REPOSO	45
4.2.2.3 TIEMPO DE REACCIÓN	46
4.2.2.4 VELOCIDAD DESEADA	47
4.2.2.5 ACEPTACIÓN DEL LÍMITE DE VELOCIDAD	48
4.2.3 PARÁMETROS SENSIBILIZADOS DE PEATONES.....	49
4.2.3.1 ACELERACIÓN.....	49
4.2.3.2 DESACELERACIÓN	50
4.2.3.3 DISTANCIA MÍNIMA ENTRE PEATONES.....	51
4.2.3.4 TIEMPO DE REACCIÓN EN REPOSO.....	52
4.2.3.5 VELOCIDAD DE PEATÓN.....	53
4.2.4 PARÁMETROS SELECCIONADOS	54
4.3 ELECCIÓN DE RED DE CALIBRACIÓN	54
4.3.1 REQUERIMIENTOS DE VÍA.....	54
4.3.2 REQUERIMIENTOS SEGÚN TIPO DE FLUJO.....	55
4.3.3 ELECCIÓN DE RED	55
CAPÍTULO V: EXPERIMENTO DE CALIBRACIÓN	57
5.1 TOMA DE DATOS Y CALIBRACIÓN.....	58
5.1.2 PERIODO DE MEDICIÓN Y NIVEL DE AGREGACIÓN	58
5.1.3 MEDICIÓN DE LA INFORMACIÓN	59
5.1.3.1 DATOS VEHICULARES	59
5.1.3.2 MEDICIÓN DE PARÁMETROS PEATONALES	64
5.1.3.3 MEDICIÓN DE FLUJOS	66
5.1.3.4 MEDICIÓN DE FLUJOS EN INTERSECCIONES ADYACENTES	67
5.1.3.5 TIEMPOS DE PARADAS Y ESTACIONAMIENTOS.....	67
5.1.3.6 MEDICIONES DE FLUJOS PEATONALES CONTROLADOS POR SEMÁFORO	69
5.2 MODELACIÓN DEL FENÓMENO	69
5.2.1 ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN DE CRUCE PEATONAL.....	69
5.2.2 MODELO DE CRUCE PEATONAL ESCOGIDO	75

CAPÍTULO VI: RESULTADOS DE CALIBRACIÓN.....	76
6.1 VALOR REAL DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO	77
6.1.1 MEDICIÓN DE LONGITUDES DE COLA	77
6.2 MODELOS DE CALIBRACIÓN ANALIZADOS.....	78
6.2.1 MODELO 1.....	78
6.2.2 MODELO 2.....	78
6.2.3 MODELO 3.....	79
6.2.4 MODELO 4.....	79
6.3 VALOR MODELADO DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO	80
6.4 DETERMINACIÓN DE LA BONDAD DE AJUSTE DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO	82
6.4.1 DEFINICIÓN DEL ERROR ASOCIADO.....	82
6.4.2 ERRORES OBTENIDOS	83
6.4.3 ANÁLISIS DE MODELOS	85
6.4.4 ELECCIÓN DE MODELO CALIBRADO.....	86
CAPÍTULO VII: ETAPA DE VALIDACIÓN	88
7.1 MEDICIONES EN TERRENO.....	90
7.2 ÍNDICE DE DESEMPEÑO REAL.....	91
7.3 MODELOS DE VALIDACIÓN	91
7.3.1 VALOR MODELADO DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO	93
7.4 DETERMINACIÓN DE LA BONDAD DE AJUSTE DEL INDICE DE DESEMPEÑO	95
7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE VALIDACIÓN	100
CAPÍTULO VIII: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	102
8.1 CONCLUSIONES	103
8.2 COMENTARIOS	104
8.3 RECOMENDACIONES GENERALES	105
8.4 RECOMENDACIONES SOBRE LA INCORPORACIÓN DE FLUJO PEATONAL A UN MODELO DE MICROSIMULACIÓN.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Características Intersección Rengo – O’Higgins	56
Tabla N°2: Mínima Distancia entre Vehículos.	60
Tabla N°3: Dimensiones de Autos y Buses en la Ciudad de Concepción.	60
Tabla N°4: Máxima Aceleración Deseada de autos y buses.	61
Tabla N°5: Desaceleración Normal para autos y buses.	61
Tabla N°6: Tiempo de Reacción en Reposo de autos, buses y colectivos.	62
Tabla N°7: Velocidad de Circulación Intersección Rengo – O’Higgins.....	63
Tabla N°8: Velocidad Peatonal.	64
Tabla N°9: Tiempo de Reacción en Parada de Peatones.....	65
Tabla N°10: Intervalos de llegada y Tiempos de Parada para Buses y Colectivos.	68
Tabla N°11: Intervalos de llegada y Tiempos de Parada de vehículos particulares en	68
Tabla N°12: Resultados de Modelos de Cruce Peatonal.....	75
Tabla N°13: Longitud de Cola Observada en Intersección Rengo – O’Higgins,.....	77
Tabla N°14: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O’Higgins para Modelo 1 de	80
Tabla N°15: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O’Higgins para Modelo 2 de	81
Tabla N°16: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O’Higgins para Modelo 3 de	81
Tabla N°17: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O’Higgins para Modelo 4 de	81
Tabla N°18: Longitud de Cola Promedio de Modelos de Calibración en Intersección	82
Tabla N°19: Error Asociado a Modelo 1 de Calibración.....	83
Tabla N°20: Error Asociado a Modelo 2 de Calibración.....	84
Tabla N°21: Error Asociado a Modelo 3 de Calibración.....	84
Tabla N°22: Error Asociado a Modelo 4 de Calibración.....	84
Tabla N°23: Error Promedio Asociado a Modelos de Calibración.	85
Tabla N°24: Diferencias en Longitudes de Cola en Pistas de Viraje.....	85
Tabla N°25: Validación - Longitud de Cola Tucapel Observada.	91
Tabla N°26: Longitud de Cola en Intersección O’Higgins - Tucapel para Modelo de	93
Tabla N°27: Longitud de Cola en Intersección O’Higgins - Tucapel para Modelo de	94
Tabla N°28: Longitud de Cola en Intersección O’Higgins - Tucapel para Modelo de	94
Tabla N°29: Longitud de Cola en Intersección O’Higgins - Tucapel para Modelo de	94
Tabla N°30: Longitud de Cola Promedio de Modelos de Validación en Intersección	95

Tabla N°31: Diferencia Asociada a Modelo V1 de Validación.....	95
Tabla N°32: Diferencia Asociada a Modelo V2 de Validación.....	96
Tabla N°33: Diferencia Asociada a Modelo V3 de Validación.....	96
Tabla N°34: Diferencia Asociada a Modelo V4 de Validación.....	96
Tabla N°35: Diferencias Promedio asociadas a Modelos de Validación en Intersección	97
Tabla N°36: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V1.	97
Tabla N°37: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V2.	97
Tabla N°38: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V3.	98
Tabla N°39: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V4.	98
Tabla N°40: Porcentajes de Error Promedio asociadas a Modelos de Validación.....	98
Tabla N°41: Porcentajes de Error Promedio asociadas a Modelos de Validación en pista de viraje.....	99
Tabla N°42: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V1, por métodos EPPA y.....	99
Tabla N°43: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V2, por métodos EPPA y.....	99
Tabla N°44: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V3, por métodos EPPA y.....	100
Tabla N°45: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V4, por métodos EPPA y.....	100
Tabla N°46: Parámetros Peatonales calibrados para la ciudad de Concepción.....	106
Tabla N°47: Parámetros Vehiculares calibrados para la ciudad de Concepción.....	106
Tabla N°48: Parámetros Globales calibrados para la ciudad de Concepción en hora punta mediodía y hora punta mañana.	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Espacios Ocupados por Peatones.	10
Figura N°2: Flujo de Saturación de Viraje Obstaculizado.....	12
Figura N°3: Obstaculización de Virajes.....	13
Figura N°4: Visualización de ambiente de trabajo Aimsun.....	17
Figura N°5: Visualización Aimsun – Ventana Tiempos de Reacción.....	20
Figura N°6: Visualización Aimsun – Ventana Parámetros Globales.....	21
Figura N°7: Visualización Aimsun – Ventana de Preferencias.....	23
Figura N°8: Zonas de Cambio de Pista.....	26
Figura N°9: Visualización Aimsun – Ventana Parámetros Locales.....	27
Figura N°10: Visualización Aimsun – Ventana Parámetros Vehiculares.....	31
Figura N°11: Influencia de Velocidad Permitida de Vehículos en la Longitud de Cola.....	44
Figura N°12: Influencia del Tiempo de Reacción en Reposo de Vehículos en la.....	45
Figura N°13: Influencia del Tiempo de Reacción de Vehículos en la Longitud de Cola.....	46
Figura N°14: Influencia de la Velocidad Deseada de Vehículos en la Longitud de Cola.....	47
Figura N°15: Influencia de Aceptación de Velocidad Vehicular en Longitud de Cola.....	48
Figura N°16: Influencia de Aceleración de Peatones en Longitud de Cola Vehicular.....	49
Figura N°17: Influencia de Desaceleración Normal de Peatones en Longitud de Cola.....	50
Figura N°18: Influencia de Distancia Mínima entre Peatones en Longitud de Cola.....	51
Figura N°19: Influencia del Tiempo de Reacción en Reposo de Peatones en la.....	52
Figura N°20: Influencia de la Velocidad Peatonal en la Longitud de Copla Vehicular.....	53
Figura N°21: Fotografía Aérea Intersección de Calibración.....	56
Figura N°22: Numeración de Pistas Intersección Rengo – O’Higgins.....	63
Figura N°23: Determinación de Velocidades Peatonales Intersección Rengo – O’Higgins.....	65
Figura N°24: Flujos Hora Punta Mediodía (12.30 – 13.30 hrs) en Esquina Rengo –.....	66
Figura N°25: Simulación Modelo P2.....	70
Figura N°26: Simulación Modelo P3.....	71
Figura N°27: Simulación Modelo P4.....	72
Figura N°28: Simulación Modelo P5.....	73
Figura N°29: Simulación Modelo P6.....	74
Figura N°30: Red de Calibración sin Peatones, Modelos 1 y 2.....	79
Figura N°31: Red de Calibración con Peatones.....	80
Figura N°32: Fotografía Aérea Intersección de Validación.....	89

Figura N°33: Flujos Tucapel – O’Higgins, Octubre 2007.	90
Figura N°34: Red de Validación sin peatones, Modelos V1 y V2.	92
Figura N°35: Red de Validación con peatones, Modelos V3 y V4.	93

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la utilización de microsimuladores de tráfico, es una herramienta que puede ser de gran ayuda para ingenieros y planificadores de transporte, debido a que permiten analizar todo un sistema vial y visualizar las simulaciones con buen nivel de detalle. Aunque para obtener buenos resultados, estos programas deben ser calibrados para los lugares específicos donde se estudia alguna red.

En la ciudad de Concepción, Chile, se ha calibrado el software AIMSUN NG para flujo mixto interrumpido (Ortiz, 2006). A partir de esto, el presente proyecto de título estudia y analiza la posibilidad de aumentar el nivel de detalle en la simulación a través de la incorporación de peatones en una red utilizando el mismo software.

1.1 OBJETIVOS

Como objetivo general se plantea la incorporación de peatones a la calibración de un modelo de microsimulación del software AIMSUN NG, que represente el comportamiento de los usuarios, en situación de flujo mixto, peatonal e interrumpido, aplicado a la ciudad de Concepción.

Como objetivos específicos se plantea:

- Determinar un modo adecuado de simulación, que logre replicar la interacción entre vehículos y peatones en las intersecciones semaforizadas.
- Identificar y calibrar los principales parámetros de un modelo de simulación de tráfico mixto peatonal e interrumpido en la ciudad de Concepción.
- Validar el modelo calibrado, comparando datos observados con los obtenidos en la simulación.
- Identificar cualitativa y cuantitativamente las diferencias entre los resultados de la calibración para situaciones con influencia peatonal y sin ella, en la ciudad de Concepción.

1.2 ALCANCES Y METODOLOGÍA

El estudio se realiza en tres etapas, la primera de preparación (toma de datos e identificación del fenómeno a simular); la segunda, de calibración, y la tercera etapa de validación. La primera y segunda etapas se realizan en la misma intersección, mientras que para la validación se utiliza una distinta, pero de características similares.

En la recolección de datos se utilizan grabaciones realizadas por las cámaras de control de tránsito de SECTRA, así como también datos medidos en terreno a través de personal calificado. Se estudia la situación en el horario punta mediodía y el software utilizado en la calibración microscópica es AIMSUN NG.

1.3 AREA DE ESTUDIO

La zona en estudio es el centro urbano de Concepción, por lo tanto se calibrará una intersección céntrica, que contenga una presencia vehicular y peatonal importante. La validación se realizará en una esquina que presente características similares de ubicación, tráfico vehicular y peatonal. En el Capítulo IV se detalla la elección de la intersección.

1.4 COMPOSICIÓN VEHICULAR

Debido al alto grado de vehículos de locomoción colectiva presentes en el sistema de transporte chileno, se considera la condición de flujo mixto. Es decir, que además de peatones y autos particulares se incluirán en el estudio, buses y colectivos, los que tienen muy fuerte presencia en las principales calles de Concepción.

1.5 SECUENCIA DE ACTIVIDADES

Las actividades de este trabajo se desarrollan en el siguiente orden, con el fin de alcanzar los objetivos planteados:

- i) Elección de índice de desempeño, para calibrar el modelo
- ii) Realizar de un análisis de sensibilidad de los parámetros que utiliza el microsimulador, para determinar su influencia en el índice de desempeño.
- iii) Toma de datos en la zona en estudio para la calibración

- iv) Realizar el experimento de calibración
- v) Toma de datos en la zona en estudio para la validación
- vi) Realizar el experimento de validación.
- vii) Cálculo de bondad de ajuste, mediante un análisis comparativo entre el indicador de desempeño observado y el que entrega el modelo.

1.6 CONTENIDO

Este trabajo se estructura en base a nueve capítulos. En el Capítulo I se desarrollan los antecedentes generales relativos a la investigación. En el Capítulo II se explica el fundamento teórico, detallando el comportamiento e interacción entre los flujos vehiculares y peatonales, además del funcionamiento del software de simulación AIMSUN NG. En el Capítulo III se explica el proceso de calibración y procedimiento a través del cual se logra. En el Capítulo IV se describen los parámetros a calibrar, los que se consideran ya calibrados y bajo que criterio se han seleccionado. En el Capítulo V se realiza el experimento de calibración, explicando la metodología seguida para la toma de datos y los modelos de simulación utilizados. En el Capítulo VI se revisan los resultados de la calibración. El Capítulo VII muestra la validación y sus resultados. En el Capítulo VIII se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se entrega el fundamento teórico y conceptos generales de flujo peatonal, interacción entre vehículos y peatones, y simulación, referida especialmente al software AIMSUN NG.

2.1 CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DEL FLUJO PEATONAL

2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

En términos generales, un peatón es una persona desplazándose a pie, bien corriendo o caminando. Guías y códigos peatonales recientes, incluyen en esta categoría a personas que transportan carros o coches y personas que se trasladan en patines o patinetas. Para efectos de este estudio, se considera a todas estas personas como peatones en la toma de datos.

2.1.2 PRINCIPIOS DE LA CIRCULACIÓN PEATONAL

Las variables cualitativas de la circulación peatonal son análogas a las empleadas en la de los vehículos. Estas son: la libertad de circulación a la velocidad deseada y la libertad de realizar adelantamientos.

Como variables de uso exclusivo en la circulación peatonal se puede citar la posibilidad de atravesar una corriente de circulación peatonal en sentido contrario al de la corriente principal, y en general poder efectuar cambios de dirección y variar la velocidad o cambiar el paso de marcha sin originar conflictos.

2.1.3 VARIABLES DEL FLUJO PEATONAL

Las características típicas de los estudios del tráfico peatonal son etiquetadas como Flujo, Velocidad y Densidad, los cuales son parámetros de distribuciones estadísticas y no números absolutos. De dichas variables, la densidad no será calibrada, pues no es relevante para los objetivos y por lo demás será implícitamente determinada a través de los otros parámetros. Otras variables que resultan importantes para la calibración en el modelo de simulación, serán detalladas más adelante, en el punto 2.3 que trata del simulador AIMSUN.

2.1.3.1 FLUJO PEATONAL

Las mediciones de flujo peatonal son recopiladas directamente con medidas en una sección, y por definición requieren de la medida del tiempo. Los flujos no pueden ser estimados sólo de una fotografía.

Los índices de flujo y el progreso del tiempo están relacionados el uno con el otro como sigue. El índice de flujo q es el número de individuos que pasan por una sección de vía peatonal, durante un tiempo determinado T , de este modo se tiene:

$$q = \frac{N}{T} \quad (2.1)$$

Donde:

q = índice de flujo o simplemente flujo

N = número de peatones totales cuantificados

T = tiempo total de conteo

Los índices o tasas de flujo son por lo general expresados en términos de peatones por minuto o peatones por cada 15 minutos. Se puede decir entonces que el flujo peatonal es el número de individuos que cruza una sección de control en un determinado período de tiempo, entendiéndose como sección a una zona de control transversal a la dirección del flujo de los peatones.

2.1.3.2 VELOCIDAD PEATONAL

La medida de velocidad de un peatón requiere tanto la medición del tiempo como del espacio recorrido en el tiempo observado. La velocidad instantánea de un peatón es definida como:

$$v_i = \frac{dx}{dt} = \lim_{(t_2 - t_1) \rightarrow 0} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (2.2)$$

Donde:

dx : diferencial de espacio recorrido por un peatón.

dt : diferencial de tiempo.

El estudio de las velocidades instantáneas de los peatones no resulta relevante para los objetivos de este proyecto de título, por lo tanto se utilizará la relación entre el tiempo que demora un peatón en recorrer una distancia determinada. De este modo, se fija una distancia de recorrido y se miden los tiempos requeridos por los peatones para recorrer esta distancia. La velocidad será expresada en metros por minuto (m/min.) o en kilómetros por hora (Km./h).

2.1.3.3 DENSIDAD PEATONAL

La densidad está definida como el número de individuos por unidad de área de vía peatonal. El procedimiento de medición de esta variable se simplifica muchísimo con el uso de la fotografía y la filmación de corrientes de circulación peatonal, consiste básicamente en contar los peatones en la vía peatonal y dividir este valor por la superficie de la vía controlada. Esta superficie se conoce como zona de observación y sus dimensiones son previamente conocidas. El conteo peatonal se hace en un instante de tiempo determinado, es decir, se debe congelar el tiempo.

La densidad además puede ser calculada a través de la ecuación fundamental del tráfico, para lo que hay que conocer la velocidad y el flujo peatonal. Esta ecuación es también llamada ecuación identidad fundamental, su forma es:

$$k = \frac{q}{\bar{v}} \quad (2.3)$$

Donde,

k = densidad peatonal

q = flujo peatonal

\bar{v} = velocidad peatonal

La ecuación (2.3) puede ser reordenada y presentada simplemente como:

$$q = v * k \quad (\text{Ecuación Fundamental de Tráfico}) \quad (2.4)$$

La densidad peatonal normalmente es medida en peatones por metro cuadrado (p/m^2).

2.1.3.4 ESPACIO PEATONAL

El espacio peatonal usualmente es usado como un sustituto a la densidad. La mayoría de las investigaciones se centran en obtener la densidad peatonal y de ella consiguen los valores de espacio peatonal, ya que el espacio es el inverso de la densidad. Se expresa como:

$$espacio = \frac{1}{k} \quad (2.5)$$

El espacio peatonal es definido como la superficie media que dispone cada peatón dentro de la vía peatonal analizada. Es evaluada en metros cuadrados por peatón (m^2/p) y es la unidad más práctica para el análisis.

Para efectos de este estudio se considerarán inicialmente los valores de espacio peatonal de las Recomendaciones para el Diseño del Espacio Vial Urbano - REDEVU (MIDEPLAN, 1998), siendo calibrados sólo si la variable se muestra como no despreciable. (Ver Figura N°1)

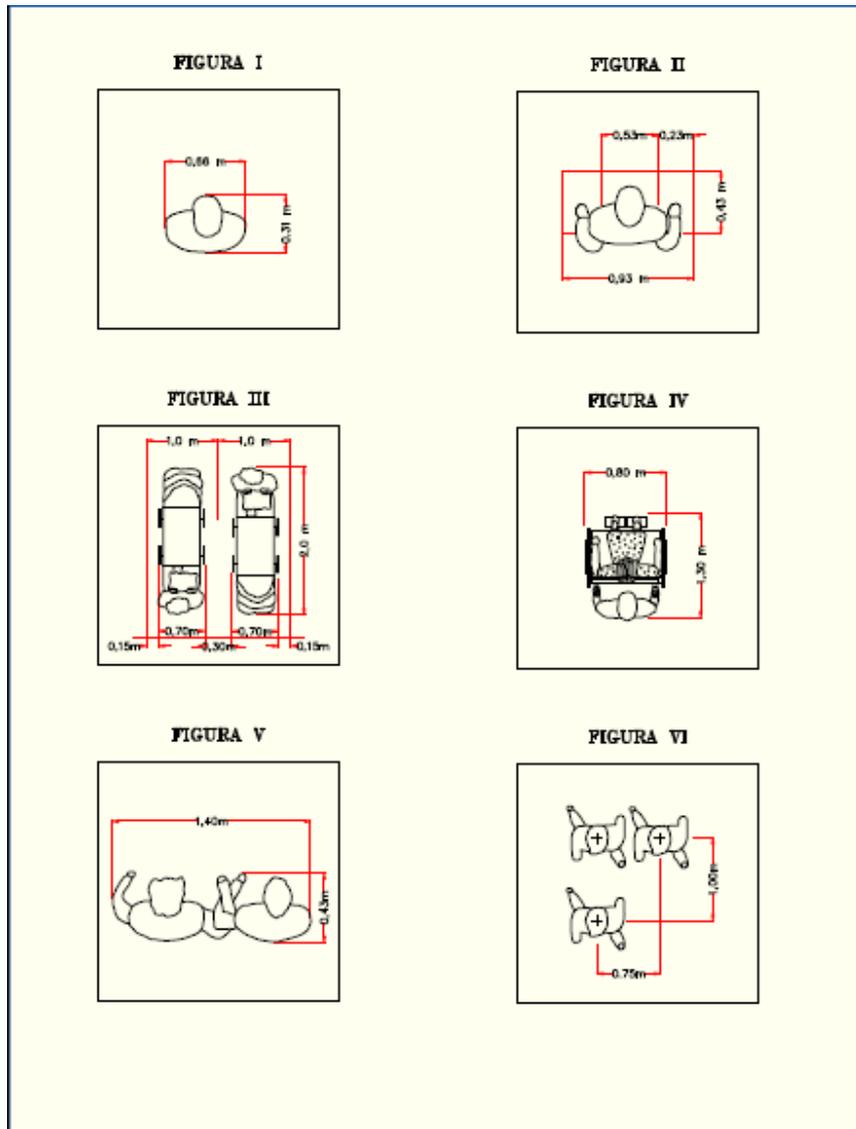


Figura N°1: Espacios Ocupados por Peatones.

(Fuente: Redevu, 1998)

2.2 ANÁLISIS DE INTERACCIÓN ENTRE FLUJO VEHICULAR MIXTO Y FLUJO PEATONAL EN INTERSECCIONES

Diversas son las interacciones que se producen entre los vehículos motorizados y los peatones en una red, especialmente en los centros urbanos de las ciudades, debido al gran volumen de flujos que allí se da. En este trabajo se consideran dos interacciones principales. La primera es la parada de vehículos para tomar o dejar pasajeros, pudiendo ser o no vehículos de locomoción colectiva. La segunda es la interacción que se observa en los vehículos que viran en una intersección y que son obstaculizados en su paso por peatones que cruzan la calle.

2.2.1 PARADAS DE VEHÍCULOS

i) Locomoción Colectiva

Los altos flujos peatonales en redes céntricas comúnmente van de la mano con una gran actividad en las paradas de locomoción colectiva, tanto para dejar pasajeros como para tomarlos. Esta interacción se puede apreciar en la cantidad de vehículos en las paradas, el intervalo de llegada y el tiempo en la parada. De todas formas, estos parámetros generalmente están regulados por las entidades de planificación y gestión de tránsito que corresponda, con el fin de optimizar la circulación y evitar conflictos.

ii) Vehículos Particulares

En las horas punta también se puede apreciar el aumento significativo de vehículos particulares que se detienen en una pista para dejar o tomar pasajeros, obstaculizando la circulación. En modelos de simulación, este fenómeno se puede evaluar de la misma forma que la locomoción colectiva, es decir a través del intervalo de llegada y los tiempos de parada.

2.2.2 OBSTACULIZACIÓN EN VIRAJES DE VEHÍCULOS

La interacción que se da entre un flujo peatonal y uno vehicular en las intersecciones es la obstaculización que el cruce peatonal genera en los flujos de vehículos que giran, ya sea a la izquierda o la derecha. Este fenómeno genera detenciones en los vehículos y menores velocidades de circulación, por cuanto los conductores deben ser cuidadosos en su manejo por las posibilidades de atropellos a peatones.

El Manual de Señalización de Tránsito, en su Capítulo IV (2001) considera este fenómeno al evaluar los flujos de saturación en intersecciones obstaculizadas, como se observa en la Figura N°2.

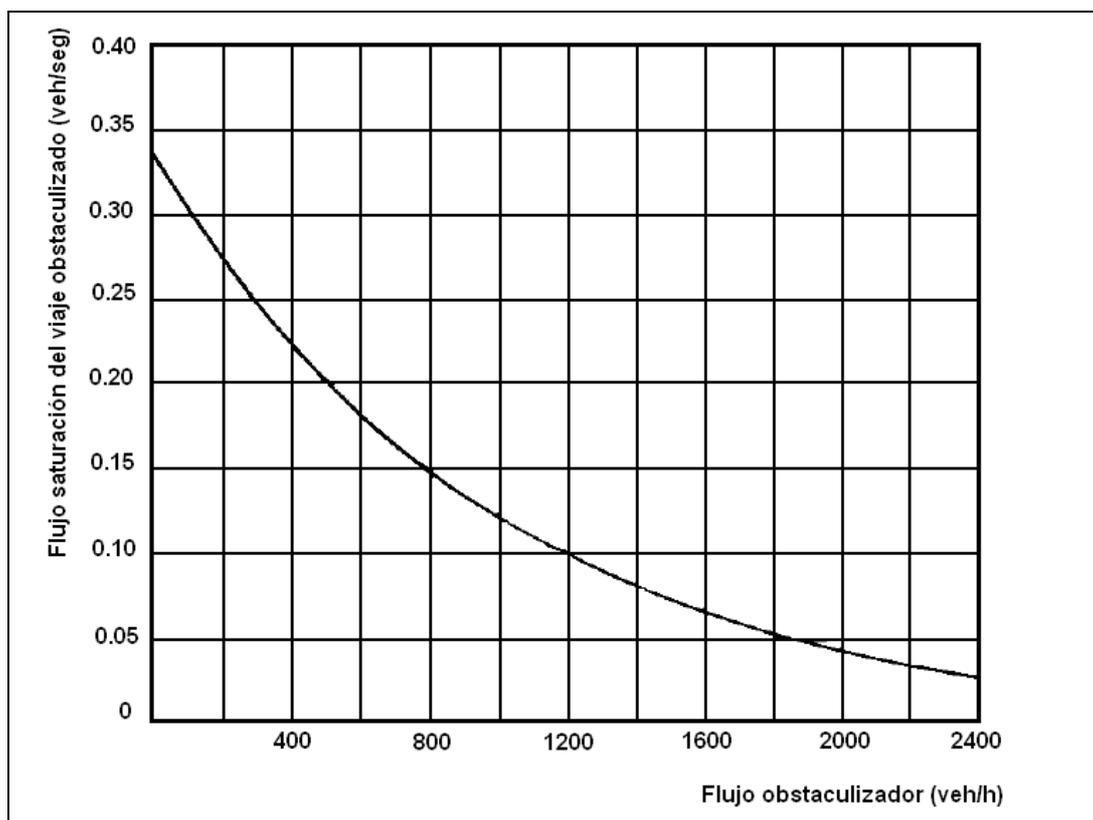


Figura N°2: Flujo de Saturación de Viraje Obstaculizado

(Fuente: Capítulo IV, Manual de Señalización de Tránsito, 1988)

La misma publicación muestra posibles obstaculizaciones del flujo vehicular (Ver Figura N°3). Allí se observan las tres situaciones obstaculizadores de flujo antes vistas, como son: paradas de locomoción colectiva, vehículos particulares detenidos y flujos peatonales que cruzan una calle.

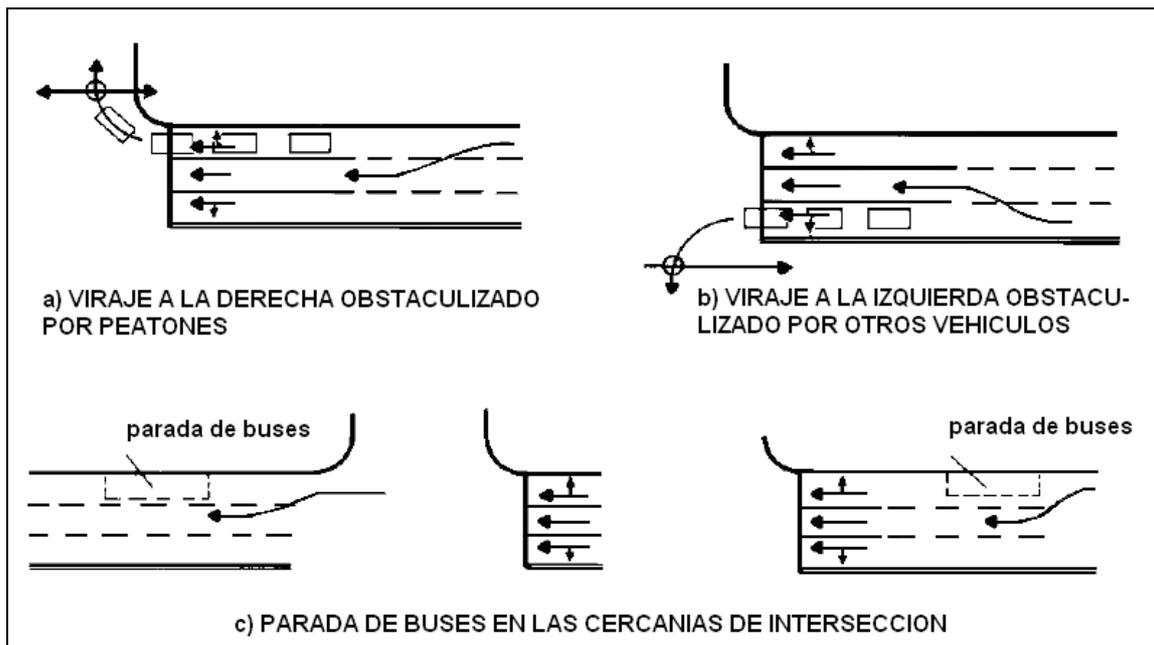


Figura N°3: Obstaculización de Virajes

(Fuente: Capítulo IV, *Manual de Señalización de Tránsito*, 1988)

Las interacciones entre vehículos y peatones mostradas anteriormente, resultan muy importantes a la hora de calibrar los modelos de simulación, y son parte fundamental del presente trabajo. Por lo tanto, para replicar y calibrar estos comportamientos se debe conocer y determinar los parámetros del modelo de simulación, en este caso AIMSUN NG, que lo permiten.

2.3 CALIBRACIÓN DE MODELOS DE MICROSIMULACIÓN

En una forma bastante simplificada se presentan algunas definiciones básicas de conceptos que se utilizarán en el desarrollo de esta investigación:

- *Calibración (Hourdakis et al, 2002), es el proceso en el cual los parámetros del modelo de simulación se optimizan al mayor grado posible para obtener resultados cercanos entre las medidas simuladas y las reales de tráfico, que incluyen sobre todo volumen, velocidad y ocupación.*
- *Simulación (Shannon, 1998. Citada por Ortiz, 2006), es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y experimentar con el mismo para entender el comportamiento del sistema y/o evaluar una serie de estrategias para la operación del sistema. En el fondo se habla de simulación dinámica, pues permiten manejar el tiempo, ya que en segundos o minutos se puede analizar el comportamiento que tendrá el sistema en horas, meses o años. Además permite identificar cuales son las variables de mayor importancia para el estudio del comportamiento del sistema. En resumidas cuentas la simulación permite responder la pregunta ¿Qué pasaría si...? pues permite realizar cambios y evaluar más de una alternativa sin que sea necesario intervenir la realidad del sistema.*
- *Validación (Smartest-D8, 1999. Citada por Ortiz, 2006), es la comparación de las salidas del modelo con los datos reales medidos utilizando información no considerada previamente en la calibración.*
- *Indicador de desempeño ID (Ortiz, 2006) corresponde a alguna de las salidas del modelo. Es la variable utilizada para realizar la calibración mediante la comparación entre un valor real que corresponde al indicador de desempeño medido en terreno (IDR), con un valor simulado que corresponde al indicador de desempeño obtenido al realizar la simulación (IDS).*

2.3.1 SIMULACIÓN DE TRÁFICO

Los modelos de simulación de tráfico pueden ser clasificados de distintos modos, aunque la forma más apropiada para este estudio, es diferenciarlos por el nivel de detalle con que trabajan los modelos. Es así como se les clasifica como modelos macroscópicos, los que consideran el flujo de vehículos como un flujo continuo y los modelos microscópicos, que consideran el comportamiento de cada vehículo en particular y su interacción con los demás. El software AIMSUN NG se considera dentro del último grupo, pues modela las características individuales de cada vehículo o conductor. Además de AIMSUN existen otros modelos de simulación microscópicos, tales como, Paramics, Corsim, Hutsim, entre otros. En su mayoría se basan en la Teoría de Seguimiento Vehicular desarrollada por General Motors en la década de los '50. Estos modelos son utilizados como herramientas en la gestión de transporte debido a su flexibilidad, eficiencia en el uso de recursos, y la rápida interpretación de sus resultados a través del despliegue en pantalla.

2.3.2 MODELO MICROSCÓPICO

La principal característica de estos modelos es que distinguen individualmente a cada vehículo en la red simulada a cada instante o “simulation step”. Este modelo describe tanto las entidades del sistema como sus actividades en forma detallada. Las reacciones o comportamiento del conductor de cada vehículo están normadas según los modelos de seguimiento vehicular y modelos de cambio de pistas, entre otros.

Como se indica al comienzo de este trabajo, se utiliza el software de simulación AIMSUN NG con el objeto de aumentar el nivel de detalle de investigaciones anteriores realizadas con el mismo programa en la Universidad del Bío Bío, Chile, especialmente la profundización del proyecto de título de Ortiz, 2006.

2.3.3 MICROSIMULADOR AIMSUN NG

En esta sección se hace una descripción del programa de simulación microscópica de tráfico AIMSUN NG, considerando los modelos y submodelos influyentes para el caso de tráfico mixto interrumpido y peatonal. AIMSUN NG es un ambiente de simulación desarrollado por Transport Simulation Systems (TSS), corresponde a la versión 5.1 del microsimulador anteriormente conocido como Getram. Se llama AIMSUN NG al ambiente de trabajo, mientras que el simulador recibe el nombre de AIMSUN o sólo simulador. AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), el simulador microscópico interactivo avanzado para redes urbanas e interurbanas, es un simulador de tráfico microscópico que puede tratar diferentes redes: urbanas, autopistas, carreteras, rotondas, arterias y cualquier combinación entre ellas.

AIMSUN sigue una aproximación de la simulación microscópica. Esto significa que el comportamiento de cada vehículo en la red se modela continuamente a lo largo del periodo de tiempo de simulación mientras viaja a través de la red de tráfico, según varios modelos de comportamiento de vehículo (seguimiento vehicular, cambio de pista, entre otros) los que serán descritos detalladamente en secciones posteriores.

Existen elementos continuos del sistema (vehículos, detectores) cuyos estados cambian continuamente durante el tiempo simulado, el cual es partido en cortos intervalos de tiempo fijos llamado ciclos de simulación. Hay otros elementos, como semáforos y puntos de entrada, cuyos estados cambian discretamente en los puntos específicos de tiempo de la simulación. El sistema proporciona además un modelo detallado de la red de tráfico, distingue entre diferentes tipos de vehículos y conductores y permite crear una amplia gama de geometrías en la red. También puede modelar casualidades, esto se refiere a las maniobras contradictorias o inesperadas de los conductores.

Los datos de entrada requeridos por AIMSUN forman lo que se llama escenario de simulación, en donde un set de parámetros de ésta define el experimento. El escenario está compuesto por cuatro tipos de datos: la descripción de la red, el plan de control de tráfico, datos de demanda de tráfico y planes de transporte público.

Los parámetros de la simulación son valores fijos que describen el experimento (tiempo de simulación, período, intervalos de estadística). Sin embargo, existen otros parámetros que calibran a los modelos (tiempos de reacción, tiempos de reacción en reposo, etc.). Estos parámetros se describen más adelante y algunos de ellos forman parte de la calibración de este estudio.

Entre los datos proporcionados por AIMSUN se encuentra un conjunto de salidas numéricas y gráficas, entre las que se encuentran: una representación gráfica animada continua de la actuación de red de tráfico, ambos en 2D y 3D; los datos de rendimiento estadístico (el flujo, aceleración, tiempos de viaje, retrasos, paradas, etc.) y los datos recogidos por los detectores simulados (conteos, ocupación, velocidad). En la Figura N°4 se encuentra una visualización del ambiente del microsimulador.

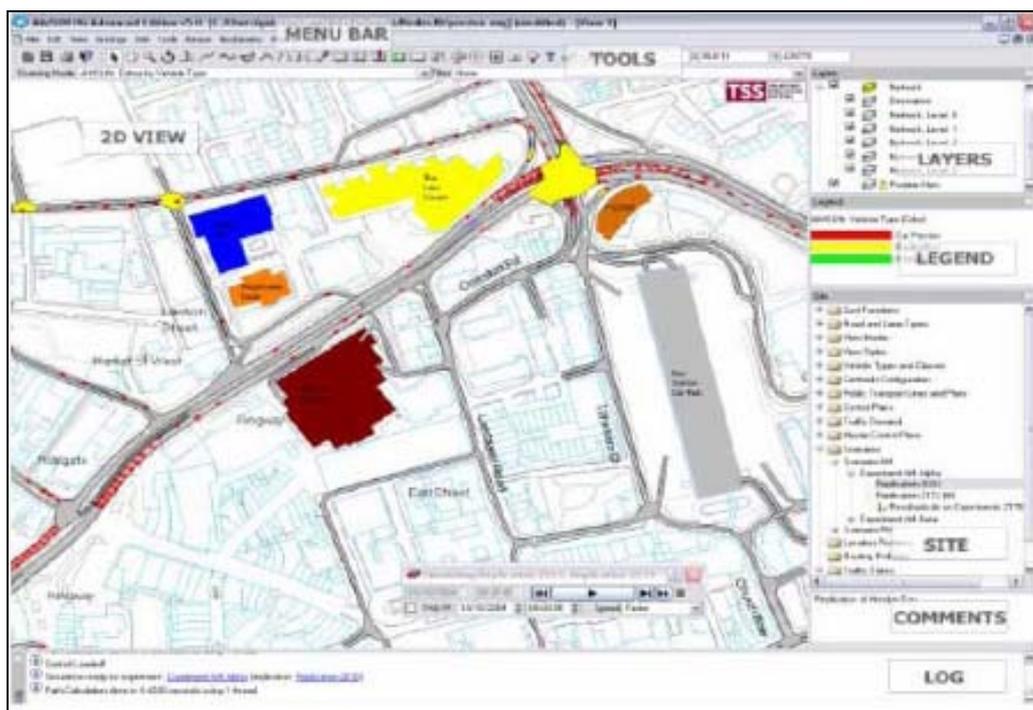


Figura N°4: Visualización de ambiente de trabajo Aimsun
(Fuente: Aimsun NG User's Manual Version 5.1 – TSS, 2001)

2.3.3.1 PARÁMETROS DEL MODELO

En una simulación microscópica las maniobras del vehículo son modeladas en detalle utilizando los modelos de seguimiento vehicular y cambio de pista. Estos modelos de comportamiento son función de varios parámetros que permiten modelar diferentes tipos de vehículos como autos, buses, camiones, etc. El usuario puede fijar estos parámetros dependiendo de las características del tráfico que desea reproducir. Por ejemplo, el comportamiento de los conductores es diferente en las áreas céntricas de una ciudad, en donde existen intersecciones que en zonas en donde no las hay, como las autopistas. En ambos casos el modelo que rige el comportamiento vehicular es el mismo, pero existen variables pertenecientes a ellos que pueden ser diferentes; todo depende del ambiente en el cual sean modelados. El proceso de calibración trata de configurar apropiadamente los valores de estos parámetros para una mejor aproximación a la realidad.

Estos parámetros pueden ser agrupados en tres categorías, dependiendo del nivel en el cual están definidos.

Estas categorías son:

- Parámetros Globales de red
- Parámetros Locales de sección
- Atributos Vehiculares

a) PARÁMETROS GLOBALES

Pueden ser divididos en cuatro categorías, cada una compuesta por una cantidad determinada de parámetros, estas categorías son:

- Parámetros globales generales
- Parámetros globales de seguimiento vehicular - dos pistas
- Parámetros globales de cambio de pista
- Otros

A continuación se describe el conjunto de parámetros que compone cada categoría.

a.1) Parámetros Globales Generales

Este set de parámetros está relacionado con los modelos de comportamiento vehicular, los cuales son válidos a lo largo de toda la red. No define ni el tipo de vehículo ni la sección y son utilizados para todos los vehículos, en toda la red y durante todo el período que dura la simulación:

- *Paso de simulación* (simulation step): Es el sistema que actualiza el intervalo o ciclo de tiempo a cada paso de la simulación, en donde el estado de todos los elementos del sistema se ponen al día. Se encuentra en un rango de 0,1 a 1,0 segundos.

- *Tiempo de reacción del conductor* (Driver's reaction time): Es el tiempo que le toma al conductor reaccionar frente a cambios en la velocidad del vehículo que lo precede. El tiempo de reacción puede ser fijo o variable. En el caso de ser fijo, toma el mismo valor para todos los vehículos, pero en caso de ser variable, el usuario define una función de probabilidad discreta para cada vehículo. Se debe notar que para cada tipo de vehículo, la suma de las probabilidades debe ser igual a la unidad.

- *Tiempo de reacción en reposo* (Reaction time at stop): Es el tiempo que le toma a un vehículo detenido reaccionar a la aceleración de un vehículo que va adelante, o a un semáforo que cambia a luz verde. El tiempo de reacción en reposo sólo se considera para vehículos que empiezan su movimiento desde una condición detenida, mientras que el tiempo de reacción descrito anteriormente es para vehículos que están en movimiento. El tiempo de reacción en reposo puede ser fijo o variable, además tiene una gran influencia en la descarga de colas, y por lo tanto le da al usuario mucho más control en la modelación de la cola.

Los parámetros de tiempo se muestran en la carpeta de tiempos de reacción de la ventana del experimento, en donde pueden editarse los valores a utilizar por defecto (ver Figura N°5).

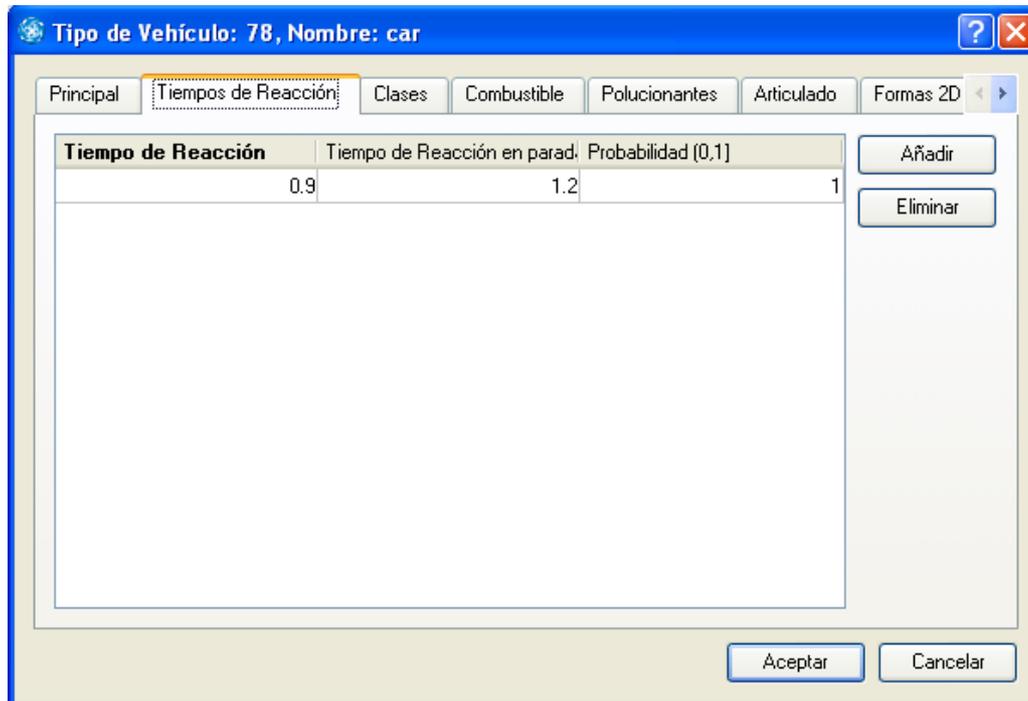


Figura N°5: Visualización Aimsun – Ventana Tiempos de Reacción

(Fuente: *Aimsun NG User's Manual Version 5.1 – TSS, 2001*)

- *Velocidad entrando a la cola* (Queuing Up Speed): Los vehículos cuya velocidad es inferior a este valor, en m/s, son considerados como detenidos. Este parámetro afecta la recolección de datos estadísticos para detenciones y colas.
- *Velocidad dejando la cola* (Queue Leaving Speed): Los vehículos que se encuentran detenidos en una cola e incrementan su velocidad, en m/s, hasta superar el valor de este parámetro, son considerados como vehículos en movimiento. Al igual que el caso anterior, este parámetro afecta la recolección de datos estadísticos para detenciones y colas.

Los parámetros de velocidad entrando y dejando la cola, también tienen influencia en el modelo de cambio de pista y se encuentran en la ventana del experimento en la carpeta de comportamiento. (Ver Figura N°6)

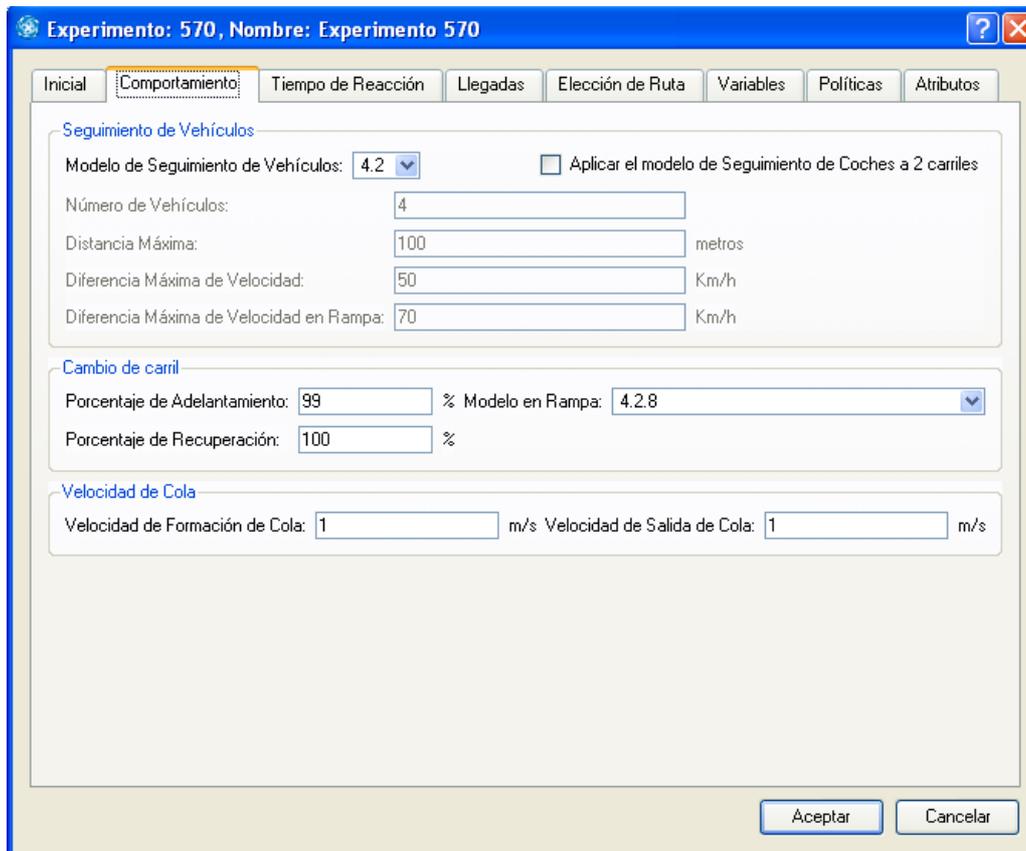


Figura N°6: Visualización Aimsun – Ventana Parámetros Globales

(Fuente: *Aimsun NG User's Manual Version 5.1 – TSS, 2001*)

a.2) Parámetros Globales de Seguimiento Vehicular - Dos Pistas

Es el set de parámetros globales utilizados en el modelo de seguimiento vehicular para dos pistas.

- *Número de vehículos* (Number of Vehicles): Es el máximo número de vehículos a considerar en el modelo de seguimiento vehicular. Es utilizado para modelar la influencia de pistas adyacentes en el modelo.
- *Máxima distancia* (Maximum Distance): Es la máxima distancia en metros con respecto al vehículo que va adelante, considerada en el modelo de seguimiento vehicular.

- *Máxima diferencia de velocidad* (Maximum Speed Difference): Es la máxima diferencia de velocidad, en km/hr, entre una pista y la pista adyacente en el modelo de seguimiento vehicular.

- *Máxima diferencia de velocidad en rampas de acceso* (Maximum Speed Difference On-Ramp): Es la máxima diferencia de velocidad, en km/hr, entre la pista principal y la pista de la rampa de acceso en el modelo de seguimiento vehicular.

a.3) Parámetros Globales de Cambio De Pista

Es el set de parámetros globales utilizados en el modelo de cambio de pista.

- *Porcentaje de Adelantamiento* (Percent Overtake): Representa el porcentaje de la velocidad desde el cual un vehículo decide realizar un adelantamiento. El valor debe encontrarse entre cero y uno (sin tomar el cero) y su valor por defecto es 0,9. Es utilizado para modelar la decisión de adelantar.

- *Porcentaje de Recuperación* (Percent Recover): Es el porcentaje de la velocidad desde el cual un vehículo decide volver a la pista lenta después de realizar un adelantamiento. El valor debe encontrarse entre cero y uno (sin tomar el cero) y su valor por defecto es 0,95.

- *Modelo de rampa de acceso* (On-Ramp Model): El usuario puede seleccionar qué versión del modelo desea utilizar. El propósito es guardar la consistencia del modelo a calibrar.

Los parámetros globales de cambio de pista se encuentran en la ventana del experimento en la carpeta de comportamiento. (Ver Figura N°6).

a.4) OTROS PARÁMETROS GLOBALES

Aparte de lo descrito anteriormente existen dos parámetros que se definen para toda la red. El valor de estos afecta la modelación en AIMSUN y son los que se describen a continuación:

- *Lado del camino del movimiento vehicular* (Road side of vehicle movement): Cuando se edita una red, se debe definir los vehículos que conducen por el lado izquierdo o derecho de la pista. Este parámetro es considerado en el modelo de cambio de pista. El efecto de este parámetro en la simulación resulta variado, dependiendo de la geometría y tipo de la red (urbana o interurbana), pero siempre afecta el comportamiento vehicular.
- *Distinción de pistas de destino en virajes* (Distinguish destination lanes in turnings): Este parámetro determina la capacidad del usuario para definir las pistas de destino de un movimiento. Cuando este parámetro se selecciona como NO, se asume que todas las pistas de destino de la sección son posibles.

Estos dos últimos parámetros son editados en la ventana de preferencias (*Preferences Editor*). (Ver Figura N°7)

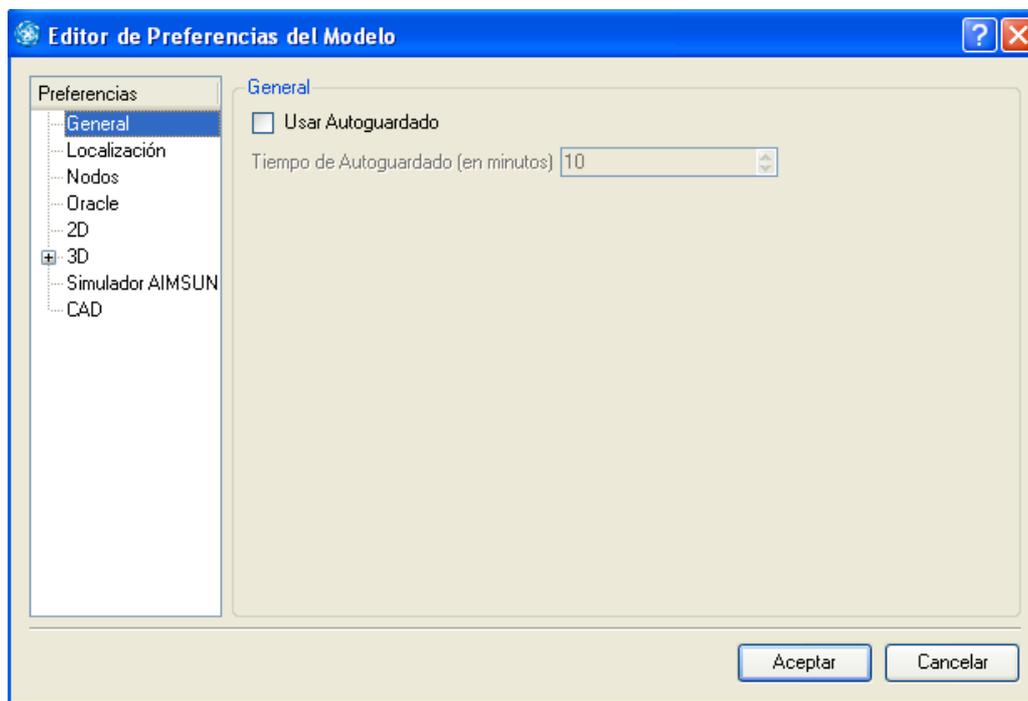


Figura N°7: Visualización Aimsun – Ventana de Preferencias

(Fuente: *Aimsun NG User's Manual Version 5.1 – TSS, 2001*)

b) PARÁMETROS LOCALES

Existen parámetros que a pesar de no estar definidos a nivel de tipo de vehículos, afectan el comportamiento vehicular, pues se relaciona con las diferentes secciones de la red. Esto significa que los parámetros locales son aplicados a los vehículos mientras ellos circulan a lo largo de una sección, pero cambian cuando el vehículo entra en una nueva. Los parámetros son los siguientes:

- *Límite de velocidad de la sección* (Section Speed Limit): Máxima velocidad permitida, en km/hr, para los vehículos viajando a través de una sección. Esta velocidad determina la velocidad de los vehículos cuando ésta es menor a la máxima velocidad deseada. Dependiendo de las características del conductor, siguen o no la velocidad límite recomendada. Por lo tanto existen dos formas de obtener esta velocidad. La primera es usar el valor de la máxima velocidad permitida por ley y la segunda es utilizar la velocidad promedio de la vía como máxima velocidad permitida.
- *Velocidad límite por pista* (Maximum Speed Limit per Lane): Máxima velocidad permitida, en km/hr, para un vehículo viajando por una pista particular. Se pueden definir diferentes velocidades límite para cada pista de la sección.
- *Velocidad de viraje* (Turning Speed): Máxima velocidad, en km/hr, para un vehículo que quiere realizar un viraje. Dependiendo de las características del conductor usarán una velocidad más alta o más baja. El valor es calculado automáticamente por el modelo, dependiendo de la geometría de la intersección, pero en caso de ser necesario también puede modificarse en forma manual. Un vehículo que conduce a través de una sección empezará a disminuir la velocidad mientras se acerca al viraje, para alcanzar su velocidad de giro al final de la sección. La velocidad de giro se mantiene durante el viraje y al entrar a la próxima sección el vehículo comienza a acelerar hasta alcanzar la velocidad deseada para esa sección.

- *Distancia de visibilidad en intersecciones* (Visibility Distance at Junctions): Cuando un vehículo se aproxima a una intersección prioritaria se aplica el modelo de aceptación de gap. Esto se aplica solamente cuando la distancia del vehículo al final de la sección sea menor que la distancia de visibilidad.
- *Velocidad de intersección* (Yellow Box Speed): Un vehículo aproximándose a una intersección *yellow box*, evita entrar en el área cuando el vehículo precedente se está moviendo a una velocidad debajo de este parámetro (en km/hr).
- *Distancia zona 1*: Distancia desde el extremo de la zona 1 hasta donde finaliza la siguiente sección. Es definida como el tiempo (en segundos) necesario para viajar a cierta distancia. Al comienzo de la zona 1, el vehículo intenta cambiarse de pista para girar en la próxima intersección. Esta distancia en tiempo es convertida en longitud utilizando la velocidad límite de la sección y la velocidad a la cual los vehículos desean circular por ella. La razón de utilizar el tiempo es hacer que la distancia sea variable, dependiendo de las características del vehículo.
- *Distancia zona 2*: Distancia desde el extremo de la zona 2 hasta donde finaliza la siguiente sección (próximo punto de viraje). Es definida como el tiempo (en segundos) y su transformación en distancia es igual al caso anterior, utilizando los mismos modelos.

Ambos parámetros, “*Distancia Zona 1*” y “*Distancia Zona 2*”, son utilizados en el modelo de cambio de pista e influyen principalmente en la distancia en que un vehículo quiere cambiar de pista para realizar un giro en la próxima intersección. Ver Figura N°8.

Distancia Zona 1 - Distancia Zona 2 = Largo de la Zona 2

Distancia Zona 2 = Largo de la Zona 3

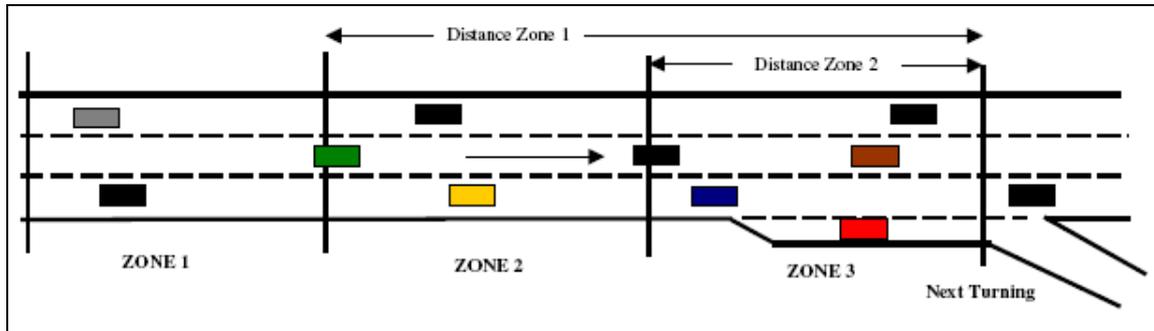


Figura N°8: Zonas de Cambio de Pista

(Fuente: Aimsun NG User's Manual Version 5.1 – TSS, 2001)

- *Distancia de rampas de acceso* (Time Distance On-Ramp): Este parámetro es la distancia en segundos para las pistas laterales consideradas como rampas de acceso. Su transformación en distancia es igual al caso anterior. Es utilizado para el modelo especial de cambio de pista.
- *Pendiente de la sección* (Section Slope): La influencia de la pendiente en el movimiento vehicular es modelada mediante incrementos o reducciones de aceleración en los mismos. La pendiente se entrega en porcentaje o por medio de cotas del terreno.
- *Máximo tiempo de cesión de paso variable* (Maximum Give Way Time Variability): Parámetro local variable que representa el máximo tiempo de cesión de paso. Es utilizado para calibrar parámetros locales en situaciones donde exista ceda el paso, como en intersecciones prioritarias.

Los parámetros locales se muestran en la carpeta principal del editor de sección, en donde sus valores pueden ser editados y modificados. (Ver Figura N°9).

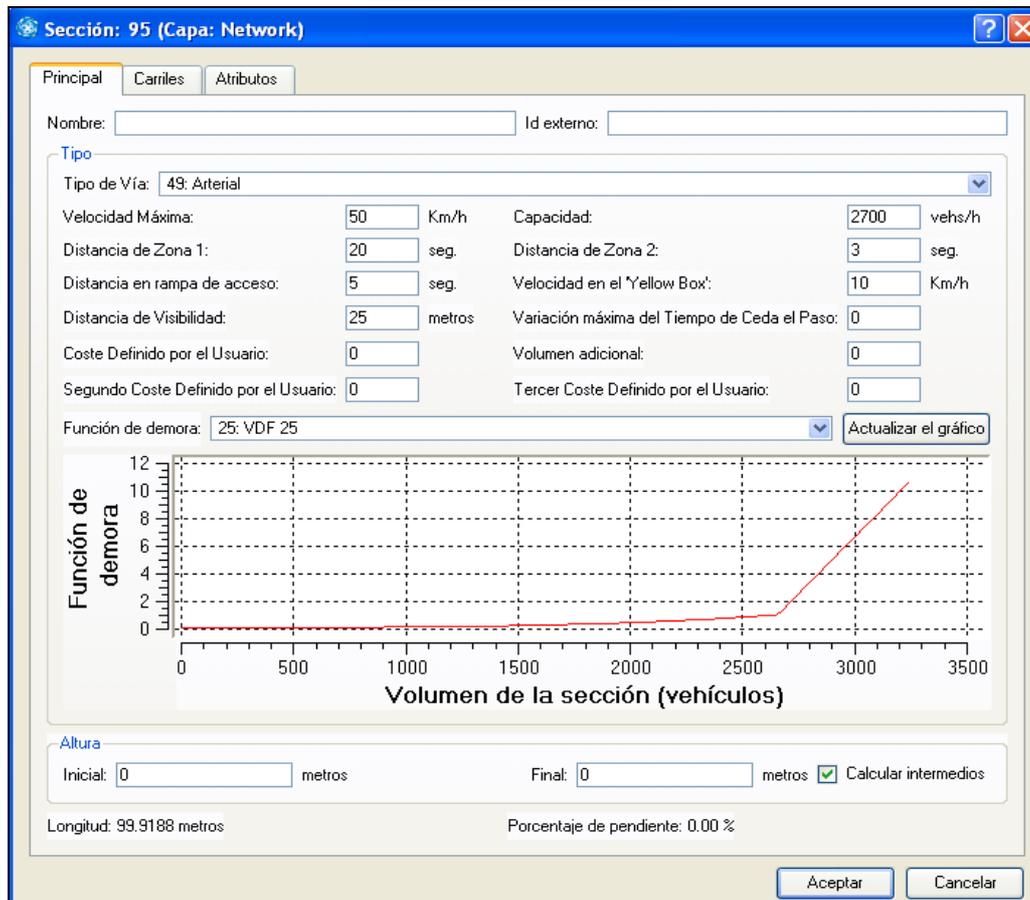


Figura N°9: Visualización Aimsun – Ventana Parámetros Locales

(Fuente: *Aimsun NG User's Manual Version 5.1 – TSS, 2001*)

c) ATRIBUTOS VEHICULARES

Estos parámetros están definidos a nivel del tipo de vehículo, en donde es posible definir el valor medio de los atributos, su desviación estándar y los valores mínimo y máximo. Las características particulares de cada vehículo son tomadas de una distribución normal truncada. Los parámetros que caracterizan a cada vehículo son los siguientes:

- *Nombre* (Name): Para identificar el tipo de vehículo.

- *Largo* (Length): Longitud en metros, por cada tipo de vehículo. Este parámetro es usado para propósitos gráficos y de modelación. Tiene influencia directa en el modelo de tráfico,

pues se considera en el modelo de comportamiento vehicular, afectando levemente la extensión de las colas.

- *Ancho (Width)*: Ancho en metros por cada tipo de vehículo. Este parámetro es utilizado únicamente para fines gráficos y no tiene influencia directa en el modelo de tráfico, además si se considera que una de las características más destacables de AIMSUN es su interfaz gráfica, es conveniente que los anchos se ajusten a la realidad.
- *Máxima velocidad deseada (Maximum Desired Speed)*: Es la máxima velocidad en kilómetros por hora, que le es posible alcanzar a un vehículo, independiente del arco en el que se encuentre. Esta velocidad se define por el tipo de vehículo y no por el tipo de vía. Con este parámetro es posible determinar si un vehículo puede seguir acelerando, esto en conjunto con la máxima velocidad permitida de la sección.
- *Máxima aceleración (Maximum Acceleration)*: Es la máxima aceleración en m/s^2 , que un vehículo puede alcanzar en su proceso de llegar a la máxima velocidad. Es utilizada en el modelo de seguimiento vehicular de Gipps para calcular la velocidad de un vehículo en cada intervalo de simulación y además depende del tiempo de reacción.
- *Desaceleración normal (Normal Deceleration)*: Es la máxima desaceleración en m/s^2 , que un vehículo puede alcanzar bajo condiciones normales como acercarse a una intersección para realizar un giro o detenerse frente a una luz roja. Es utilizada en el modelo de seguimiento vehicular de Gipps.
- *Máxima desaceleración (Maximum Deceleration)*: Es la máxima desaceleración en m/s^2 , que un vehículo puede alcanzar bajo circunstancias especiales, como casos de emergencia.
- *Aceptación de velocidad (Speed Acceptance)*: Este parámetro ($\theta \geq 0$) puede ser interpretado como “la obediencia” de los conductores al límite de velocidad o como el grado de aceptación de los límites de velocidad. Si es mayor que uno significa que el

vehículo tomará como velocidad máxima para una sección, un valor mayor al límite de velocidad. Si es menor que uno, significa que el vehículo tomará un valor menor al límite de velocidad.

- *Mínima distancia entre vehículos* (Minimum Distance Between Vehicles): Es la distancia en metros que guarda un vehículo con el que lo precede, al estar ambos detenidos producto de una luz roja.
- *Máximo tiempo de cesión de paso* (Maximum Give Way Time): Cesión de paso es el periodo en que un vehículo está esperando cruzar o incorporarse a una intersección prioritaria. Cuando un vehículo supera el tiempo de cesión de paso, se vuelve más agresivo y reduce los márgenes de aceptación. Este periodo también es utilizado en el modelo de cambio de pista.
- *Vehículos guiados* (Guided Vehicles): Es el porcentaje de vehículos que son guiados a través de la red. Esto sólo sucede cuando la simulación se realiza con matrices O-D y elección dinámica de rutas, indicando cuantos vehículos son los que siguen a otros en las elecciones de ellas.
- *Vehículos Equipados* (Equipped Vehicles): Es el porcentaje de vehículos equipados, que pueden ser identificados mediante detectores, estableciendo el tipo de vehículo, si se trata de transporte público o privado y la identificación del mismo.
- *Aceptación de ser guiados* (Guidance Acceptance): Este parámetro representa la probabilidad que un vehículo siga una recomendación. ($0 \leq \lambda \leq 1$), entrega el nivel de aceptación del conductor a las indicaciones para ser guiado.
- *Tolerancia de Cruce* (Cruising Tolerance): Este parámetro es utilizado en los modelos de consumo de combustible y emisión de contaminantes. Los vehículos que circulan a una

aceleración o deceleración menor que este coeficiente son considerados circulando a velocidad constante.

- *PCUs*: Este parámetro entrega la unidad del automóvil de pasajeros para este tipo de vehículo. Normalmente, el auto privado toma el valor de la unidad y el resto de los vehículos son convertidos mediante factores dependiendo de las circunstancias.

- *Consumo de combustible* (Fuel Consumption Parameters): Para cada tipo de vehículo, los siguientes seis parámetros especifican la tasa de consumo de combustibles:

1. *Tasa de consumo de combustible de vehículo que circula a velocidad constante, ml/s.*
2. *Tasa de consumo de combustible para vehículo que acelera, ml/s.*
3. *Tasa de consumo de combustible, en litros cada 100 Km, para vehículo que viaja a velocidad constante de 90 Km/hr.*
4. *Tasa de consumo de combustible, en litros cada 100 Km, para vehículo que viaja a velocidad constante de 120 Km/hr.*
5. *Velocidad a la cual la tasa de consumo de combustible, en ml/s, está en su mínimo para un vehículo que viaja a velocidad constante.*
6. *Tasa de consumo de combustible para vehículo que desacelera, ml/s.*

- *Parámetros de emisión de contaminantes* (Pollution Emission Parameters): Para cada tipo de vehículo puede ser definido un grupo de contaminantes (CO, NOx, HC). Para cada contaminante se requieren los siguientes parámetros:

1. *Tasa de emisión para vehículo que acelera, g/s.*
2. *Tasa de emisión para vehículo que desacelera, g/s.*
3. *Tasa de emisión para vehículo que circula a velocidad constante, g/s.*

Los atributos vehiculares se muestran en la carpeta general del tipo de vehículo, en donde sus valores pueden ser editados y modificados. (Ver Figura N°10).

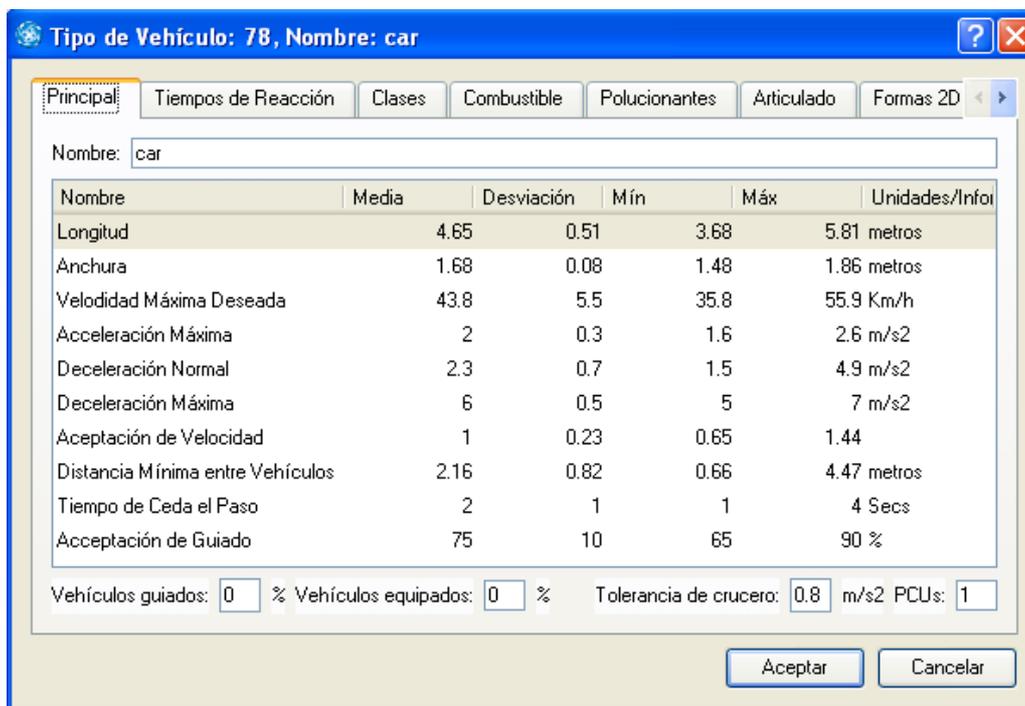


Figura N°10: Visualización Aimsun – Ventana Parámetros Vehiculares

(Fuente: Aimsun NG User's Manual Version 5.1 – TSS, 2001)

2.3.3.2 MODELOS UTILIZADOS POR AIMSUN

a) TRANSPORTE PRIVADO

Durante su viaje a lo largo de la red, la información de los vehículos se actualiza de acuerdo a ciertos modelos de comportamiento que rigen su movimiento. Éstos son:

- Modelo de seguimiento vehicular
- Modelo de cambio de pista

En cada ciclo de la simulación, la velocidad y posición de cada vehículo en el sistema es actualizado de acuerdo al siguiente algoritmo:

If (si es necesario un cambio de pista) then

Aplicar Modelo de cambio de pista

Endif

If (el vehículo no tiene cambio de pista) then

Aplicar Modelo de Seguimiento vehicular

Endif

Pero además de los modelos presentes en AIMSUN, existen submodelos que tienen influencia sobre los modelos mencionados anteriormente; éstos son:

Modelo de seguimiento vehicular (Car - Following Model)

Submodelos:

- Velocidad de un vehículo en una sección (Speed for a vehicle at a section)
- Modelo de seguimiento vehicular - dos pistas (2-Lanes Car-Following Model)
- Modelación de la influencia de la pendiente de una sección (Modelling the influence of the Section Slope)

Modelo de cambio de pista (Lane Changing Model)

Submodelos:

- Maniobra de adelantamiento (Overtaking Manoeuvre)
- Modelo de rampas de acceso (On - Ramp Model)
- Modelo de rampas de salida (Off - Ramp Model)

- Modelo de vista adelante (Look Ahead – Model)
- Modelo de aceptación de Intervalo (Gap Acceptance model)

Estos submodelos son igualmente necesarios para actualizar la red. Sin embargo no todos poseen influencia en el tráfico en estudio. Por ejemplo, el modelo de rampas no tiene incidencia en los modelos de flujo mixto y peatonal ya que son sólo para autopistas. Los modelos de aceptación de intervalo y de vista adelante, adquieren importancia en intersecciones de prioridad y rampas de acceso. Por otro lado se debe tener presente que estos modelos y submodelos utilizados por Aimsun en la simulación de vehículos privados, también corresponde a la simulación de peatones, pues éstos son considerados por el software como un vehículo más dentro de la modelación.

a.1) Modelo de Seguimiento Vehicular (Car - Following Model)

El modelo de seguimiento vehicular implementado en AIMSUN, esta basado en el modelo de Gipps (1986, citado por *Aimsun 5.0 Microsimulator User's Manual, 2005*) representado por la ecuación (2.6). Esta ecuación puede ser considerada como un desarrollo del modelo empírico en que los parámetros son determinados por la influencia de las condiciones locales, es decir del “tipo de conductor”, la geometría de la sección, la influencia de otros vehículos, etc.

El modelo está compuesto por dos componentes:

- Aceleración
- Desaceleración

La aceleración representa la intención del conductor de alcanzar cierta velocidad máxima deseada (2.6) y la desaceleración es la limitación impuesta por el vehículo precedente cuando el conductor quiere alcanzar esa velocidad máxima deseada (2.7). Este modelo establece que la máxima velocidad deseada a la que un vehículo n puede acelerar durante un intervalo de tiempo $(n, t + T)$ está dada por:

$$Va(n, t + T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (2.6)$$

Donde:

$V a (n, t + T)$ = velocidad del vehículo n en el tiempo $t + T$.

$V (n, t)$ = velocidad del vehículo n en el tiempo t .

$a(n)$ = máxima aceleración para el vehículo n .

T = tiempo de reacción, equivale al intervalo de simulación.

$V^*(n)$ = velocidad deseada del vehículo n para una sección determinada, corresponde al mínimo valor entre la velocidad máxima deseada y la velocidad permitida de la sección.

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

$$Vb(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t) * T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right]} \quad (2.7)$$

Donde:

$V b (n, t + T)$ = velocidad del vehículo n en el tiempo $t + T$.

$d(n)$ = máxima desaceleración deseada por el vehículo n , su valor es menor a cero.

$x(n, t)$ = posición del vehículo n en el tiempo t .

$x(n-1, t)$ = posición del vehículo precedente en el tiempo t .

$s(n-1)$ = longitud del vehículo precedente $n-1$.

$d'(n-1)$ = estimación de la desaceleración deseada del vehículo $n-1$.

$V(n-1, t)$ = velocidad del vehículo precedente $n-1$, en el tiempo t .

T y $V (n, t)$ = tiempo de reacción y velocidad del vehículo n en el tiempo t respectivamente.

En cualquier caso, la velocidad definitiva para un vehículo n durante un intervalo de tiempo $(t, t + T)$ es el mínimo valor entre las dos velocidades definidas anteriormente:

$$V(n, t + T) = \min\{Va(n, t + T), Vb(n, t + T)\} \quad (2.8)$$

Luego la posición del vehículo n es actualizada considerando la velocidad anterior mediante la siguiente ecuación de movimiento:

$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T)T \quad (2.9)$$

a.2) Modelo de Cambio de Pista (Lane Changing Model)

Este modelo puede ser considerado como un desarrollo del modelo de Gipps (1986, citada por Ortiz, 2006) en donde el cambio de pista es modelado como un proceso de decisión. Se analiza la necesidad, el deseo y la factibilidad de realizar una maniobra de cambio de pista en la ruta. Esta necesidad depende de una serie de factores como la distancia al siguiente viraje y las condiciones de tráfico existentes, las cuales son medidas como la velocidad y los largos de cola. El modelo de cambio de pista utiliza dos parámetros mencionados y descritos en la sección *parámetros globales de cambio de pista*, el porcentaje de adelantamiento (*percent overtake*) y el porcentaje de recuperación (*percent recover*). Estos parámetros tienen relación con la probabilidad de que un vehículo cambie de pista.

Existen otros parámetros que están relacionados con los cambios de pista, pero influyen solamente en el viraje de los vehículos cuando llegan a una intersección, estos parámetros son los descritos en la sección 2.3.3.1 b) *Parámetros Locales* y corresponden a “*Distancia Zona 1*” y “*Distancia Zona 2*”. En el fondo estos parámetros están destinados a resolver la representación de la forma en que los vehículos giran en una intersección, y deben ser calibrados para cada sección dependiendo de la forma de viraje de cada vehículo.

b) TRANSPORTE PÚBLICO

En los vehículos de transporte público, el comportamiento es el mismo que para los vehículos privados de acuerdo a los modelos descritos anteriormente. Pero a diferencia del transporte privado, los buses siguen rutas fijas, ajustándose a tablas de tiempo o frecuencias, y se detienen en paraderos establecidos por el usuario, es decir utilizan además un modelo de parada.

Los modelos de transporte público funcionan sólo cuando se carga un plan de transporte público, el que consiste en establecer rutas, paradas, vías exclusivas para buses, tablas de tiempo por tipo de línea y tipo de vehículo. Además estos modelos se encargan de que los vehículos de transporte público se cambien de pista para acceder a un paradero de buses típico o tipo bahía y para que posteriormente se incorporen al tráfico esperando un intervalo adecuado.

b.1) Modelo de Parada (Stop Model)

Los vehículos de transporte público se detienen en puntos fijos a lo largo de la ruta para recoger y dejar pasajeros. La cantidad de tiempo gastada en una parada es determinada por el parámetro tiempo de parada. Si la parada está llena cuando un nuevo autobús llega, no hay ningún espacio para que éste pueda ingresar a la zona, por lo que el autobús esperará hasta que exista espacio disponible. Un autobús gastará una cierta cantidad de tiempo detenido en la parada y luego dependiendo de la línea a la que pertenecen continúan su ruta hasta la próxima parada.

Existen dos tipos de parada:

- Parada de buses tipo bahía.
- Parada normal de buses.

En este trabajo, por las zonas estudiadas, solo se utilizan paradas normales de buses.

CAPÍTULO III

PROCESO DE CALIBRACIÓN

Para establecer una metodología adecuada, se debió recurrir a calibraciones realizadas anteriormente en el simulador AIMSUN NG, aunque éstas se encuentran centradas en calibraciones de vehículos, sin considerar los efectos de peatones en la red.

3.1 PROCEDIMIENTO UTILIZADO

Estudios y calibraciones de modelos realizados anteriormente, tanto en Concepción como en otras ciudades del mundo, permiten establecer procedimientos de calibración adecuados para este proyecto de título. Como procedimiento general, se determina realizar una primera etapa de Preparación y otra de Calibración.

Además resulta importante destacar que el procedimiento utilizado, a diferencia de otros estudios, considera solo parámetros medidos en terreno, sin realizar ajustes posteriores en los mismos.

3.1.2 ETAPA DE PREPARACIÓN

Tiene como función preparar de buena forma la calibración, a través de una caracterización de flujos, velocidades y otras mediciones, en la intersección escogida. Esta etapa se realizó en una época en que las mediciones no representan de manera normal los flujos (Diciembre 2006), por lo tanto estos valores se consideran referenciales. En tanto las mediciones de velocidades, tiempos de reacción, entre otros, son una primera estimación, la que será revisada en la etapa de calibración. La etapa de Preparación consta de los siguientes pasos:

- **Catastro:** Establecer nivel de detalle y variables a considerar según los objetivos del proyecto; se observa en terreno qué variables son importantes y de qué modo afectan el comportamiento peatonal y vehicular.
- **Elección del Indicador de Desempeño:** Es la variable elegida para calibrar el comportamiento de la red, especialmente el flujo peatonal y su interacción con vehículos privados y de locomoción colectiva. Se determina durante el catastro en terreno o por el proceso de recolección de datos y corresponde a alguna de las salidas del modelo.

- **Análisis de sensibilidad del indicador de desempeño:** Se realiza simulando diferentes escenarios con el fin de detectar el grupo de parámetros que influyen directamente y en forma significativa los resultados de la simulación. Para esto se realizan varias simulaciones ficticias, modificando de un parámetro a la vez mientras el resto de ellos se mantiene constante (*Ceteris Paribus*).
- **Toma de Datos:** Como una buena forma de preparar la calibración, se recogen datos de flujos, velocidades, tiempos de reacción, entre otros determinados en el punto anterior. Esos datos servirán para preparar modelos de simulación de la intersección para la etapa de calibración.

3.1.3 ETAPA DE CALIBRACIÓN

La etapa de calibración tiene como propósito encontrar el valor de los parámetros de simulación relevantes, de manera de representar la realidad, minimizando las diferencias entre valores observados en terreno y simulados. Además, encontrar el modelo de simulación adecuado para la representación del cruce peatonal en intersecciones y su interacción con los flujos vehiculares.

El proceso de calibración (como también el de validación) se debe realizar para cada proyecto en particular, pues el valor de los parámetros depende de variables como zona en estudio, tipo de flujo y periodo del día.

La etapa de calibración consta de los siguientes pasos:

- **Obtención de datos empíricos:** Constituye el paso fundamental de la etapa de calibración, modificando el valor de los parámetros seleccionados en el Análisis de Sensibilidad con el objetivo de replicar el indicador de desempeño real. El valor de estos parámetros se obtiene en terreno y se deben tomar en el horario que se estudia.

- Elaboración de un modelo de simulación: debe replicar el comportamiento de la red escogida. Por lo tanto, se modifican los parámetros por defecto por los observados y se determina cómo modelar el cruce peatonal en las intersecciones y su interacción con los vehículos.
- Comparación entre valores observados y simulados: Para determinar la bondad de ajuste de la simulación. En este caso es necesario contar con una herramienta estadística adecuada, además de un criterio prudente y aceptable por parte del modelador.

CAPÍTULO IV

ETAPA DE PREPARACIÓN

En este capítulo se realiza la descripción, elección y análisis de sensibilidad del indicador de desempeño, con el propósito de saber en una primera instancia cuales son los parámetros que pueden afectar el modelo y que, por lo tanto, deben ser calibrados.

4.1 INDICADOR DE DESEMPEÑO

Los indicadores de desempeño existentes, candidatos a ser escogidos para el análisis de sensibilidad, corresponden a las salidas del modelo que tienen que ver con el tipo de flujo en estudio: peatonal, mixto e interrumpido. Éstos son:

- Capacidad de la intersección.
- Longitud de colas.
- Flujo de descarga de un semáforo.

Es importante mencionar que los indicadores de desempeño están correlacionados, por lo que la disminución del error tras la calibración utilizando uno de ellos, implica una mejora en el resto de los indicadores de desempeño.

Para el caso en estudio y debido a la simplicidad de las mediciones en terreno, el indicador de desempeño escogido corresponde a la longitud de cola vehicular. En primer lugar, este parámetro permite cuantificar la obstaculización de giros, a través de las colas producidas en las pistas de viraje. Y por otro lado, las longitudes de cola de todas las pistas permiten determinar el ajuste de los parámetros utilizados en el modelo.

Además se elige un parámetro vehicular pues resulta más simple su medición en terreno, como también la obtención de resultados en el software.

4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Todos los parámetros, descritos en el Capítulo II, afectan en cierto modo las salidas de las simulaciones. Sin embargo dependiendo del tipo de flujo algunos adoptan mayor importancia sobre otros, los que pueden considerarse despreciables.

Como ya se ha mencionado, es necesario sensibilizar el indicador de desempeño a utilizar, con el propósito de encontrar los parámetros relevantes a ser calibrados en este proyecto de título y así reflejar los fenómenos que caracterizan el comportamiento de una intersección.

4.2.1 LONGITUD DE COLA

Al utilizarse en este estudio la longitud de cola como el índice de desempeño, se deben estimar cuales son los parámetros, peatonales y vehiculares, que afectan tal índice.

Para esto se utiliza un modelo de simulación en que existe sólo una pista vehicular y una pista para los peatones. Así se modifican los valores de los parámetros involucrados y se analizan los resultados. De esta forma se determina cuáles son los parámetros a calibrar y cuáles son despreciables para los objetivos del estudio.

Los parámetros sensibilizados son los siguientes:

Para vehículos:

- Velocidad permitida
- Tiempo de Reacción en Reposo
- Tiempo de Reacción
- Velocidad Deseada
- Aceptación del Límite de Velocidad

Para peatones:

- Aceleración
- Deceleración
- Distancia Mínima entre Peatones
- Tiempo de Reacción
- Velocidad

4.2.2 PARÁMETROS SENSIBILIZADOS DE VEHÍCULOS

4.2.2.1 VELOCIDAD PERMITIDA

La velocidad permitida es un actor relevante en la calibración de este estudio. Como se observa en la Figura N°11, para velocidades permitidas bajas, menores a 60 km/h, las longitudes de cola tienden a ascender. Justamente ese es el rango de velocidades que se da en la zona a estudiar, por lo que calibrar este parámetro resulta relevante.

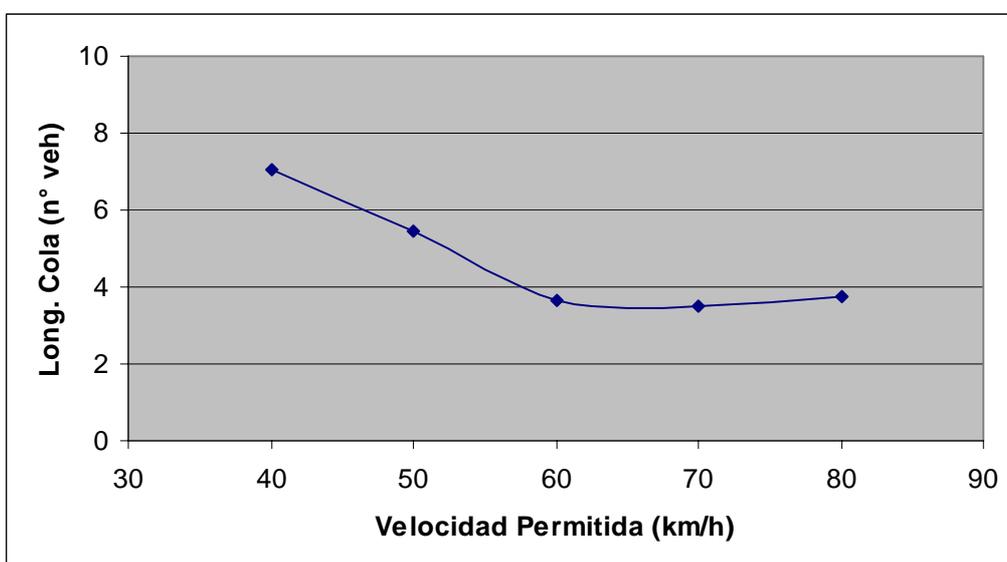


Figura N°11: Influencia de Velocidad Permitida de Vehículos en la Longitud de Cola

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.2.2 TIEMPO DE REACCION EN REPOSO

En la Figura N°12 se puede observar claramente la importancia del tiempo de reacción en reposo para el índice de desempeño, especialmente para tiempos mayores a un segundo. Por ello se debe tomar en cuenta en el estudio, calibrándolo según los datos observados en terreno.

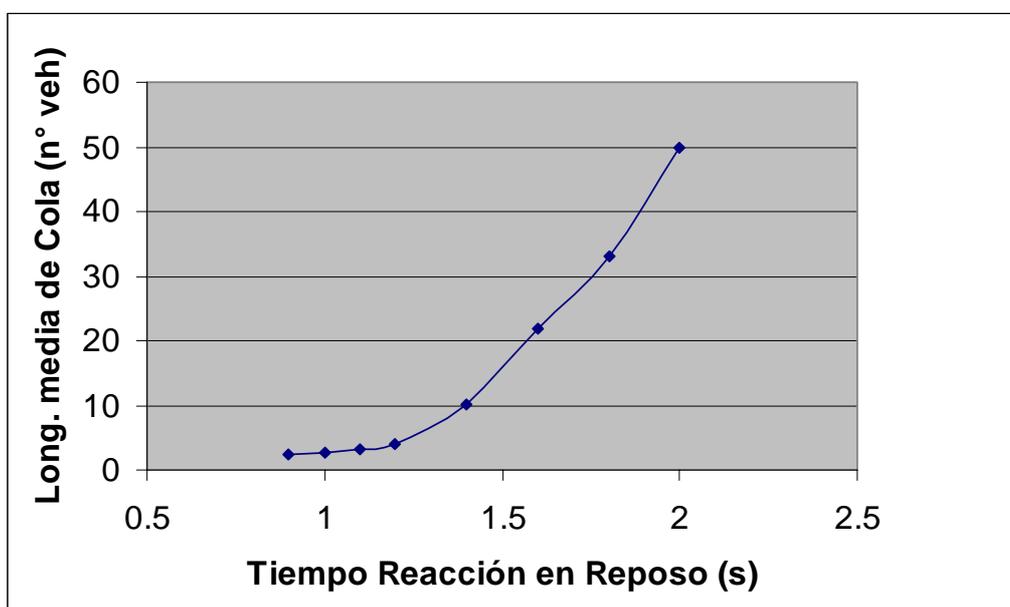


Figura N°12: Influencia del Tiempo de Reacción en Reposo de Vehículos en la Longitud de Cola.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.2.3 TIEMPO DE REACCIÓN

En la Figura N°13 se observa el comportamiento de la longitud de cola al cambio en el valor del tiempo de reacción, para diferentes tiempos de reacción en reposo. El parámetro es importante, especialmente para valores mayores a 1.3 segundos.

R. González, en 2005 determinó el Tiempo de Reacción para la ciudad de Concepción en 0.8 segundos, este valor es el utilizado para los modelos de simulación de este trabajo.

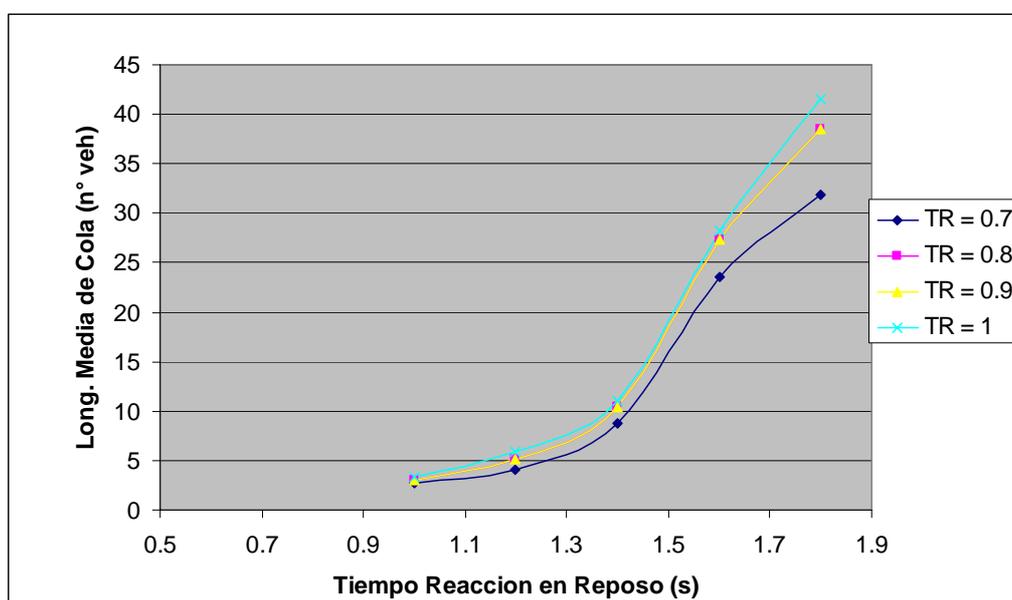


Figura N°13: Influencia del Tiempo de Reacción de Vehículos en la Longitud de Cola.

(Fuente: Elaboración propia)

4.2.2.4 VELOCIDAD DESEADA

La Figura N°14 muestra que la Velocidad Deseada no es un parámetro relevante en la longitud de cola, por lo que no es necesaria su calibración. Dejando en la modelación el parámetro que entrega por defecto AIMSUN para cada tipo de vehículo.

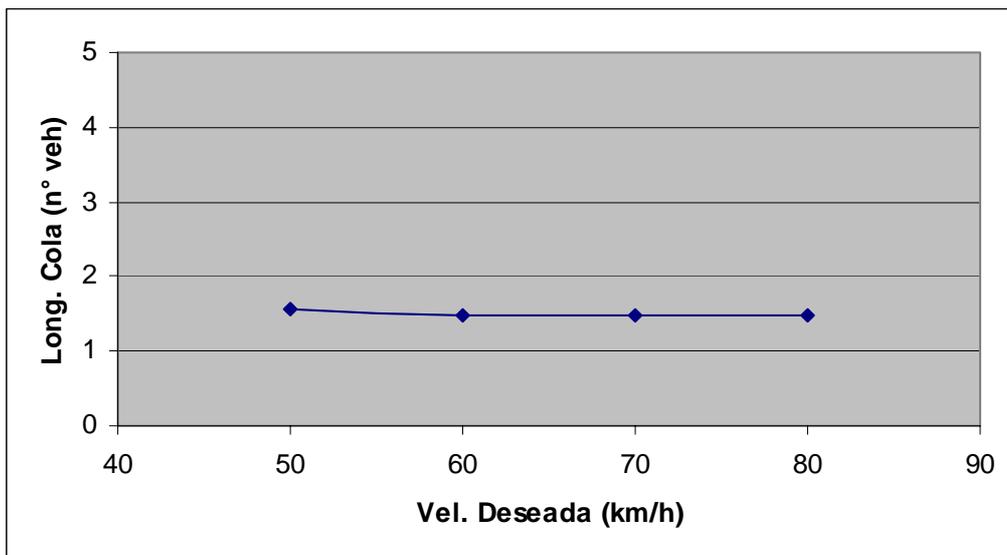


Figura N°14: Influencia de la Velocidad Deseada de Vehículos en la Longitud de Cola.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.2.5 ACEPTACIÓN DEL LÍMITE DE VELOCIDAD

En la Figura N°15 se observa que el valor de Aceptación de Límite de Velocidad influye en la longitud de la cola, aumentándolas para valores menores a 1 y disminuyéndolas para valores mayores a 1. Aunque la sensibilidad de la longitud de cola a este parámetro es menor, se calibrará debido a que se encuentra muy relacionado a la Velocidad Permitida, por lo que carece de sentido calibrar este último parámetro sin hacerlo también con la Aceptación de Velocidad.

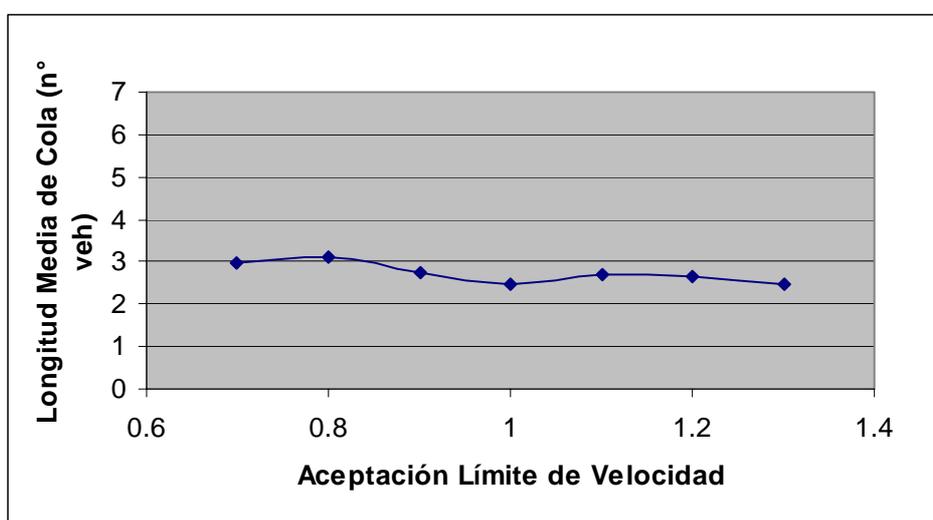


Figura N°15: Influencia de Aceptación de Velocidad Vehicular en Longitud de Cola.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.3 PARÁMETROS SENSIBILIZADOS DE PEATONES

4.2.3.1 ACELERACIÓN

La Figura N°16 muestra la influencia de la aceleración de los peatones en la longitud de cola. Se observa que este parámetro no es relevante en el índice de desempeño, especialmente debido a que los valores de aceleración de los peatones son muy bajos y generalmente de poca duración. Por lo tanto, este parámetro no es relevante en la calibración de este trabajo y se utilizará el valor que AIMSUN entrega por defecto para peatones, esto es 0.5 m/s^2 como media y 0.1 m/s^2 de desviación estándar.

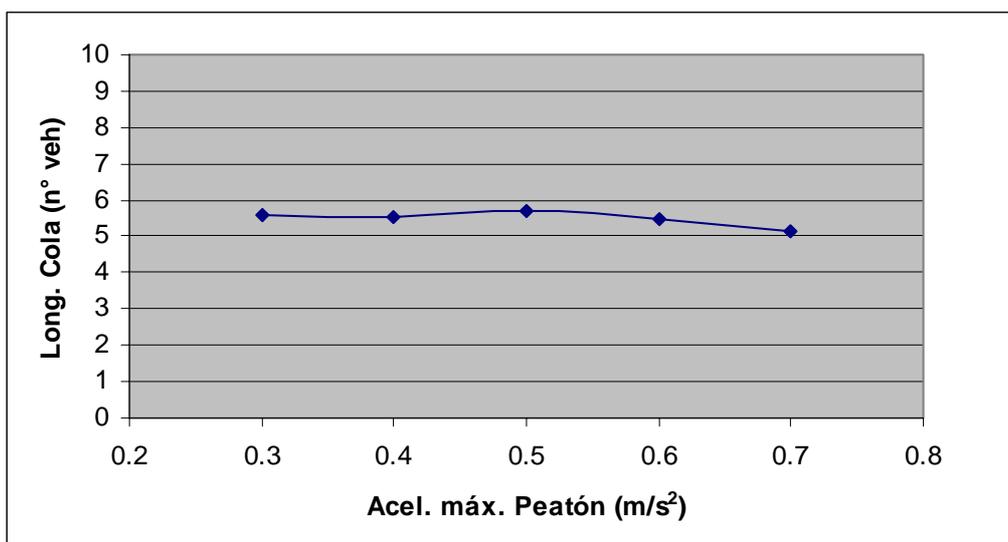


Figura N°16: Influencia de Aceleración de Peatones en Longitud de Cola Vehicular.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.3.2 DESACELERACIÓN

La Figura N°17 muestra la influencia de la desaceleración de los peatones en la longitud de cola. Se observa que no es relevante pues tal como la aceleración peatonal, este parámetro presenta valores muy bajos, por lo tanto no será objeto de la calibración. Se utilizará el valor que AIMSUN entrega por defecto para peatones. Esto es, 1.2 m/s^2 como media y 0.2 m/s^2 de desviación estándar.

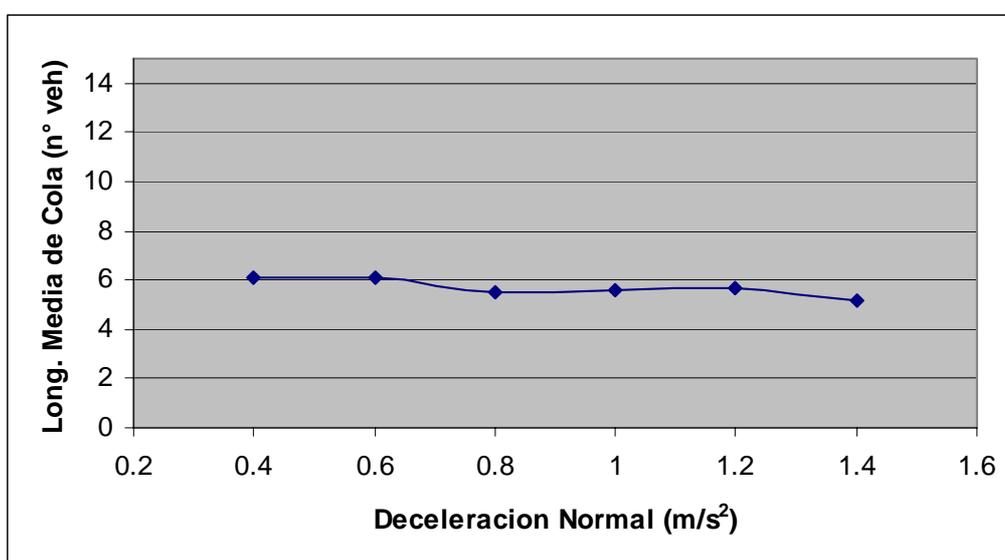


Figura N°17: Influencia de Deceleración Normal de Peatones en Longitud de Cola Vehicular.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.3.3 DISTANCIA MÍNIMA ENTRE PEATONES

La distancia mínima entre peatones para este estudio tampoco representa un parámetro relevante, por lo que no será tomado en cuenta en la calibración. El comportamiento de este parámetro en el modelo se observa en la Figura N°18. Por lo tanto, en los modelos de simulación se utilizan los valores que AIMSUN entrega por defecto, 0.2 m como media y 0.15 m de desviación estándar.

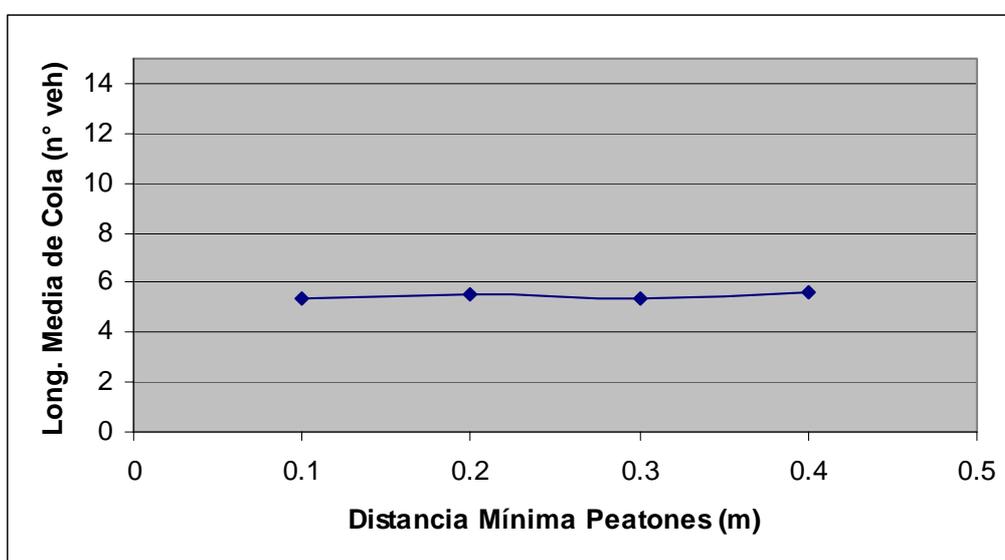


Figura N°18: Influencia de Distancia Mínima entre Peatones en Longitud de Cola Vehicular.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.3.4 TIEMPO DE REACCIÓN EN REPOSO

La Figura N°19 muestra que el Tiempo de Reacción en Reposo de los peatones no es un parámetro relevante en la longitud de cola, por lo que no es necesaria su calibración. Pero se considera que para caracterizar de buena manera a los peatones, este parámetro sí debe ser calibrado, pues es un valor representativo y que puede ser relevante en otros estudios que aborden el comportamiento peatonal.

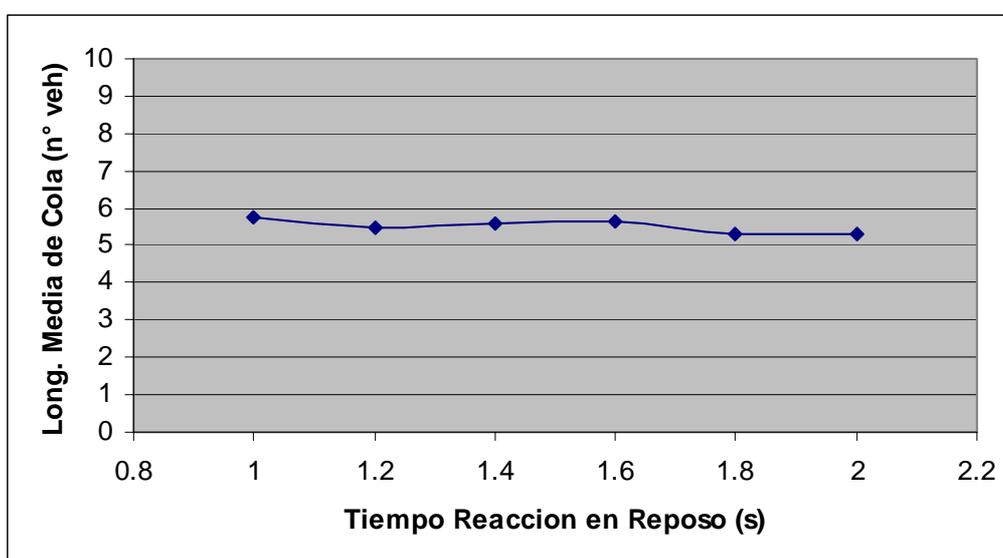


Figura N°19: Influencia del Tiempo de Reacción en Reposo de Peatones en la Longitud de Cola Vehicular.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.3.5 VELOCIDAD DE PEATÓN

La velocidad de los peatones influye en la longitud de cola de los vehículos, pues obstaculizan su paso disminuyendo las velocidades de circulación, tal como muestra la Figura N°20. Además es un parámetro muy característico de los flujos peatonales. Por lo tanto, se decide calibrarlo para este trabajo.

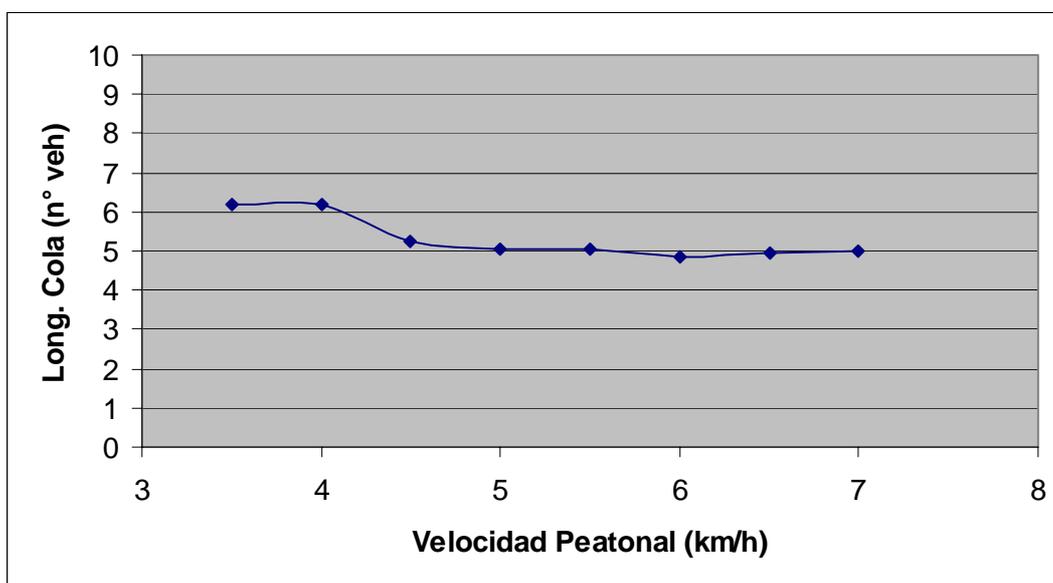


Figura N°20: Influencia de la Velocidad Peatonal en la Longitud de Copla Vehicular.

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.4 PARÁMETROS SELECCIONADOS

Los parámetros seleccionados para ser calibrados, se medirán en terreno para incorporarlos directamente en los modelos que se estudiarán, a excepción del Tiempo de Reacción de vehículos, que se tomará del trabajo de González (2005) y que también se considera adecuado para peatones. Los demás parámetros mostrados en el Capítulo II serán estimados a partir de recomendaciones de otros estudios, manuales de diseño o documentos pertinentes. También se utilizan los valores por defecto que entrega AIMSUN, cuando se estiman adecuados para este trabajo.

En resumen esta calibración considerará:

- Los **parámetros vehiculares** de Velocidad Permitida, Aceptación del Límite de Velocidad y Tiempo de Reacción en Reposo.
- Los **parámetros peatonales** de Velocidad y Tiempo de Reacción en Reposo.
- El desarrollo de una **estructura de modelación** que represente de la mejor manera posible el comportamiento peatonal al interactuar con otros peatones, vehículos e intersecciones semaforizadas.

4.3 ELECCIÓN DE RED DE CALIBRACIÓN

En esta etapa de preparación se debe seleccionar la red de calibración atendiendo a varios aspectos, que se detallan a continuación, a fin de facilitar la labor de replicar la realidad en un modelo de simulación.

4.3.1 REQUERIMIENTOS DE VÍA

- *Vías en buen estado*: Para poder representar el comportamiento lo más exacto posible de los conductores en la vía, es necesario que la condición en la que ésta se encuentre sea óptima, de modo que las mediciones no se vean alteradas. Para el caso en estudio la

condición óptima está representada por un pavimento en buen estado, seco, sin problemas de diseño y nula o despreciable pendiente longitudinal.

4.3.2 REQUERIMIENTOS SEGÚN TIPO DE FLUJO

- *Intersecciones Semaforizadas*: Para representar la condición de flujo interrumpido es necesario que la intersección sea semaforizada.
- *Características del tráfico*: Se debe escoger una vía que sea de dos o tres pistas, con una proporción de buses mayor al 10% (para representar la condición de flujo mixto) y donde el flujo peatonal sea importante. Se debe dar la situación de viraje de vehículos para analizar la interacción de este movimiento con el cruce peatonal.

4.3.3 ELECCIÓN DE RED

Con el objeto de analizar en profundidad el comportamiento de peatones y conductores se elige una red que reúne todos los requerimientos expuestos anteriormente y que además ya ha sido estudiada en Concepción, aunque para otras condiciones. La red elegida es **Av. O'Higgins esquina Rengo**, la que además cuenta con el respaldo tecnológico de las cámaras del Centro de Gestión y Control de Tránsito de Concepción, que permiten grabar la intersección en cualquier momento, con gran amplitud en ajustes de distancias y enfoques de las cámaras.

En la Figura N°21 se observa la intersección escogida para el estudio.



Figura N°21: Fotografía Aérea Intersección de Calibración.

(Fuente: Google Earth)

Las principales características de la intersección se indican en la Tabla N° 1.

Características	O'Higgins	Rengo
Número de Pistas de Circulación	3	3
Ancho de Pistas (m)	3.3	2.6
Pista de Estacionamiento	Si	No
Circulación Buses Locomoción Colectiva	Si	Si
Circulación Taxis Colectivos	No	Si
Pistas Preferente Transporte Público	1	0

Tabla N°1: Características Intersección Rengo – O'Higgins

(Fuente: Elaboración Propia)

CAPÍTULO V

EXPERIMENTO DE CALIBRACIÓN

El experimento de calibración, en AIMSUN NG, debe replicar el sistema en estudio de la mejor manera posible. Para ello, se adaptan los valores de los parámetros del simulador, de manera que el comportamiento simulado replique lo observado. Una serie de parámetros son tomados de estudios anteriores realizados en Concepción. Mientras que otros, definidos en la etapa de sensibilización, son determinados a través de las mediciones en terreno. Por último, en este capítulo, se estudian distintas estrategias de simulación peatonal, de las cuales se obtiene la manera definitiva en que se incorporan los peatones en los modelos de simulación para redes de flujo mixto interrumpido.

En esta sección se describen los criterios y metodología seguida para la toma de datos, con el fin de presentar un buen diseño del experimento de calibración. La toma de datos se realizó, mediante video grabaciones realizadas por cámaras del Centro de Gestión y Control de Tránsito de Concepción. Estos recursos fueron puestos a disposición por SECTRA área sur, lo que facilita bastante el proceso de medición. También se utilizó la recolección de datos a través de personal capacitado apostado en las intersecciones correspondientes.

5.1 TOMA DE DATOS Y CALIBRACIÓN

Para la toma de datos se contó con información entregada por el Centro de Control de Tránsito de Concepción, correspondiente a los planes de Control y a grabaciones de flujos vehiculares y peatonales en los horarios punta. Esta información es necesaria para identificar el periodo y las condiciones de tránsito en que se realizarán las mediciones.

5.1.2 PERIODO DE MEDICIÓN Y NIVEL DE AGREGACIÓN

El periodo de medición seleccionado corresponde al que presenta un alto flujo vehicular y peatonal. Además debe presentar longitudes de cola apreciables y un buen nivel de virajes por parte de los conductores. Por lo tanto se ha escogido la hora punta mediodía para el análisis.

La agregación temporal de los datos de entrada al modelo será de 15 minutos, para representar lo que sucede fielmente en la realidad, un tiempo mayor a éste podría esconder datos relevantes y uno menor podría presentar demasiada variabilidad en los resultados.

El análisis se realiza a nivel agregado (periodo total de 1 hora) y a nivel desagregado (cuatro periodos de 15 minutos) por lo que el tiempo total de medición deberá ser de una hora. Las mediciones comienzan a las 12:30 AM.

5.1.3 MEDICIÓN DE LA INFORMACIÓN

5.1.3.1 DATOS VEHICULARES

Estos datos se obtienen observando y midiendo directamente en terreno el comportamiento tanto de conductores como de peatones.

Existen datos vehiculares que ya han sido calibrados para la zona en estudio. Algunos de ellos serán utilizados en esta modelación, pues no existen diferencias significativas entre sus valores para la hora punta mañana (Ortiz, 2006) con los que se dan en el resto del día.

Los parámetros vehiculares tomados de aquel estudio son los siguientes:

- Aceptación del Límite de Velocidad
- Mínima Distancia entre Vehículos
- Largo de Vehículos
- Máxima Aceleración Deseada
- Desaceleración Normal

En tanto que los siguientes parámetros se han tomado directamente en terreno, debido a que el análisis de sensibilidad indica la importancia de su estimación precisa:

- Tiempo de Reacción en Reposo
- Velocidad Máxima
- Aceptación de Velocidad

i) PARÁMETROS TOMADOS DE OTROS ESTUDIOS

i.1) MÍNIMA DISTANCIA ENTRE VEHÍCULOS

En la Tabla N°2 se muestran las variables estadísticas asociadas al promedio de Mínima Distancia entre Vehículos, para autos y buses.

	Mínima Distancia entre Vehículos (m)	
	Autos	Buses
Media	2.16	1.98
Desviación Estándar	0.82	0.86
Mínimo	0.66	0.4
Máximo	4.47	3.94
Error	0.11	0.12

Tabla N°2: Mínima Distancia entre Vehículos.

(Fuente: Ortiz, 2006)

i.2) LARGO DE VEHÍCULOS

En la Tabla N°3 se muestran las variables estadísticas asociadas a las dimensiones de autos y buses para la ciudad de Concepción.

	Dimensión de Autos		Dimensión de Buses	
	Largo (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Ancho (m)
Media	4.65	1.68	8.2	2.3
Desviación Estándar	0.51	0.08	1.3	0.12
Mínimo	3.68	1.48	7	2
Máximo	5.81	1.86	10	2.6

Tabla N°3: Dimensiones de Autos y Buses en la Ciudad de Concepción.

(Fuente: Ortiz, 2006)

i.3) MÁXIMA ACELERACIÓN DESEADA

En la Tabla N°4 se muestran las variables estadísticas asociadas a la Máxima Aceleración Deseada de autos y buses para la ciudad de Concepción.

	Máxima Aceleración Deseada (m/s²)	
	Autos	Buses
Media	2.0	1.89
Desviación Estándar	0.3	0.44
Mínimo	1.6	1.06
Máximo	2.6	3.08
N° Observaciones	50	50
Error	0.04	0.07

Tabla N°4: Máxima Aceleración Deseada de autos y buses.

(Fuente: Ortiz, 2006)

i.4) DESACELERACIÓN NORMAL

En la Tabla N°5 se muestran las variables estadísticas asociadas a la Desaceleración Normal de autos y buses para la ciudad de Concepción.

	Desaceleración Normal (m/s²)	
	Autos	Buses
Media	2.3	2.5
Desviación Estándar	0.7	0.7
Mínimo	1.5	1.79
Máximo	4.9	4.56
N° Observaciones	50	50
Error	0.08	0.08

Tabla N°5: Desaceleración Normal para autos y buses.

(Fuente: Ortiz, 2006)

i.5) TIEMPO DE REACCIÓN

El Tiempo de Reacción de los conductores considerado en este proyecto de título, se ha tomado como el valor encontrado por González (2005) en su calibración para la ciudad de Concepción. El valor obtenido es de 0,85 segundos, valor que se tomará para autos, colectivos, buses y peatones.

ii) PARÁMETROS MEDIDOS EN ESTE ESTUDIO

ii.1) TIEMPO DE REACCIÓN EN REPOSO

Este parámetro se ha medido directamente en la intersección O'Higgins – Rengo, y entrega los resultados indicados en la Tabla N°6:

	Tiempo de Reacción en Reposo en segundos		
	Autos	Buses	Colectivos
Media	1.24	1.41	1.02
Desviación Estándar	0.57	1.01	0.81
Mínimo	0.53	0.87	0.61
Máximo	3.05	5.31	3.92
N° Observaciones	60	30	30

Tabla N°6: Tiempo de Reacción en Reposo de autos, buses y colectivos.

(Fuente: Elaboración propia)

ii.2) VELOCIDAD EN FLUJO LIBRE

Se han medido las velocidades a flujo libre, (velocidades máximas que desarrollan los vehículos cuando no son afectados por otros usuarios de la red ni por semáforos), en O'Higgins y Rengo por cada pista. El promedio de estas velocidades se considera como la velocidad máxima de la sección, asociando su desviación estándar con la aceptación de límite de velocidad. Las pistas de cada avenida se enumeran de izquierda a derecha en el sentido del flujo, como muestra la Figura N°22. Los resultados de las mediciones de velocidad se detallan en la Tablas N° 7.

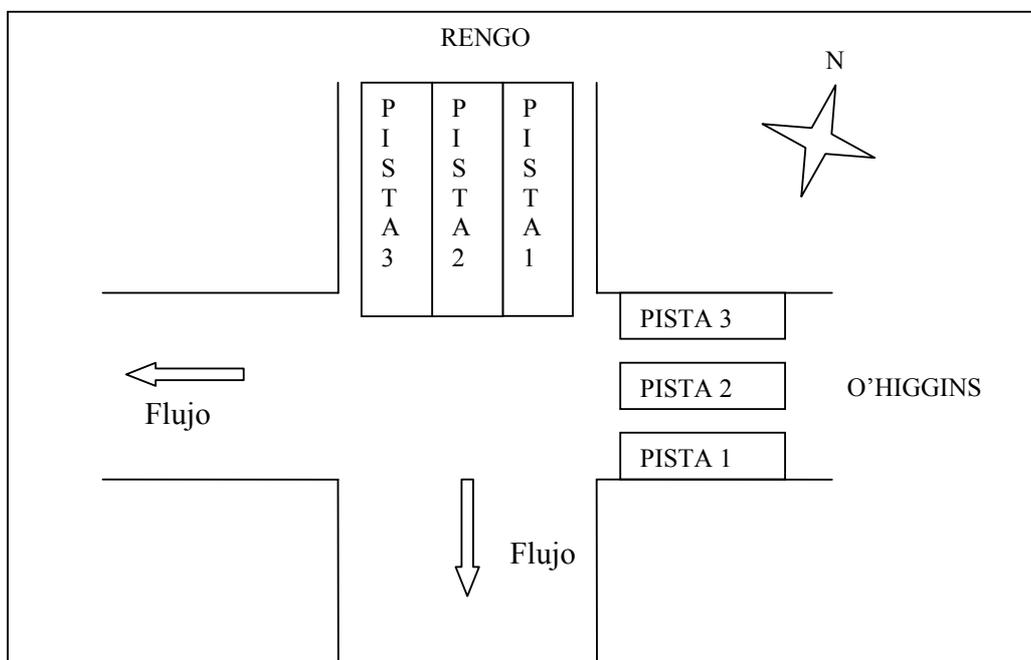


Figura N°22: Numeración de Pistas Intersección Rengo – O'Higgins.

(Fuente: Elaboración Propia)

	Velocidad de Circulación (km/h)				
	Rengo		O'Higgins		
	Pista 1-2	Pista 3	Pista 1	Pista 2	Pista 3
Media	32.69	S.M.	32.10	33.59	32.35
Desviación Estándar	5.52	S.M.	5.72	7.39	5.31
Mínimo	21.12	S.M.	24.75	16.50	20.84
Máximo	39.60	S.M.	44.00	49.50	36.00
N° Observaciones	30.00	S.M.	30.00	60.00	30.00

*S.M. sin medición, debido a que la pista 3 de Rengo es Parada de Loc. Colectiva

Tabla N°7: Velocidad de Circulación Intersección Rengo – O'Higgins.

(Fuente: Elaboración Propia)

5.1.3.2 MEDICIÓN DE PARÁMETROS PEATONALES

iii.1) VELOCIDAD PEATONAL

Todos los cruces de peatones que se presentan en la intersección O'Higgins - Rengo fueron utilizados en la medición de velocidades. A través de los videos se determinó el tiempo ocupado por una muestra representativa (50 peatones por cada tramo horario) en atravesar la calle, y luego se dividió aquel valor por la distancia recorrida (Ver Figura N°23). Después de esto y a través de los parámetros estadísticos entregados por la Distribución Normal, se contempla utilizar en el modelo AIMSUN NG las siguientes características del parámetro, indicadas en la Tabla N°8.

Velocidad Peatonal		
Promedio	(Km/h)	5.23
Mínimo	(Km/h)	3.53
Máximo	(Km/h)	8.35
Desv. Estándar	(Km/h)	0.99

Tabla N°8: Velocidad Peatonal.

(Fuente: Elaboración Propia)



Figura N°23: Determinación de Velocidades Peatonales Intersección Rengo – O’Higgins

(Fuente: UOCT Concepción)

iii.2) TIEMPO DE REACCIÓN EN REPOSO

Para esta medición se tomó una muestra representativa de 50 peatones cruzando O’Higgins en un sentido. Los resultados se observan en la Tabla N°9:

Tiempo de Reacción en Reposo Peatones	
(seg)	
Promedio	1.41
Desv. Estándar	0.71
Mínimo	0.47
Máximo	4.32
N° Datos	50.00

Tabla N°9: Tiempo de Reacción en Parada de Peatones.

(Fuente: Elaboración Propia)

5.1.3.3 MEDICIÓN DE FLUJOS

Para estas mediciones se han utilizado las grabaciones proporcionadas por Sectra en la Hora Punta Mediodía. Se han medido los flujos de autos, buses, peatones y todos los movimientos involucrados en la intersección. Los flujos de la red se incorporan en el modelo como un dato fijo, es decir, no presenta parámetros estadísticos como desviación estándar, mínimo o máximo, por lo que se ingresan sólo como un número.

El esquema de la Figura N°24 muestra los flujos medidos en la hora punta mediodía, es decir desde las 12.30 hrs. hasta las 13.30 hrs. Estos datos muestran el contexto general de los flujos en la intersección, pero para efectos del modelo se utilizan los flujos medidos cada 15 minutos, pues entrega una mayor precisión en el ajuste.

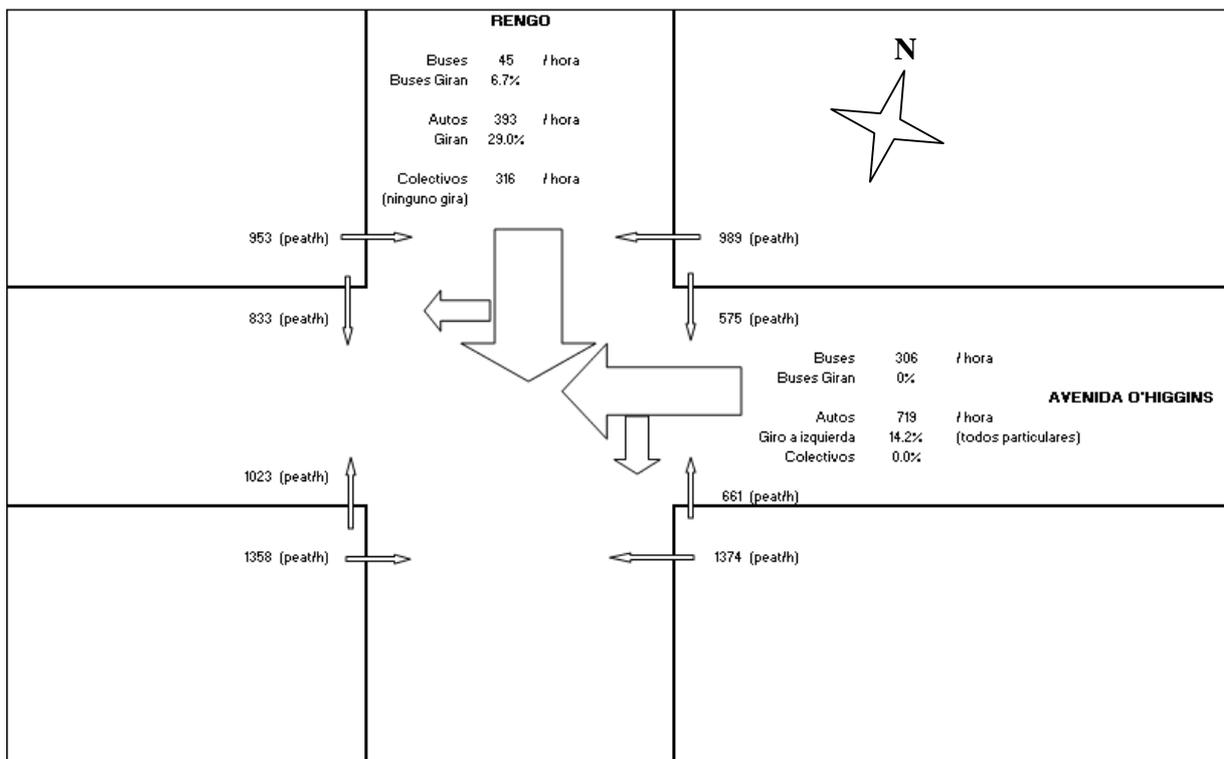


Figura N°24: Flujos Hora Punta Mediodía (12.30 – 13.30 hrs) en Esquina Rengo –

O'Higgins, Octubre 2007.

(Fuente: Elaboración Propia)

5.1.3.4 MEDICIÓN DE FLUJOS EN INTERSECCIONES ADYACENTES

Aunque el objetivo de este trabajo se centra en la esquina Rengo – O’Higgins, resulta importante considerar en el modelo, las intersecciones adyacentes a ésta, pues la llegada de vehículos a la intersección está controlada por lo que ocurra en las esquinas anteriores. Por otra parte, las esquinas posteriores también determinan parte del comportamiento de los conductores, en cuanto a cambios de pista, velocidades, adelantamientos, etc. Por estos motivos, también se han medido los flujos vehiculares de las siguientes intersecciones:

- Rengo esquina Barros Arana (anterior a Rengo – O’Higgins en el sentido del flujo)
- Rengo esquina San Martín (posterior a Rengo – O’Higgins en el sentido del flujo)
- O’Higgins esquina Caupolicán (anterior a O’Higgins – Rengo en el sentido del flujo)
- O’Higgins esquina Lincoyán (posterior a O’Higgins – Rengo en el sentido del flujo)

5.1.3.5 TIEMPOS DE PARADAS Y ESTACIONAMIENTOS

La intersección en estudio presenta paradas de locomoción colectiva muy cercanas. Avenida O’Higgins tiene dos paradas, una entre Rengo y Lincoyán y entre Lincoyán y Angol, ambas son paradas diferidas de buses, a Chiguayante y Talcahuano - San Pedro, respectivamente.

Rengo, por su parte, tiene paradas en las dos cuadras inmediatamente anteriores a O’Higgins y una después. Estas paradas son utilizadas por los colectivos y buses.

Los intervalos de llegada y tiempos de detención en parada son medidos en terreno, pues son los parámetros que se deben ingresar al modelo de simulación para que ejecute el modelo de parada.

En la Tabla N°10 se muestran los resultados más relevantes de paradas de locomoción colectiva para el modelo:

	Intervalos de llegada y Tiempos de Parada (min:seg)					
	Parada Chiguayante		Parada Talcahuano - Sn. Pedro		Parada Colectivos Barros	
	Int. Llegada	Tiempo Parada	Int. Llegada	Tiempo Parada	Int. Llegada	Tiempo Parada
Promedio	0:00:29	0:01:04	0:00:27	0:00:34	0:00:26	0:00:36
Desvest	0:00:27	0:00:25	0:00:24	0:00:20	0:00:20	0:00:24
Máximo	0:02:08	0:02:08	0:01:49	0:01:47	0:01:01	0:01:42
Mínimo	0:00:01	0:00:15	0:00:00	0:00:05	0:00:00	0:00:09

Tabla N°10: Intervalos de llegada y Tiempos de Parada para Buses y Colectivos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Por otra parte, también se han medido los tiempos de estacionamiento o detenciones de autos particulares, pues es un comportamiento representativo de la zona en estudio y que afecta la circulación vehicular.

Las mediciones se muestran en la Tabla N°11.

	Intervalos de llegada y Tiempos de Parada			
	Vehículos Particulares en O'Higgins (min:seg)			
	Autos Particulares detenidos		Vehículos de Seguridad (Brinks)	
	Int. Llegada	Tiempo Parada	Int. Llegada	Tiempo Parada
Promedio	0:01:59	0:00:52	0:07:00	0:02:24
Desvest	0:01:40	0:00:54	0:06:48	0:01:38
Máximo	0:06:32	0:03:09	0:18:53	0:05:21
Mínimo	0:00:05	0:00:05	0:00:57	0:01:01

Tabla N°11: Intervalos de llegada y Tiempos de Parada de vehículos particulares en O'Higgins.

(Fuente: Elaboración Propia)

5.1.3.6 MEDICIONES DE FLUJOS PEATONALES CONTROLADOS POR SEMÁFORO

El cruce de la intersección en estudio por parte de los vehículos, se encuentra controlado absolutamente por los semáforos presentes en ella. Pero los cruces peatonales no son siempre controlados por los semáforos, los que aún existiendo no son respetados por los peatones cuando no existe flujo vehicular que entorpezca el cruce o cuando existe alguna brecha entre los vehículos que dé el tiempo necesario para atravesar la calzada. Esto incluso obliga a los conductores a modificar su comportamiento.

De todos modos, existir altos flujos vehiculares en la intersección, los cruces peatonales están controlados principalmente por los semáforos, solo un porcentaje menor de peatones utiliza las brechas vehiculares, aún cuando su cruce esté prohibido por el semáforo.

Los resultados de las mediciones dan un promedio de un 95 % de cruces peatonales controlados por semáforo. Este valor se obtuvo de una muestra aproximada de un 50% del universo de peatones presentes en el horario en estudio. Esta medición indica que es posible modelar el flujo peatonal como controlado por los semáforos de la intersección.

5.2 MODELACIÓN DEL FENÓMENO

Una vez que la información requerida de terreno está completa, ésta se debe introducir a un modelo que represente de buena forma el fenómeno que se quiere replicar.

5.2.1 ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN DE CRUCE PEATONAL

Antes de evaluar el sistema completo se realiza un modelo sólo de la intersección Rengo – O'Higgins, con el objeto de estudiar distintas estrategias de modelación del cruce peatonal. De este análisis se obtiene la modelación más representativa de peatones y se incorpora al modelo final. Se han considerado seis modelos, los que se detallan a continuación:

Estrategia de Modelación P1

Este modelo tiene las siguientes características:

- No se considera peatones en la modelación.
- El flujo es semaforizado.
- No existen pistas internas. La modelación es típica.

Estrategia de Modelación P2 (Ver Figura N°25)

Este modelo tiene las siguientes características:

- Peatones utilizan pistas de 0,8 metros de ancho para cruzar las calles. Este valor fue tomado en terreno con la medición de espacio peatonal y corroborado por datos de REDEVU, 1998. Se utiliza también en los modelos P3, P4, P5 y P6.
- Los vehículos que giran, lo hacen a través de pistas internas de intersección. De no ser así, se observan conflictos entre peatones y vehículos, pasando unos sobre otros. Esta característica se repite en los modelos P3, P4, P5 y P6
- Las pistas peatonales están controladas absolutamente por los semáforos, por lo que los peatones cruzan solo con verde.
- Las pistas peatonales presentan Ceda el Paso internos.
- Las pistas internas de los vehículos que giran no presentan ningún tipo de señalización de prioridad.

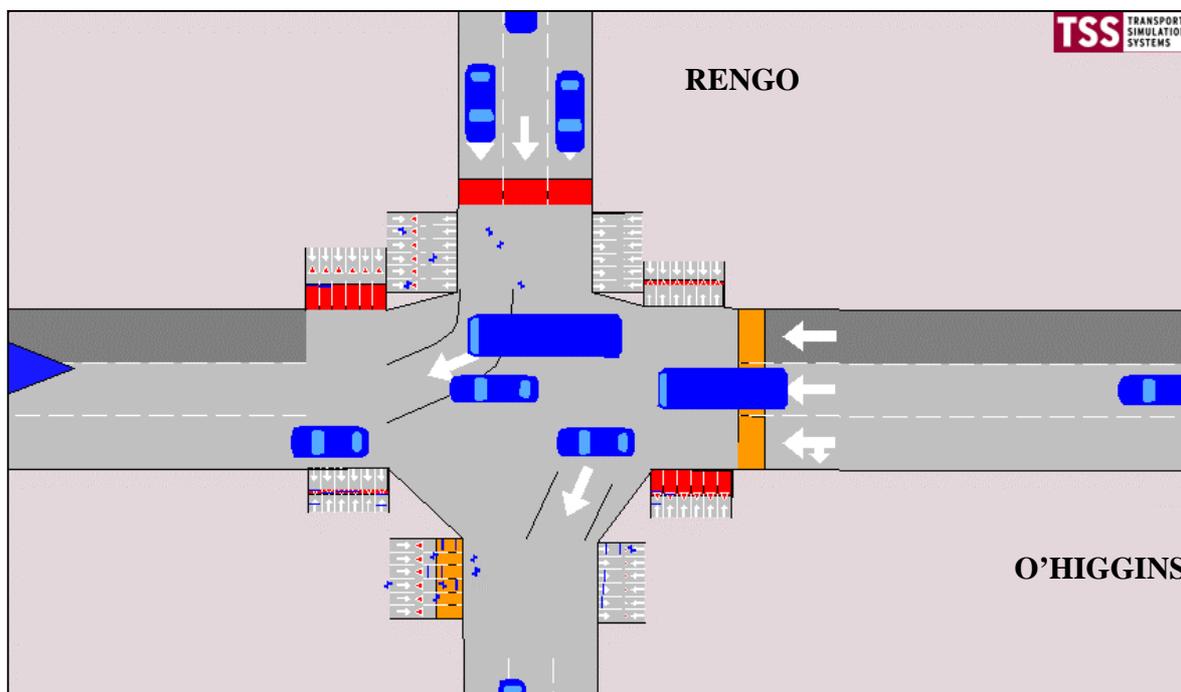


Figura N°25: Simulación Modelo P2

(Fuente: Elaboración Propia)

Estrategia de Modelación P4 (Ver Figura N°27)

Este modelo tiene las siguientes características:

- La mayor parte de las pistas peatonales están controladas por los semáforos, cruzando por ellas un 95 % del flujo de peatones (y sin Ceda el Paso Interno). El otro 5% lo hace a través de pistas sin control semafórico, pero con Ceda el Paso, de forma de modelar los peatones que no respetan las luces del semáforo.
- Las pistas internas de los vehículos que giran presentan señalización de prioridad Ceda el Paso.

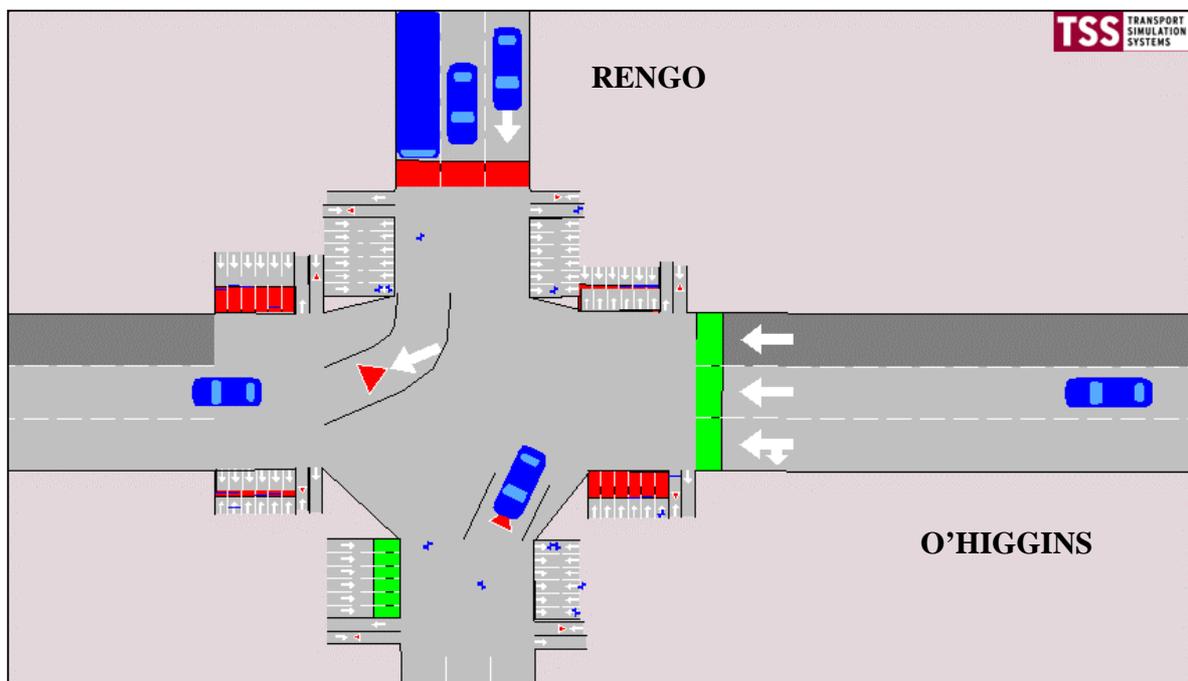


Figura N°27: Simulación Modelo P4

(Fuente: Elaboración Propia)

Estrategia de Modelación P5 (Ver Figura N°28)

Este modelo tiene las siguientes características:

- La mayor parte de las pistas peatonales están controladas por los semáforos, cruzando por ellas un 95 % del flujo de peatones (y sin Ceda el Paso Interno). El otro 5% lo hace a través de pistas sin control semafórico, pero con Ceda el Paso, de forma de modelar los peatones que no respetan las luces del semáforo.
- Las pistas internas de los vehículos que giran no presentan señalización de prioridad Ceda el Paso.

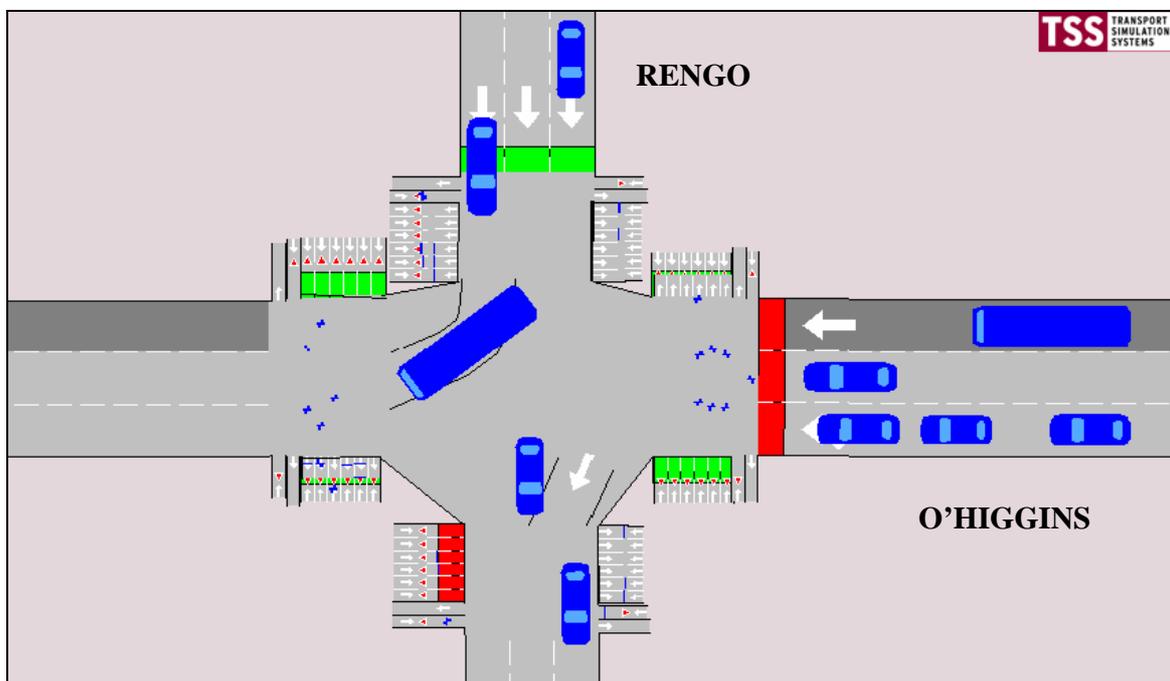


Figura N°28: Simulación Modelo P5

(Fuente: Elaboración Propia)

Estrategia de Modelación P6 (Ver Figura N°29)

Este modelo tiene las siguientes características:

- Las pistas peatonales están controladas absolutamente por los semáforos, por lo que los peatones cruzan sólo con verde.
- Las pistas peatonales presentan también símbolos Ceda el Paso internos.
- Las pistas internas de los vehículos que giran presentan señalización de prioridad Ceda el Paso.

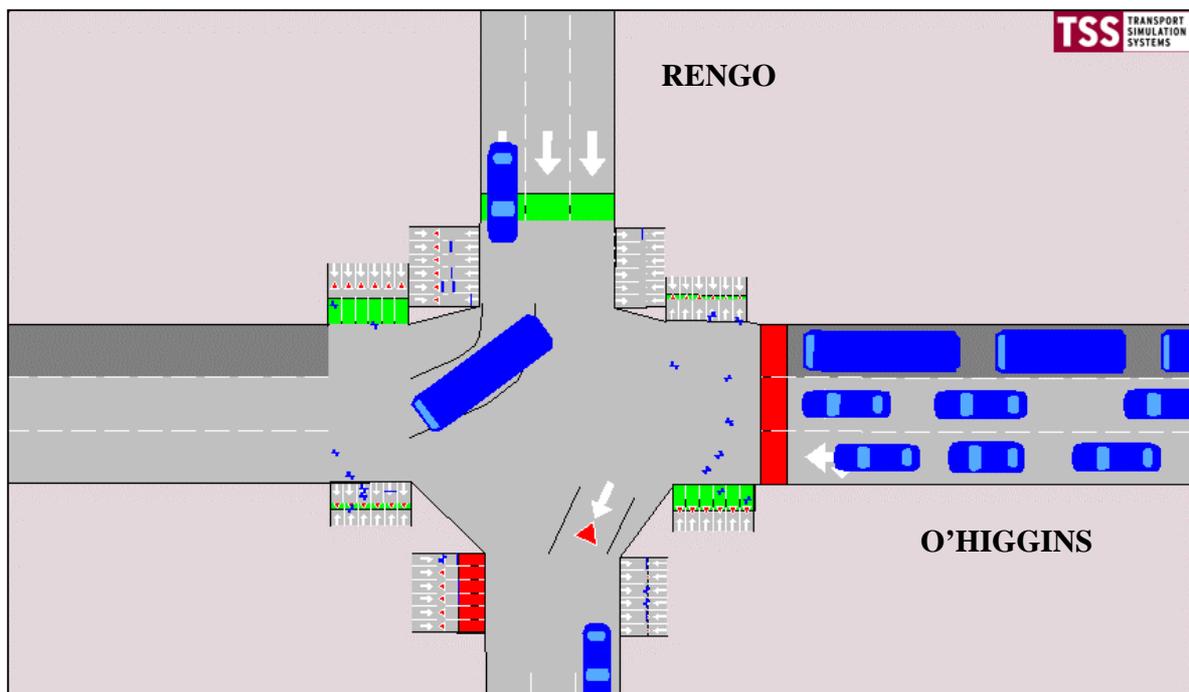


Figura N°29: Simulación Modelo P6

(Fuente: Elaboración Propia)

5.2.2 MODELO DE CRUCE PEATONAL ESCOGIDO

Para evaluar cual de estos modelos representa de mejor manera la interacción existente en las intersecciones, se utiliza como índice de desempeño la Longitud de Cola de las pistas de viraje.

Los resultados de cada modelo en relación al índice de cola real, son los indicados en la Tabla N°12:

RESULTADOS MODELOS DE CRUCE PEATONAL (Junio 2007)								
		REAL	P1	P2	P3	P4	P5	P6
RENGO	Longitud de cola virajes	2.7	1.51	2.09	MC	MC	MC	2.68
	Diferencia		1.19	0.61				0.02
	Error		43.9%	22.4%				0.7%
O'HIGGINS	Longitud de cola virajes	2.8	2.04	3.14	MC	MC	MC	9.77
	Diferencia		0.76	0.34				6.97
	Error		27.0%	12.1%				248.8%

*MC: modelos colapsan antes de 1 hora de simulación

Tabla N°12: Resultados de Modelos de Cruce Peatonal.

(Fuente: Elaboración propia)

De la tabla anterior se deduce que los modelos P3, P4 y P5 no son funcionales pues resultan inestables, es decir que en la ejecución del modelo se produce una incongruencia en la interacción de peatones y vehículos en el cruce, tal que un peatón o grupo de peatones detiene su marcha en la calle, razón por la que los vehículos también lo hacen. Esta situación no se soluciona durante la modelación, por lo que el flujo se interrumpe y en pantalla sólo se observa un aumento de vehículos detenidos. A esta situación se la ha llamado colapso del modelo. De los modelos de cruce peatonal que no colapsan, el modelo P1 resulta ser sólo referencial para decidir cual es la mejor forma de modelar el cruce peatonal, pues es el modelo que no considera flujo peatonal. Entonces se debe elegir entre los modelos P2 y P6. Se observa que el modelo P2 tiene errores de 22,5% para Rengo y 12,1% para O'Higgins en las longitudes de cola de la pista de viraje. Por otro lado aunque el modelo P6 tiene un muy buen ajuste en Rengo, con un 0,7% de error, en O'Higgins es muy malo con un 248,8%. **Por lo tanto se decide utilizar la forma de modelar el cruce peatonal como indica el modelo P2.**

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

La validez del proceso de calibración del modelo es refrendada a través de la comparación entre los datos reales del Índice de Desempeño elegido y los que entrega el modelo. Esta comparación es expresada numéricamente a través de un porcentaje de error, el que debe estar dentro de un rango aceptable. De este modo se puede decir que el modelo está calibrado.

6.1 VALOR REAL DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO

El indicador de desempeño real corresponde a los datos de longitud de cola medidos en terreno. Estos datos deben ser medidos en forma simultánea con la demanda por ser dependientes entre sí. La Figura N°22 indica el orden de las pistas considerado, para tener un mejor entendimiento de las tablas que se muestran más adelante. De las pistas mostradas, es importante señalar que para O'Higgins la pista de viraje es la Pista 1, mientras que para Rengo lo es la Pista 3.

6.1.1 MEDICIÓN DE LONGITUDES DE COLA

La longitud de cola es medida en el momento exacto en que la luz cambia de período rojo a verde, así el medidor debe contar sólo los vehículos que se encuentren detenidos en ese momento. Esta medición se realiza en cada acceso de la intersección.

En la Tabla N°13 se muestran las longitudes de cola medidas en la intersección Rengo - O'Higgins.

Tramo	Longitud de Cola Observadas							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	2.1	2.6	0.6	1.7	0.8	2.6	2.2	1.9
12.45-13.00	2.2	1.6	0.8	1.5	0.6	2.1	2.6	1.7
13.00-13.15	1.7	2.3	0.3	1.4	0.8	2.6	2.8	2.1
13.15-13.30	2.4	4.9	1.1	2.8	0.6	1.5	2.9	1.6
12.30-13.30	2.1	2.8	0.7	1.9	0.7	2.2	2.6	1.8

Tabla N°13: Longitud de Cola Observada en Intersección Rengo – O'Higgins,

Octubre 2007. *Pista 1 a la izquierda en el sentido del flujo

(Fuente: Elaboración Propia)

De las longitudes de cola que se presentan en Avenida O'Higgins es posible observar que la mayor parte de ellas se encuentran en las pistas 1 y 2, mientras que la pista 3 presenta colas muy menores. Por otro lado, en Rengo, la pista 1 es la que presenta menores valores.

6.2 MODELOS DE CALIBRACIÓN ANALIZADOS

Para lograr los objetivos de este proyecto de título se analizan 4 modelos de simulación, los que son explicados a continuación:

6.2.1 MODELO 1

Este modelo representa la situación base de este trabajo, pues simula las intersecciones sin la modelación de peatones y con los parámetros calibrados para Concepción en la hora punta mañana (Ortiz, 2006).

6.2.2 MODELO 2

Este modelo muestra la zona en estudio sin la modelación de los peatones en el cruce Rengo – O'Higgins, pero sí recoge su influencia en el comportamiento de los conductores, al modificarse la velocidad de giro de los vehículos en esta intersección. Además se incorporan los valores de los parámetros calibrados para el período en estudio (hora punta mediodía). La Figura N°30 muestra la red geométrica utilizada para los dos modelos descritos anteriormente.

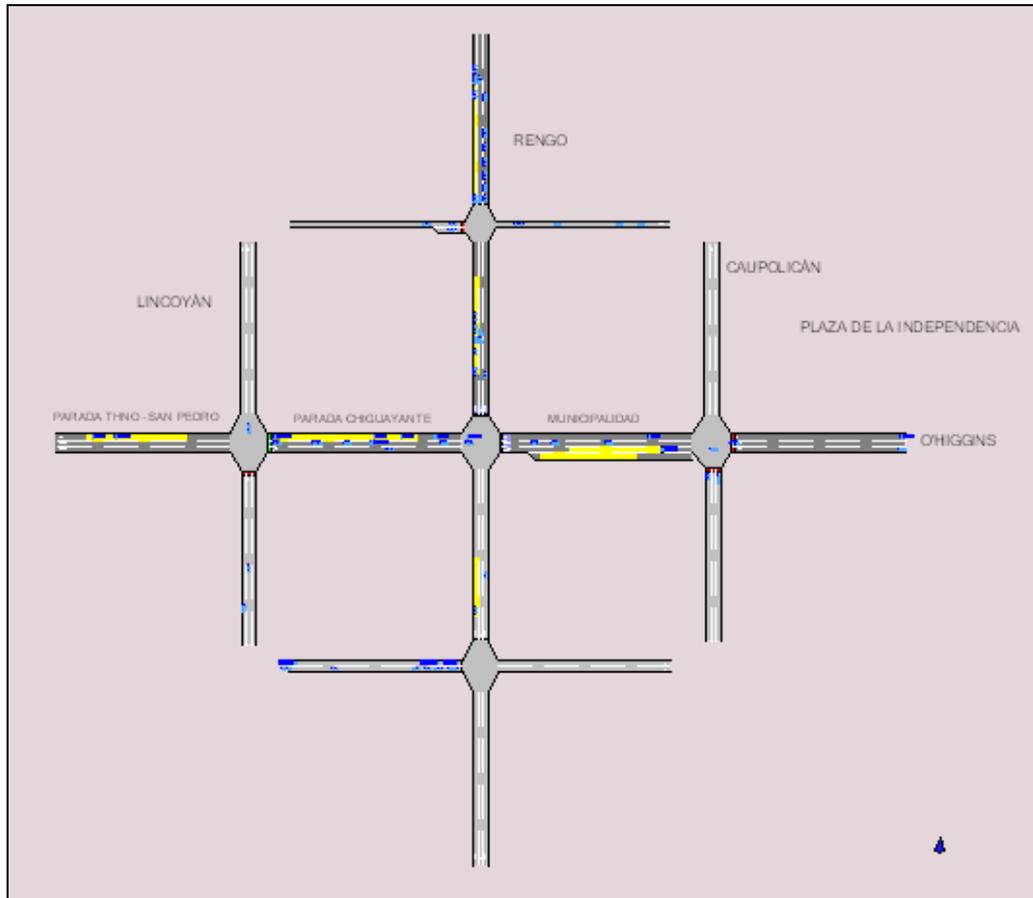


Figura N°30: Red de Calibración sin Peatones, Modelos 1 y 2.

(Fuente: Elaboración Propia)

6.2.3 MODELO 3

Este modelo incluye a los peatones que cruzan la esquina Rengo – O’Higgins pero sin modificar los parámetros calibrados por Ortiz (2006) para la red. De esta forma se busca ver si sólo la inclusión de los peatones al modelo es suficiente para obtener un modelo calibrado para este horario.

6.2.4 MODELO 4

Este modelo incluye la modelación de los peatones que cruzan la esquina de Rengo y O’Higgins, pero a diferencia del modelo 3, se incluyen los parámetros calibrados para este horario que se indican en el Capítulo IV.

La Figura N°31 muestra la geometría de la red utilizada en los modelos 3 y 4.

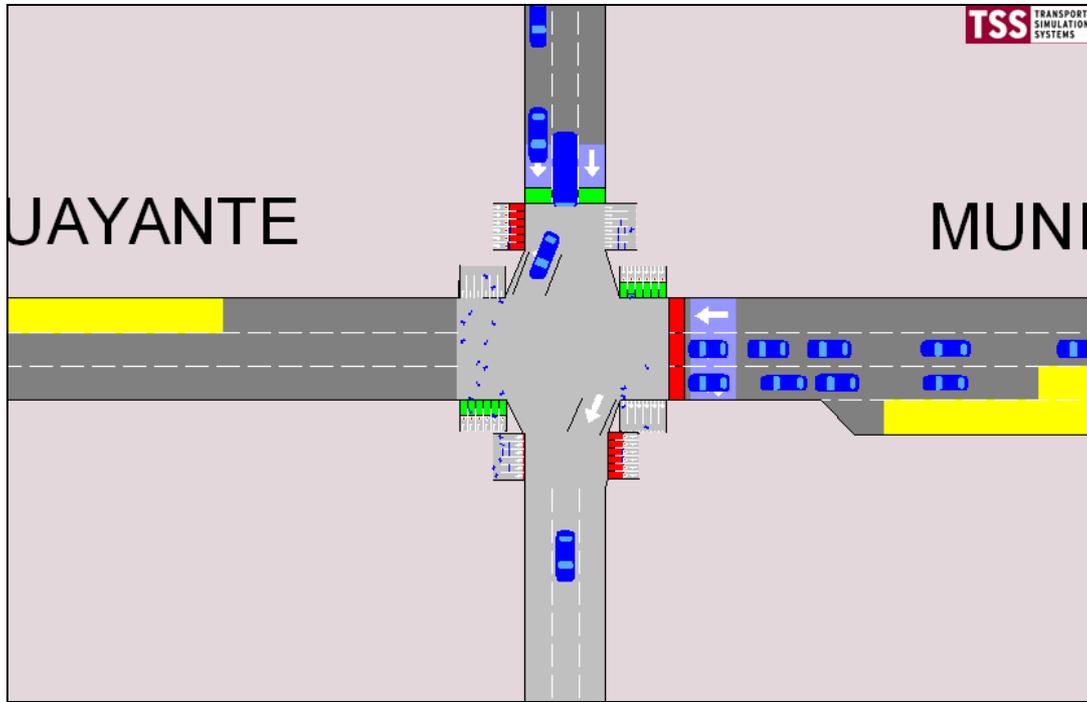


Figura N°31: Red de Calibración con Peatones.

(Fuente: Elaboración Propia)

6.3 VALOR MODELADO DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO

En las Tablas N°14 a N°18, se muestran los resultados de los distintos modelos de calibración considerados.

Tramo	Longitud de Cola - Modelo 1							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	1.15	1.81	0.26	1.07	0.77	1.41	1.50	1.23
12.45-13.00	1.28	2.11	0.14	1.18	0.60	1.51	1.66	1.26
13.00-13.15	1.31	2.47	0.19	1.32	0.82	1.39	1.51	1.24
13.15-13.30	1.04	1.91	0.22	1.06	0.74	1.45	1.72	1.30
12.30-13.30	1.20	2.08	0.20	1.16	0.73	1.44	1.60	1.26

Tabla N°14: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O'Higgins para Modelo 1 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola - Modelo 2							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	1.17	2.33	0.36	1.28	0.47	1.80	1.62	1.30
12.45-13.00	1.35	2.43	0.31	1.37	0.63	1.89	1.92	1.48
13.00-13.15	1.42	2.89	0.29	1.53	0.65	2.04	1.93	1.54
13.15-13.30	1.19	2.23	0.30	1.24	0.66	1.68	1.79	1.38
12.30-13.30	1.28	2.47	0.31	1.36	0.60	1.85	1.81	1.42

Tabla N°15: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O'Higgins para Modelo 2 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola - Modelo 3							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	1.22	2.16	0.31	1.23	0.72	1.30	1.63	1.22
12.45-13.00	1.49	2.22	0.17	1.29	0.60	1.68	1.77	1.35
13.00-13.15	1.83	3.10	0.26	1.73	0.91	1.65	1.73	1.43
13.15-13.30	1.45	2.21	0.27	1.31	0.65	1.58	1.58	1.27
12.30-13.30	1.50	2.42	0.25	1.39	0.72	1.55	1.68	1.32

Tabla N°16: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O'Higgins para Modelo 3 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola - Modelo 4							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	1.12	2.31	0.44	1.29	0.54	1.72	1.76	1.34
12.45-13.00	1.40	2.34	0.38	1.37	0.72	2.38	1.86	1.65
13.00-13.15	1.75	3.50	0.30	1.85	0.84	2.12	1.97	1.64
13.15-13.30	1.52	3.05	0.41	1.66	0.64	1.96	1.94	1.51
12.30-13.30	1.45	2.80	0.38	1.54	0.68	2.04	1.88	1.54

Tabla N°17: Longitud de Cola en Intersección Rengo – O'Higgins para Modelo 4 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Promedio - Modelos de Calibración									
	O'Higgins					Rengo				
	Observada	M1	M2	M3	M4	Observada	M1	M2	M3	M4
12.30-12.45	1.73	1.07	1.28	1.23	1.29	1.88	1.23	1.30	1.22	1.34
12.45-13.00	1.50	1.18	1.37	1.29	1.37	1.72	1.26	1.48	1.35	1.65
13.00-13.15	1.44	1.32	1.53	1.73	1.85	2.05	1.24	1.54	1.43	1.64
13.15-13.30	2.77	1.06	1.24	1.31	1.66	1.63	1.30	1.38	1.27	1.51
12.30-13.30	1.86	1.16	1.36	1.39	1.54	1.82	1.26	1.42	1.32	1.54

Tabla N°18: Longitud de Cola Promedio de Modelos de Calibración en Intersección

Rengo – O’Higgins.

(Fuente: Elaboración Propia)

6.4 DETERMINACIÓN DE LA BONDAD DE AJUSTE DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO

Como ya se encuentran todos los parámetros calibrados para la condición de tráfico mixto, interrumpido y peatonal, se comprueba la bondad de ajuste del Indicador en la intersección de calibración. Esto se hace comparando los Indicadores de Desempeño Observados o Reales (IDR) con los entregados por AIMSUN (IDS) empleando los modelos sin peatones y los calibrados con peatones.

6.4.1 DEFINICIÓN DEL ERROR ASOCIADO

Como herramienta estadística para la comparación entre valores simulados y observados se encuentran el error promedio porcentual absoluto (EPPA) (6.1) y el error cuadrático medio (ECM) (6.2).

$$EPPA = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{sim_i - obs_i}{obs_i} \right)^2} \tag{6.1}$$

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|sim_i - obs_i|}{obs_i} \right) \tag{6.2}$$

Donde:

EPPA = Error promedio porcentual absoluto.

ECM = Error cuadrático medio.

n = tamaño muestral.

sim_i = simulados en intervalo *i*.

obs_i = observados en intervalo *i*.

Estos indicadores sólo son una herramienta de calibración y no sirven para determinar si la simulación es adecuada, debido a que las magnitudes de la longitud de cola obtenidas son pequeñas, por tanto la diferencia de un vehículo genera un error exagerado. Por este motivo se decide realizar el análisis utilizando solamente la *diferencia* y se omite el cálculo del error mediante las fórmulas (6.1) y (6.2), utilizándolas solo en la etapa de validación.

6.4.2 ERRORES OBTENIDOS

Para la etapa de calibración se utiliza la diferencia como medida del error asociado a cada modelo. Las que se muestran en las Tablas N°19 a N°23.

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Modelo 1 - Longitud de Cola Observada							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-0.90	-0.79	-0.29	-0.66	-0.07	-1.17	-0.71	-0.65
12.45-13.00	-0.92	0.56	-0.61	-0.32	0.05	-0.54	-0.89	-0.46
13.00-13.15	-0.37	0.15	-0.13	-0.12	0.03	-1.19	-1.28	-0.81
13.15-13.30	-1.31	-2.94	-0.88	-1.71	0.14	0.00	-1.13	-0.33
12.30-13.30	-0.88	-0.75	-0.48	-0.70	0.04	-0.73	-1.00	-0.56

Tabla N°19: Error Asociado a Modelo 1 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

*La diferencia se toma con respecto al valor real de longitud de cola, es decir que los valores negativos indican la disminución de colas por parte del modelo, como en este caso.

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Modelo 2 - Longitud de Cola Observada							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-0.88	-0.27	-0.19	-0.45	-0.38	-0.77	-0.59	-0.58
12.45-13.00	-0.85	0.88	-0.44	-0.13	0.08	-0.16	-0.63	-0.24
13.00-13.15	-0.26	0.58	-0.03	0.10	-0.14	-0.54	-0.86	-0.51
13.15-13.30	-1.16	-2.62	-0.80	-1.53	0.06	0.23	-1.06	-0.26
12.30-13.30	-0.79	-0.36	-0.36	-0.50	-0.10	-0.31	-0.79	-0.40

Tabla N°20: Error Asociado a Modelo 2 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Modelo 3 - Longitud de Cola Observada							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-0.83	-0.44	-0.24	-0.50	-0.13	-1.28	-0.58	-0.66
12.45-13.00	-0.71	0.67	-0.58	-0.21	0.05	-0.37	-0.78	-0.37
13.00-13.15	0.15	0.79	-0.06	0.29	0.12	-0.93	-1.06	-0.62
13.15-13.30	-0.90	-2.64	-0.83	-1.46	0.05	0.13	-1.27	-0.36
12.30-13.30	-0.57	-0.41	-0.43	-0.47	0.02	-0.61	-0.92	-0.50

Tabla N°21: Error Asociado a Modelo 3 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Modelo 4 - Longitud de Cola Observada							
	O'Higgins				Rengo			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-0.93	-0.29	-0.11	-0.45	-0.30	-0.86	-0.45	-0.54
12.45-13.00	-0.80	0.79	-0.38	-0.13	0.17	0.33	-0.69	-0.06
13.00-13.15	0.06	1.18	-0.02	0.41	0.05	-0.46	-0.82	-0.41
13.15-13.30	-0.83	-1.80	-0.69	-1.11	0.04	0.51	-0.91	-0.12
12.30-13.30	-0.63	-0.03	-0.30	-0.32	-0.01	-0.12	-0.72	-0.28

Tabla N°22: Error Asociado a Modelo 4 de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Diferencia Promedio Long. Cola Modelos de Calibración - Long. Cola Observada							
	O'Higgins				Rengo			
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
12.30-12.45	-0.66	-0.45	-0.50	-0.45	-0.65	-0.58	-0.66	-0.54
12.45-13.00	-0.32	-0.13	-0.21	-0.13	-0.46	-0.24	-0.37	-0.06
13.00-13.15	-0.12	0.10	0.29	0.41	-0.81	-0.51	-0.62	-0.41
13.15-13.30	-1.71	-1.53	-1.46	-1.11	-0.33	-0.26	-0.36	-0.12
12.30-13.30	-0.70	-0.50	-0.47	-0.32	-0.56	-0.40	-0.50	-0.28

Tabla N°23: Error Promedio Asociado a Modelos de Calibración.

(Fuente: Elaboración Propia)

6.4.3 ANÁLISIS DE MODELOS

De los cuatro modelos analizados se observa que el que presenta mayores diferencias con la realidad es el modelo 1, el que no considera la influencia peatonal y utiliza los parámetros vehiculares de la hora punta mañana. Este resultado se preveía pues es la modelación más alejada de las condiciones reales en que se midieron las colas de la intersección. Los resultados de las modelaciones 2 y 3 son mejores que para el modelo 1, y entre ellos no varían demasiado. Por último, los resultados del modelo 4 son los más cercanos a la realidad, lo que también resultaba previsible, pues tiene la modelación más cercana a las variables medidas en terreno.

Los resultados anteriores entregan además la posibilidad de estimar cuál de los modelos representa mejor la interacción entre peatones y vehículos, a través de la longitud de cola de las pistas de viraje, que en este caso es la Pista 1 para O'Higgins y la Pista 3 para Rengo. La Tabla N°24 muestra las longitudes de cola a nivel agregado, en las pistas de viraje, para los cuatro modelos:

	Diferencias en Long. Cola en Pistas de Viraje		
	O'Higgins	Rengo	Promedio Diferencia
Modelo 1	-0.88	-1.00	-0.94
Modelo 2	-0.79	-0.79	-0.79
Modelo 3	-0.57	-0.92	-0.75
Modelo 4	-0.63	-0.72	-0.67

Tabla N°24: Diferencias en Longitudes de Cola en Pistas de Viraje.

(Fuente: Elaboración Propia)

Se observa que en relación a la situación base, que no incluye el flujo de peatones de ninguna manera, las diferencias tienden a disminuir, por lo que la modelación de peatones o sus efectos sobre los vehículos mejora una simulación como la de este caso. Pero por otra parte se aprecia que las diferencias son mayores al promedio de cada modelo para todas las pistas. Por último, se debe señalar que la mayor parte de los resultados arrojan longitudes de cola menores a las medidas en terreno, cuestión que debe ser tomada en cuenta si se utiliza un modelo similar en el diseño de sistemas de control o gestión de tránsito.

6.4.4 ELECCIÓN DE MODELO CALIBRADO

De los cuatro modelos estudiados, el que simula de mejor manera la intersección Rengo – O’Higgins para la hora punta mediodía, es el modelo 4. Como se vio anteriormente, presenta las longitudes de cola más cercanas a las reales, incluidas las de las pistas de viraje. De todos modos, los cuatro modelos estudiados serán analizados en una intersección de validación, con el objeto de determinar cuál de los modelos replica de mejor manera el comportamiento de una intersección donde no se han tomado datos en terreno más allá de los flujos vehiculares y peatonales.

CAPÍTULO VII

ETAPA DE VALIDACIÓN

La validación se realiza en una intersección diferente a la utilizada para la calibración. El objetivo es corroborar los resultados utilizando los parámetros calibrados y modelos de simulación que sigan los mismos criterios que en la calibración.

La intersección utilizada para validar los resultados corresponde a O'Higgins con Tucapel, ubicada en el centro urbano de Concepción. Esta elección está relacionada con la existencia de una cámara en el sector con el fin de aprovechar los recursos existentes y así facilitar las mediciones, además de ser una intersección con condiciones parecidas de tráfico vehicular y peatonal con Rengo – O'Higgins. La Figura N°32 muestra la intersección.



Figura N°32: Fotografía Aérea Intersección de Validación.

(Fuente: Google Earth)

Específicamente la validación se centra en el Índice de desempeño dado por la Longitud de Cola que se genera en calle Tucapel, especialmente en la pista de viraje, donde los vehículos giran hacia O'Higgins y son por tanto obstaculizados por el flujo peatonal.

7.1 MEDICIONES EN TERRENO

Las únicas mediciones que se deben realizar en este caso corresponden a las Longitudes de Cola, flujos vehiculares y flujos peatonales. Los otros parámetros se utilizan iguales a los de la calibración en Rengo – O'Higgins. Los flujos se detallan a través de la Figura N°33. Allí se observa también la similitud entre la intersección utilizada en la calibración y en esta etapa.

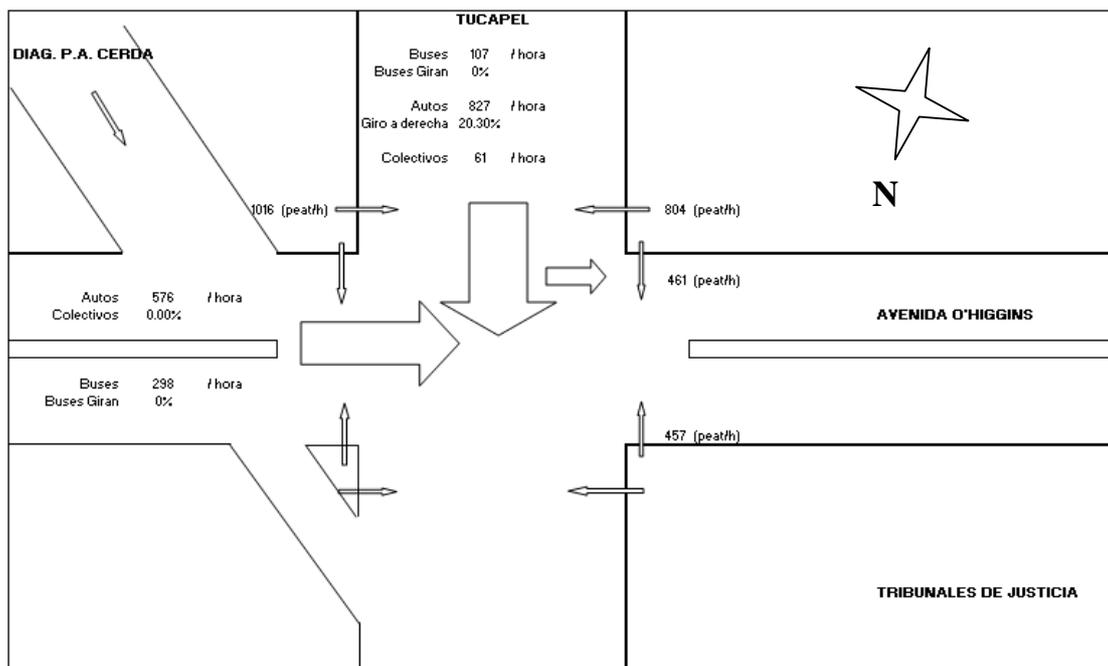


Figura N°33: Flujos Tucapel – O'Higgins, Octubre 2007.

(Fuente: Elaboración Propia)

7.2 ÍNDICE DE DESEMPEÑO REAL

Las longitudes de Cola reales (IDR) obtenidas en terreno se observan en la Tabla N°25 a nivel desagregado (cuatro periodos de 15 minutos) y agregado (un periodo de 60 minutos).

Tramo	Longitud de Cola Tucapel Observada			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	5.2	4.2	1.9	3.8
12.45-13.00	7.0	4.5	1.5	4.3
13.00-13.15	7.5	4.8	1.6	4.6
13.15-13.30	5.6	5.9	2.6	4.7
12.30-13.30	6.3	4.9	1.9	4.4

Tabla N°25: Validación - Longitud de Cola Tucapel Observada.

(Fuente: Elaboración Propia)

7.3 MODELOS DE VALIDACIÓN

La red de validación se simula a través de cuatro modelos, que utilizan los mismos parámetros considerados en la calibración. Se consideran todos los modelos, por cuanto permiten comparar los resultados y de este modo validar el trabajo realizado en la etapa de calibración.

a) Modelo V1

Este modelo considera los mismos parámetros utilizados en el modelo de calibración 1, pero aplicado a la geometría y flujos de la intersección de validación. Se trata de los parámetros calibrados para la hora punta mañana (Ortiz, 2006) sin incorporación de peatones en el modelo.

b) Modelo V2

Este modelo considera los mismos parámetros utilizados en el modelo de calibración 2, pero aplicado a la geometría y flujos de la intersección de validación. Se trata de los parámetros calibrados para la hora punta mediodía (determinados en el Capítulo V) más la incorporación de la influencia peatonal sobre los conductores a través de la disminución de la velocidad de viraje de los vehículos.



Figura N°34: Red de Validación sin peatones, Modelos V1 y V2.

(Fuente: Elaboración Propia)

c) Modelo V3

Este modelo considera los mismos parámetros utilizados en el modelo de calibración 3, pero aplicado a la geometría y flujos de la intersección de validación. Se trata de los parámetros calibrados para la hora punta mañana (Ortiz, 2006) más la incorporación de peatones en el modelo.

d) Modelo V4

Este modelo considera los mismos parámetros utilizados en el modelo de calibración 4, pero aplicado a la geometría y flujos de la intersección de validación. Se trata de los parámetros calibrados para la hora punta mediodía (determinados en el Capítulo V) más la incorporación de peatones en el modelo.

La Figura N°34 muestra una visualización del modelo geométrico utilizado para los modelos de validación V1 y V2, mientras que la Figura N°35 lo hace para los modelos V3 y V4..

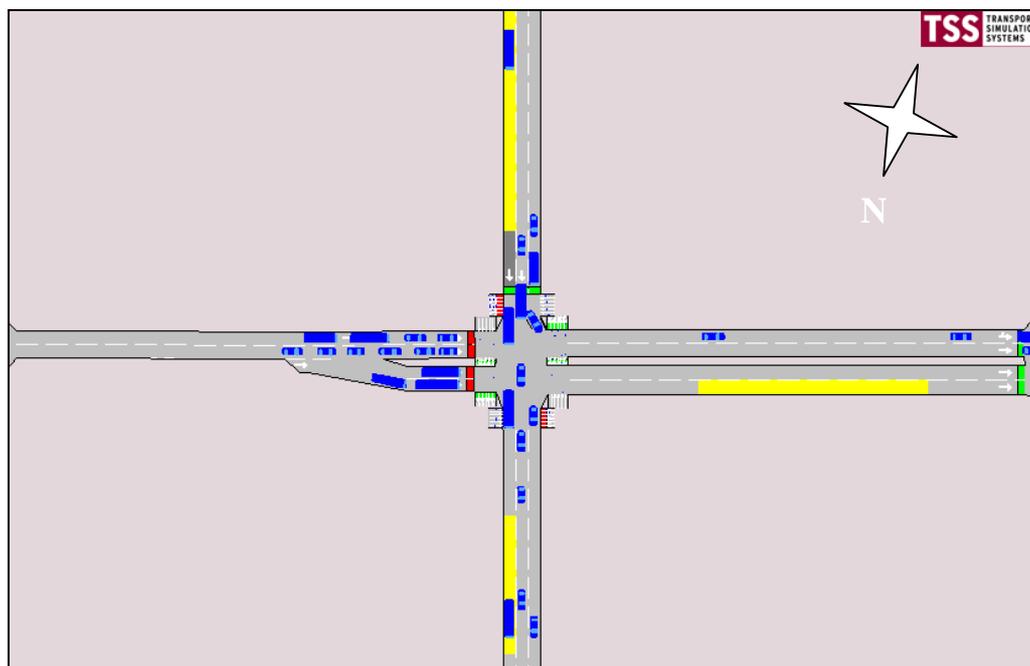


Figura N°35: Red de Validación con peatones, Modelos V3 y V4.

(Fuente: Elaboración Propia)

7.3.1 VALOR MODELADO DEL ÍNDICE DE DESEMPEÑO

Los modelos de validación entregan los resultados del índice de desempeño que se muestran en las Tablas N°26 a N°30.

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V1			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	4.99	4.67	1.82	3.82
12.45-13.00	5.39	5.18	2.06	4.21
13.00-13.15	5.17	5.22	2.11	4.17
13.15-13.30	4.92	4.79	2.17	3.96
12.30-13.30	5.11	4.97	2.04	4.04

Tabla N°26: Longitud de Cola en Intersección O'Higgins - Tucapel para Modelo de Validación V1.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V2			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	5.74	5.33	2.52	4.53
12.45-13.00	6.72	6.43	2.39	5.18
13.00-13.15	6.21	5.99	2.54	4.91
13.15-13.30	5.79	5.85	2.81	4.81
12.30-13.30	6.12	5.90	2.56	4.86

Tabla N°27: Longitud de Cola en Intersección O'Higgins - Tucapel para Modelo de Validación V2.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V3			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	4.67	4.41	1.99	3.69
12.45-13.00	5.13	5.06	1.88	4.02
13.00-13.15	5.76	5.47	2.06	4.43
13.15-13.30	5.60	5.36	2.39	4.45
12.30-13.30	5.29	5.07	2.08	4.15

Tabla N°28: Longitud de Cola en Intersección O'Higgins - Tucapel para Modelo de Validación V3.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V4			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	4.93	4.58	2.92	4.14
12.45-13.00	5.97	5.68	2.57	4.74
13.00-13.15	5.89	5.67	3.11	4.89
13.15-13.30	5.51	5.13	3.11	4.58
12.30-13.30	5.58	5.26	2.93	4.59

Tabla N°29: Longitud de Cola en Intersección O'Higgins - Tucapel para Modelo de Validación V4.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Promedios de Modelos de Validación				
	Observado	Modelo V1	Modelo V2	Modelo V3	Modelo V4
12.30-12.45	3.8	3.82	4.53	3.69	4.14
12.45-13.00	4.3	4.21	5.18	4.02	4.74
13.00-13.15	4.6	4.17	4.91	4.43	4.89
13.15-13.30	4.7	3.96	4.81	4.45	4.58
12.30-13.30	4.4	4.04	4.86	4.15	4.59

Tabla N°30: Longitud de Cola Promedio de Modelos de Validación en Intersección O'Higgins - Tucapel.

(Fuente: Elaboración Propia)

7.4 DETERMINACIÓN DE LA BONDAD DE AJUSTE DEL INDICE DE DESEMPEÑO

Las longitudes de cola que se analizan en esta intersección son mayores a las vistas anteriormente en la etapa de calibración, esto permite utilizar las ecuaciones de bondad de ajuste mostradas en el Capítulo VI (ecuaciones 6.1 y 6.2). Pero inicialmente se visualizan las diferencias entre los valores del índice de desempeño observado y modelado. Esto con el objeto de obtener una fácil comparación entre las etapas de calibración y validación. En las Tablas N° 31 a N°35 se observan estos resultados.

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V1			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-0.21	0.47	-0.08	0.06
12.45-13.00	-1.61	0.68	0.56	-0.13
13.00-13.15	-2.33	0.42	0.51	-0.47
13.15-13.30	-0.68	-1.11	-0.43	-0.74
12.30-13.30	-1.21	0.12	0.14	-0.32

Tabla N°31: Diferencia Asociada a Modelo V1 de Validación.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V2			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	0.54	1.13	0.62	0.76
12.45-13.00	-0.28	1.93	0.89	0.85
13.00-13.15	-1.29	1.19	0.94	0.28
13.15-13.30	0.19	-0.05	0.21	0.11
12.30-13.30	-0.21	1.05	0.66	0.50

Tabla N°32: Diferencia Asociada a Modelo V2 de Validación.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V3			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-0.53	0.21	0.09	-0.08
12.45-13.00	-1.88	0.56	0.38	-0.31
13.00-13.15	-1.74	0.67	0.46	-0.20
13.15-13.30	0.00	-0.54	-0.21	-0.25
12.30-13.30	-1.04	0.22	0.18	-0.21

Tabla N°33: Diferencia Asociada a Modelo V3 de Validación.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Diferencia Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V4			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-0.27	0.38	1.02	0.38
12.45-13.00	-1.03	1.18	1.07	0.41
13.00-13.15	-1.61	0.87	1.51	0.26
13.15-13.30	-0.09	-0.78	0.51	-0.12
12.30-13.30	-0.75	0.41	1.03	0.23

Tabla N°34: Diferencia Asociada a Modelo V4 de Validación.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Promedios de Modelos de Validación			
	Modelo V1	Modelo V2	Modelo V3	Modelo V4
12.30-12.45	0.06	0.76	-0.08	0.38
12.45-13.00	-0.13	0.85	-0.31	0.41
13.00-13.15	-0.47	0.28	-0.20	0.26
13.15-13.30	-0.74	0.11	-0.25	-0.12
12.30-13.30	-0.32	0.50	-0.21	0.23

Tabla N°35: Diferencias Promedio asociadas a Modelos de Validación en Intersección O'Higgins - Tucapel.

(Fuente: Elaboración Propia)

Por otro lado, el error como porcentaje en relación a lo real, se muestra en las Tablas N°36 a N°41.

Tramo	% de Error Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V1			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-4.1%	11.1%	-4.2%	1.5%
12.45-13.00	-23.0%	15.1%	37.0%	-2.9%
13.00-13.15	-31.1%	8.8%	31.9%	-10.1%
13.15-13.30	-12.2%	-18.8%	-16.7%	-15.8%
12.30-13.30	-17.6%	4.1%	12.0%	-6.8%

Tabla N°36: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V1.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	% de Error Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V2			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	10.4%	26.8%	32.5%	20.2%
12.45-13.00	-4.0%	42.9%	59.3%	19.6%
13.00-13.15	-17.2%	24.7%	58.9%	6.0%
13.15-13.30	3.4%	-0.9%	7.9%	2.4%
12.30-13.30	-1.8%	23.4%	39.6%	12.1%

Tabla N°37: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V2.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	% de Error Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V3			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-10.2%	5.0%	4.7%	-2.0%
12.45-13.00	-26.8%	12.3%	25.0%	-7.3%
13.00-13.15	-23.1%	14.0%	28.5%	-4.4%
13.15-13.30	0.0%	-9.1%	-8.1%	-5.3%
12.30-13.30	-15.0%	5.6%	12.5%	-4.8%

Tabla N°38: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V3.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	% de Error Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V4			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Promedio
12.30-12.45	-5.2%	9.1%	53.5%	10.0%
12.45-13.00	-14.7%	26.2%	71.3%	9.4%
13.00-13.15	-21.5%	18.1%	94.4%	5.5%
13.15-13.30	-1.5%	-13.1%	19.7%	-2.5%
12.30-13.30	-10.7%	10.1%	59.7%	5.6%

Tabla N°39: Porcentajes de Error en Longitud de Cola de Modelo de Validación V4.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Promedios de Modelos de Validación			
	Modelo V1	Modelo V2	Modelo V3	Modelo V4
12.30-12.45	1.5%	20.2%	-2.0%	10.0%
12.45-13.00	-2.9%	19.6%	-7.3%	9.4%
13.00-13.15	-10.1%	6.0%	-4.4%	5.5%
13.15-13.30	-15.8%	2.4%	-5.3%	-2.5%
12.30-13.30	-6.8%	12.1%	-4.8%	5.6%

Tabla N°40: Porcentajes de Error Promedio asociadas a Modelos de Validación.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo	Longitud de Cola Tucapel - Promedios de Modelos de Validación en Pista de Viraje			
	Modelo V1	Modelo V2	Modelo V3	Modelo V4
12.30-12.45	-4.1%	10.4%	-10.2%	-5.2%
12.45-13.00	-23.0%	-4.0%	-26.8%	-14.7%
13.00-13.15	-31.1%	-17.2%	-23.1%	-21.5%
13.15-13.30	-12.2%	3.4%	0.0%	-1.5%
12.30-13.30	-17.6%	-1.8%	-15.0%	-10.7%

Tabla N°41: Porcentajes de Error Promedio asociadas a Modelos de Validación en pista de viraje.

(Fuente: Elaboración Propia)

Como en esta intersección las longitudes de cola son mayores que en la intersección de Calibración, los índices de error EPPA (Error Promedio porcentual Absoluto) y ECM (Error Cuadrático Medio) indicados en el Capítulo VI se pueden utilizar de mejor manera, siendo una herramienta válida para determinar el grado de ajuste de la simulación. Las Tablas N°42 a N°45 muestran estos resultados.

Tramo 12.30-13.30	% de Ajuste Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V1			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Global
EPPA	28.0%	14.8%	20.8%	11.0%
ECM	23.3%	13.6%	18.9%	8.6%

Tabla N°42: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V1, por métodos EPPA y ECM.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo 12.30-13.30	% de Ajuste Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V2			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Global
EPPA	11.7%	20.9%	29.2%	12.1%
ECM	9.4%	18.0%	26.5%	10.3%

Tabla N°43: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V2, por métodos EPPA y ECM.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo 12.30-13.30	% de Ajuste Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V3			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Global
EPPA	24.4%	9.9%	15.7%	5.4%
ECM	19.5%	9.5%	13.9%	5.0%

Tabla N°44: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V3, por métodos EPPA y ECM.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tramo 12.30-13.30	% de Ajuste Longitud de Cola Tucapel - Modelo Validación V4			
	Pista 1	Pista 2	Pista 3	Global
EPPA	16.4%	15.5%	37.3%	6.9%
ECM	12.9%	14.9%	35.4%	6.4%

Tabla N°45: % de Ajuste asociado a Modelo de Validación V4, por métodos EPPA y ECM.

(Fuente: Elaboración Propia)

7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE VALIDACIÓN

Los ajustes observados en todos los modelos de validación se consideran buenos, llegando incluso a ajustes globales de 5% de error estimado. Se puede observar que los modelos que presentan peatones explícitos en la simulación (modelos V3 y V4) mejoran el ajuste con respecto a los modelos que no lo hacen, lo que justifica la incorporación de peatones en la modelación. Por otro lado, se observa que los modelos con parámetros calibrados en la hora punta mañana (Ortiz, 2006) subestiman las longitudes de cola, mientras que los modelos con parámetros de la hora punta mediodía las sobrestiman.

El mejor ajuste se da en el modelo de validación V3, que tiene parámetros de hora punta mañana e incorporación de peatones. El modelo V4 teóricamente debería poseer mejor ajuste, ya que presenta parámetros de hora punta mediodía e incorpora peatones en el modelo, pero las velocidades de circulación de Avenida Tucapel son mayores a las de Avenida Rengo, por lo que los parámetros del tráfico de la hora punta mañana de Rengo – O'Higgins son más cercanos a lo que sucede en la red de validación. De todos modos la diferencia en el ajuste de estos modelos es bastante pequeña.

En definitiva, la etapa de validación corrobora la incorporación de peatones a un modelo de simulación, como también los valores de los parámetros calibrados de autos, buses, colectivos y peatones. Pero también pone de manifiesto que en intersecciones donde no existen diferencias significativas de velocidad de circulación para diferentes horas punta, es posible determinar los parámetros característicos de la red cuando no existen flujos peatonales importantes, para luego incorporar o superponer estos flujos, obteniendo ajustes aceptables, tal como ocurre con el modelo de validación V3 de este trabajo.

CAPÍTULO VIII

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Este trabajo demuestra que es posible incorporar peatones en el modelo de microsimulación AIMSUN NG en condiciones de flujo mixto interrumpido de manera que representen el impacto de éstos sobre los vehículos.
- Se logra obtener un modelo calibrado para una intersección céntrica de Concepción que posea flujos peatonales y vehiculares importantes.
- Se corrobora que los modelos que incluyen la influencia peatonal en los cruces, presentan mayores ajustes en las salidas de la modelación.
- Los parámetros peatonales que caracterizan mejor y que son más determinantes en una simulación de este tipo, son la velocidad de circulación y el tiempo de reacción en reposo.
- La modelación calibrada entrega resultados satisfactorios en el comportamiento vehicular afectado por los peatones (pistas de viraje), no así de los peatones propiamente tales, cuestión bastante esperable al considerar que el software trata al peatón de la misma forma que vehículo motorizado, lo que restringe una mejor simulación peatonal.
- El error porcentual no es un buen indicador para trabajar con valores bajos de longitud de cola. Un análisis basado en las diferencias es más adecuado. Esto se debe a los bajos valores de longitud de cola que se dan especialmente en la intersección de calibración.
- Es posible observar que los parámetros calibrados en la hora punta mañana (Ortiz, 2006) representan flujos vehiculares más expeditos que los calibrados en la hora punta mediodía. Esto se debe en parte a la presencia de altos flujos peatonales, que intervienen de variadas formas en el comportamiento de los conductores.

8.2 COMENTARIOS

- Se observa que los parámetros propios de los peatones ingresados a los modelos no son tan relevantes como la forma de modelar el fenómeno de interacción entre vehículos y peatones.
- Para la medición de flujos peatonales se hace absolutamente necesario la utilización de sistemas de grabación en altura, pues en terreno y tiempo real esta tarea es muy compleja y poco confiable para altos volúmenes de peatones.
- Los anchos de pista vehiculares son relevantes en este tipo de simulaciones, pues de estos anchos dependen la longitud de las pistas peatonales y por lo tanto cuanto tiempo estarán obstaculizando el flujo vehicular.
- Existen varios comportamientos peatonales que no son replicados por Aimsun, debido a su poca especialización en ellos. Tales como, la posibilidad de realizar movimientos inesperados, retrocesos o bruscos cambios de velocidad; la utilización de zonas libres en el cruce, en que los peatones se crucen fácilmente sin seguir estrictamente una vía; entre otros. La implementación de estos elementos al software mejoraría las posibilidades de modelación, lo que posibilitaría obtener resultados más precisos.
- La modelación de peatones en un modelo de simulación como el mostrado en este trabajo, tiene aplicaciones variadas. Una de ellas es la posibilidad de cuantificar los conflictos que se producen en un viraje vehicular con los peatones que cruzan la intersección a través del conteo de ocasiones en que un vehículo que gira debe parar, disminuir su velocidad o cambiar de pista para no atropellar a un peatón. En general, esta aplicación no se limita a los virajes, sino que puede ser ocupada en todos los movimientos de una intersección.
- Se observó que el software de simulación Aimsun no utiliza un submodelo de parada de locomoción colectiva acorde con lo que sucede en Concepción, que se observa en la necesidad de no utilizar desviaciones estándar de tiempos de llegada y detenciones en paradas. El punto en análisis no es de menor importancia si se considera el alto flujo de locomoción colectiva en Concepción y en Chile en general, por lo tanto mejorar este aspecto del software permitiría potenciar las capacidades del simulador.

8.3 RECOMENDACIONES GENERALES

- Se propone, para posteriores versiones del simulador, un desarrollo más detallado de los modelos de comportamiento que rigen a los peatones. De este modo será posible modelar de manera más real una intersección y permitirá mayores herramientas en la gestión de tránsito peatonal.
- O en su defecto la elaboración de un software especializado en la modelación microscópica de intersecciones incluyendo de lleno el comportamiento de peatones en una intersección, ya sea semaforizada o no.

8.4 RECOMENDACIONES SOBRE LA INCORPORACIÓN DE FLUJO PEATONAL A UN MODELO DE MICROSIMULACIÓN

La forma recomendada para incorporar peatones en modelos de calibración del software Aimsun NG, para flujo interrumpido, considera los siguientes puntos, según este estudio:

- Incorporar en el modelo de simulación, un buen trazado o dibujo de la intersección, incluyendo el correcto ancho de calles, espacios peatonales de espera y líneas de detención vehiculares principalmente.
- Utilizar en las intersecciones, vías internas para los vehículos que giran. De este modo no se observarán autos o buses pasando por encima de peatones, y además los vehículos podrán esperar allí cuando sean obstaculizados por los peatones.
- Semaforizar el cruce peatonal, al menos en secciones donde efectivamente sea el ciclo del semáforo lo que controle el andar de los peatones.
- Utilizar pequeñas pistas de ancho cercano a 0.8 m para que sean ocupadas por los peatones que cruzan. Estas vías no pueden ser bidireccionales por lo que se deberán poner unas sobre otras. Es decir, encima de la vía peatonal de cruce de Norte a Sur, se debe ubicar la de cruce Sur a Norte.

Los parámetros peatonales determinados en este trabajo son mostrados en la Tabla N°46. Los parámetros vehiculares determinados anteriormente por Ortiz, 2006, y que se utilizaron en este trabajo se observan en la Tabla N°47. Y por último, la Tabla N°48 muestra los parámetros vehiculares calibrados en este trabajo para la hora punta mediodía y su valor para la hora punta mañana, según Ortiz.

Categoría	Parámetro	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo
Atributos Vehiculares	Aceptación del Límite de Velocidad	1	0	0.99	1
	Mínima Distancia entre Peatones (m)	0.2	0.15	0.05	0.35
	Largo de Vehículos (Peatones) (m)	0.5	0.1	0.4	0.5
	Máxima Velocidad (Km/h)	5.2	1.0	3.5	8.3
Globales	Tiempo de Reacción (s)	0.9			
	Tiempo de Reacción en reposo (s)	1.4	0.7	0.5	4.3

Tabla N°46: Parámetros Peonales calibrados para la ciudad de Concepción.

(Fuente: Elaboración Propia)

Categoría	Parámetro	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo
Atributos Vehiculares	Mínima Distancia entre Autos (m)	2.16	0.82	0.66	4.47
	Mínima Distancia entre Buses (m)	1.98	0.86	0.4	3.94
	Largo de Autos (m)	4.65	0.51	3.68	5.81
	Largo de Buses (m)	8.2	1.3	7	10
	Ancho de Autos (m)	1.68	0.08	1.48	1.86
	Ancho de Buses (m)	2.3	0.12	2	2.6
	Máxima Aceleración Deseada Autos(m/s ²)	2	0.3	1.6	2.6
	Máxima Aceleración Deseada Buses(m/s ²)	1.89	0.44	1.06	3.08
	Desaceleración Normal Autos (m/s ²)	2.3	0.7	1.5	4.9
	Desaceleración Normal Buses (m/s ²)	2.5	0.7	1.79	4.56

Tabla N°47: Parámetros Vehiculares calibrados para la ciudad de Concepción.

(Fuente: Ortiz, 2006)

Categoría	Parámetro	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo
Globales - Hora Punta Mediodía	Tiempo de Reacción (s)	0.9			
	Tiempo de Reacción en reposo Autos(s)	1.2	0.57	0.53	3.05
	Tiempo de Reacción en reposo Buses(s)	1.41	1.01	0.87	5.31
	Tiempo de Reacción en reposo Colectivos(s)	1.02	0.81	0.61	3.92
Globales - Hora Punta Mañana	Tiempo de Reacción (s)	0.9			
	Tiempo de Reacción en reposo Autos(s)	1.21	0.61	0.54	3.32
	Tiempo de Reacción en reposo Buses(s)	1.15	0.53	0.53	2.69

Tabla N°48: Parámetros Globales calibrados para la ciudad de Concepción en hora punta mediodía y hora punta mañana.

(Fuente: Ortiz, 2006 y Elaboración propia)

BIBLIOGRAFÍA

- DE LA FUENTE L. (2004) Calibración y Análisis de Parámetros Peatonales para la Ciudad de Concepción. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1978) A Pedestrian Planning procedures Manual
- GONZALEZ R. (2005) Calibración del Microsimulador Aimsun para Flujo Ininterrumpido en la Ciudad de Concepción. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
- HOURDAKIS J., MICHALOPOULOS P., KOTTOMMANNIL J. (2002) A practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. University of Minnesota.
- LACALLE M. (2003) Calibración del Microsimulador Aimsun para Flujo Interrumpido en la Ciudad de Santiago. Tesis Magíster Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- MIDEPLAN – Ministerio de Planificación y Cooperación (1998) Redevu - Recomendaciones para el Diseño del espacio Vial Urbano
- MTT – Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (1988) Manual de Señalización de Tránsito
- ORTIZ L. (2006) Calibración de un Modelo de Microsimulación para Flujo Mixto Interrumpido, con Aplicación a la Ciudad de Concepción. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
- TSS – Transport Simulation Systems (2005) Aimsun 5.0 Microsimulator User's Manual Version 5.0.6
- TSS – Transport Simulation Systems (2005) Aimsun NG User's Manual Version 1.0.6
- VELASCO L. (2004) Calibración de Parámetros Básicos Vehiculares para Flujo Interrumpido en Modelos de Simulación Microscópica: Getram en Santiago. Tesis Magíster Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.