

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Comisión de Investigación y Extensión

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DEPARTAMENTO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL
INDUSTRIAL**

**PROGRAMA INDIVIDUAL DE MAESTRÍA EN SISTEMAS
DE CONTROL**

**ANÁLISIS DE TRÁFICO VEHICULAR EN UNA ZONA CRÍTICA DE
LA CIUDAD DE QUITO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN SISTEMAS
DE CONTROL**

Ing. ÓSCAR EFRAÍN CERÓN AGUIRRE

SUPERVISOR: Prof. C. PATRICIO BURBANO R. M.Sc.

Quito, Octubre 2007

DECLARACIÓN

Yo ÓSCAR EFRAÍN CERÓN AGUIRRE, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ing. Óscar Efraín Cerón Aguirre

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de Tesis fue desarrollado por ÓSCAR EFRAÍN CERÓN AGUIRRE, bajo mi supervisión.

Prof. C. Patricio Burbano R. M.Sc.
SUPERVISOR DEL PROGRAMA

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional, que me ha dado la oportunidad de formarme y trabajar para su engrandecimiento, así como a sus autoridades quienes han dado todo su apoyo al Proyecto de Investigación y sobre todo a mi Programa Individual de Maestría.

Debo hacer extensivo mi agradecimiento al Departamento de Automatización y Control Industrial, al cual me pertenezco con mucho orgullo, y que por medio de su Jefe he recibido el auspicio al Programa Individual de Maestría.

Agradezco el esfuerzo y la comprensión de mis colegas M.Sc. Ramiro Valenzuela y M.Sc. Orwield Guerrero, quienes gentilmente aceptaron formar parte del Comité del Programa Individual de Maestría y han contribuido a que este trabajo de Tesis llegue a feliz término, tal como se había planificado.

Un agradecimiento muy particular a mi Supervisor, Prof. Ing. Patricio Burbano M.Sc., por su paciencia y enorme ayuda en todo el proceso de investigación y en el desarrollo de esta Tesis, quien no ha escatimado ni esfuerzo ni tiempo y ha puesto a disposición todos sus conocimientos.

Agradezco a todos quienes han sabido entender el reto que he tomado y reconocen mi dedicación y esfuerzo.

DEDICATORIA

Con todo mi corazón dedico este trabajo a mi amada y abnegada esposita Fanny Alicia y a mis encantadores hijos Lennin, Christian, Gabrielita y Pablito, por quienes he realizado este esfuerzo. No puedo olvidarme de mis tiernos nietos Camilita y Martin, así como de Pauli y de todos mis seres queridos y mis familiares, quienes de una u otra forma me han dado el aliento para ir avanzando día a día en conseguir la meta propuesta.

Dedico este trabajo a quién ha sido el inspirador y promotor de todo un largo proceso hasta su culminación en este trabajo de Tesis, al buen colega y sobre todo al gran amigo, Patricio Burbano, un profesional a carta cabal.

Óscar

CONTENIDO

	Pág.
PRESENTACIÓN	vi
RESUMEN	ix
 CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	1
 1.1 MODELACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR	 3
1.2 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE TRÁFICO VEHICULAR	9
 CAPÍTULO 2	
CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO VEHICULAR	14
 2.1 COMPONENTES DEL TRÁFICO VEHICULAR	 14
2.2 VARIABLES ASOCIADAS A LA DINÁMICA DEL TRÁFICO VEHICULAR	16
2.2.1 VOLUMEN DE TRÁNSITO	17
2.2.2 VELOCIDAD	18
2.2.3 FLUJO VEHICULAR	20
 2.3 MEDIDAS DE EFECTIVIDAD DEL FLUJO VEHICULAR	 23
2.3.1 CAPACIDAD VIAL	23
2.3.2 NIVELES DE SERVICIO	25
2.3.3 NIVEL DE CONGESTIÓN	28
2.3.4 PLAN DE CONTROL	29
2.3.5 CARACTERÍSTICAS E INDICADORES DE COMPORTAMIENTO	29

2.4 DESCRIPCIÓN DEL FLUJO VEHICULAR	31
2.4.1 FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD	31
2.4.2 PROCESO DE POISSON Y LA DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL	33
2.4.3 PROCESOS ESTOCÁSTICOS	34
2.4.4 CADENAS DE MARKOV DE TIEMPO DISCRETO	36
2.4.5 DESCRIPCIÓN PROBABILÍSTICA DEL FLUJO VEHICULAR	37
CAPÍTULO 3	
CONSTRUCCIÓN DE MODELOS	40
3.1 MODELOS DE FLUJO VEHICULAR	40
3.1.1 MODELOS BÁSICOS	40
3.1.2 MODELOS MACROSCÓPICOS	43
3.1.3 MODELOS MICROSCÓPICOS	45
3.2 MODELOS USANDO TEORÍA DE COLAS	47
3.2.1 MODELOS M/M/1	50
3.3 MODELACIÓN DE UNA RED DE TRÁFICO URBANO	54
3.3.1 MODELO DE INTERSECCIÓN SEÑALIZADA	56
3.3.2 MODELO DE VÍAS	58
3.3.3 SEÑALIZACIÓN PARA EL CONTROL DE FLUJO VEHICULAR	60
3.3.4 ATRIBUTOS DE TIEMPO CONTINUO Y DE EVENTOS DISCRETOS	63
3.4 MODELOS USANDO REDES PETRI	65
3.4.1 REDES PETRI ORDINARIAS	65
3.4.2 REDES PETRI TEMPORALIZADAS	68
3.5 MODELOS DE SIMULACIÓN POR COMPUTADOR	71
3.5.1 MODELO DE FLUJO Y CONGESTIÓN	72
3.5.2 MODELO DE SIMULACIÓN	74
3.5.3 PARÁMETROS	77

3.5.4 MEDICIONES	78
------------------------	----

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR	80
--	-----------

4.1 SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DEL TRÁFICO

VEHICULAR	80
------------------------	-----------

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR	81
--	-----------

4.3 EDICIÓN DE LA SIMULACIÓN	85
---	-----------

4.3.1 DEFINICIÓN DE LA ZONA CRÍTICA	85
---	----

4.3.2 SECCIONES E INTERSECCIONES	85
--	----

4.3.3 PLAN DE CONTROL	87
-----------------------------	----

4.3.4 DETECTORES	90
------------------------	----

4.3.5 DEMANDA DE TRÁFICO	90
--------------------------------	----

4.3.6 CORRIDA DE SIMULACIONES	94
-------------------------------------	----

4.3.7 REPORTES DE SALIDA	98
--------------------------------	----

4.4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	101
--	------------

4.4.1 CALIBRACIÓN USANDO AIMSUN	102
---------------------------------------	-----

4.4.2 VALIDACIÓN USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS	103
--	-----

4.5 SIMULACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS	105
---	------------

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DEL TRÁFICO VEHICULAR	107
---	------------

5.1 COMPONENTES DE ANÁLISIS DEL TRÁFICO

VEHICULAR	108
------------------------	------------

5.1.1 VALIDACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN	109
---	-----

5.1.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL FLUJO VEHICULAR	110
---	-----

5.1.3 NIVEL DE SERVICIO	111
5.1.4 CONDICIONES DE CIRCULACIÓN	112
5.2 MEDIDAS DE EFECTIVIDAD DEL COMPORTAMIENTO DE TRÁFICO VEHICULAR	112
5.2.1 INDICADORES DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO	113
5.3 MEDICIONES DE TRÁFICO VEHICULAR	116
5.3.1 MEDICIONES UTILIZANDO CÁMARAS DE VIDEO	117
5.3.2 DATOS DE FLUJO PROVISTOS POR LA EMSAT.....	119
 CAPÍTULO 6	
RESULTADOS DE SIMULACIÓN	121
6.1 SIMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO 1 USANDO REDES PETRI	121
6.2 SIMULACIÓN USANDO EL SIMULADOR AIMSUN	125
6.2.1 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO 1	127
6.3 RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO	131
6.3.1 CASO DE ESTUDIO 1	131
6.3.2 CASO DE ESTUDIO 2	134
6.3.3 CASO DE ESTUDIO 3	136
6.4 RESULTADOS DEL NIVEL DE SERVICIO EN LOS CASOS DE ESTUDIO 1, 2 Y 3	141

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	145
---	------------

7.1 CONCLUSIONES	145
-------------------------------	------------

7.2 RECOMENDACIONES	147
----------------------------------	------------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
---	------------

PRESENTACIÓN

En las dos últimas décadas se produce un considerable incremento en el volumen del parque automotor, particularmente en el Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito, debido en gran medida a la quiebra financiera ecuatoriana y posteriormente a la dolarización de la economía.

El caos del sistema financiero ecuatoriano redujo de una manera importante la confianza de la población en los bancos y los demás componentes del sistema, obligando a la población económicamente activa a invertir en bienes raíces. La incertidumbre acompañada de un relativo aumento del circulante monetario y la capacidad adquisitiva, generada por la dolarización, ha creado una avalancha en la demanda y oferta de vehículos. Se estima que en el año 2004 se vendieron alrededor de 50000 vehículos en todo el país, de los cuales un alto porcentaje fueron adquiridos por los quiteños [19].

La Planificación, Administración y Servicios de Transporte, aparece como una necesidad emergente, la misma que es asumida por la Empresa Municipal de Servicios y Administración de Transporte (EMSAT) [17].

El Tráfico Vehicular, especialmente urbano, es un sistema complejo debido a la cantidad de componentes que participan en él y a sus diferentes interacciones entre sus elementos. Así, el Distrito Metropolitano de Quito, tiene una estructura geográfica e infraestructura vial muy desfavorables, a lo que se suma el inadecuado sistema de control, desorden en el transporte público y privado, falta de planificación y la poca educación vial que presentan sus usuarios, entre otros.

La cantidad de vehículos es tal que la capacidad vial en muchas zonas de la ciudad de Quito se han visto saturadas, provocando frecuentes congestiones, por lo que si no se toman los correctivos necesarios para su parcial o total solución, se podría llegar a una situación crítica en el Tráfico Vehicular, que podría repercutir en la actividad económica y social; razón por la cual en el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI), a través del Área de

Circuitos, Control e Inteligencia Artificial (CCIA) se planteó el compromiso de responder de alguna manera a esta necesidad palpable, a través de acciones con el Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes y Aplicaciones (GISIA) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Convenio EPN - EMSAT, ejecución del Proyecto de Investigación PIC – 075, auspiciado por SENACYT - FUNDACYT “Modelación, Simulación y Control de Tráfico Vehicular (MSCTV)” [19]; con el objeto de estudiar los Sistemas de Tráfico Vehicular y obtener modelos simples que puedan describir de manera adecuada el flujo de tráfico urbano en ciertas Zonas Críticas de congestión en la ciudad de Quito, mejorar el Nivel de Servicio, aumentar la seguridad, disminuir la contaminación y costos de operación.

Además se presentan y desarrollan en este tópico, dos Tesis de Maestría Individual por investigación en la EPN. La actividad realizada en los Programas Individuales de Maestría da el soporte teórico y de aplicación a las Zonas Críticas del Proyecto de investigación mencionado.

Es así como, en esta Tesis se realiza una descripción de la dinámica del Tráfico Vehicular, que consiste de: selección de zonas representativas, construcción de modelos, simulación utilizando un software profesional y análisis considerando diferentes condiciones de circulación.

Este trabajo de Tesis generó la presentación de dos papers internacionales: “Urban Traffic Hybrid Model” y “Vehicular Traffic Flow Simulation”, al XVII Congreso Internacional de la Asociación Chilena de Control Automático, la realización de un Seminario Taller “Tecnologías para el Control y Administración de Tráfico Vehicular” en la ciudad de Quito [41]; así como también la obtención de resultados de Simulación que permiten tener los criterios para el control del Tráfico Vehicular.

Inicialmente se profundiza en la fundamentación teórica de modelos de Tráfico Vehicular a nivel microscópico y macroscópico.

Luego se utiliza el simulador profesional para un trabajo de experimentación, bajo diferentes condiciones de circulación en el Laboratorio.

Se complementa con un análisis de Tráfico Vehicular aplicado a zonas representativas de la ciudad de Quito utilizando mediciones de campo, concluyendo con los resultados de simulación.

RESUMEN

Los aspectos más importantes que se consideran en el desarrollo de esta Tesis, son los siguientes:

Desarrollo de modelos de Tráfico Vehicular usando variables principales, Redes Petri, Teoría de Colas y Modelos de Simulación.

Uso del simulador profesional AIMSUN para la Calibración, Validación y Verificación de modelos de simulación de Zonas Críticas en la ciudad de Quito.

Análisis Dinámico y de Nivel de Servicio en las Zonas Críticas seleccionadas bajo diferentes condiciones de circulación y con perturbaciones.

Control en lazo abierto a través de Planes de Control semafórico y señalizaciones para el ordenamiento del Tráfico Vehicular.

La introducción a la metodología, seguida de la construcción de modelos para análisis y control de Tráfico Vehicular, presentando herramientas y características de modelación y simulación, es el contenido del Capítulo 1.

El Capítulo 2 refleja el estudio del Tráfico Vehicular, considerando sus componentes y variables asociadas, analizando las características dinámicas y las medidas de efectividad del flujo vehicular, complementándose con la descripción probabilística del flujo vehicular, bajo diferentes enfoques.

El Capítulo 3 aborda las herramientas para la modelación y construcción de modelos, mencionando los básicos, microscópicos y macroscópicos del flujo vehicular. Presenta un análisis particular con la Teoría de Colas y las Redes Petri, añadiendo modelos de simulación por computador de Tráfico Vehicular en Zonas Críticas de la ciudad de Quito, con el detalle de mediciones en zonas representativas.

El Capítulo 4 presenta una descripción del simulador que se utiliza en el modelo de simulación, considerando los diferentes pasos y componentes de edición del modelo relacionado con las Zonas Críticas de la ciudad de Quito, describiendo las técnicas de Calibración y Validación del modelo de simulación.

El análisis dinámico de Tráfico Vehicular y el Nivel de Servicio, considerando condiciones de circulación y estrategias de control generales, es el contenido del Capítulo 5, donde hay un análisis del Tráfico Vehicular en base al simulador, con lo que se obtienen medidas de efectividad a través de indicadores del Comportamiento Dinámico, detallando las mediciones de campo por medio de cámaras de video y datos proporcionados por la EMSAT.

En el Capítulo 6 detalla los resultados de la simulación en las Zonas Críticas de la ciudad de Quito, seleccionadas previamente. Aparece la validación de los modelos, así como el análisis del Comportamiento Dinámico en base a la consideración de perturbaciones y condiciones de circulación, con el análisis de sus efectos; complementando con la construcción de la matriz Origen – Destino en una de las zonas seleccionadas.

Finalmente el Capítulo 7 presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este trabajo de Tesis es realizar el análisis de Tráfico Vehicular en Zonas Críticas de la ciudad de Quito (ZC-Q), para lo cual es necesario hacer un recorrido de las diferentes etapas requeridas para dicho análisis, orientado a la toma de decisiones y al control, según se muestra en la figura 1.1.

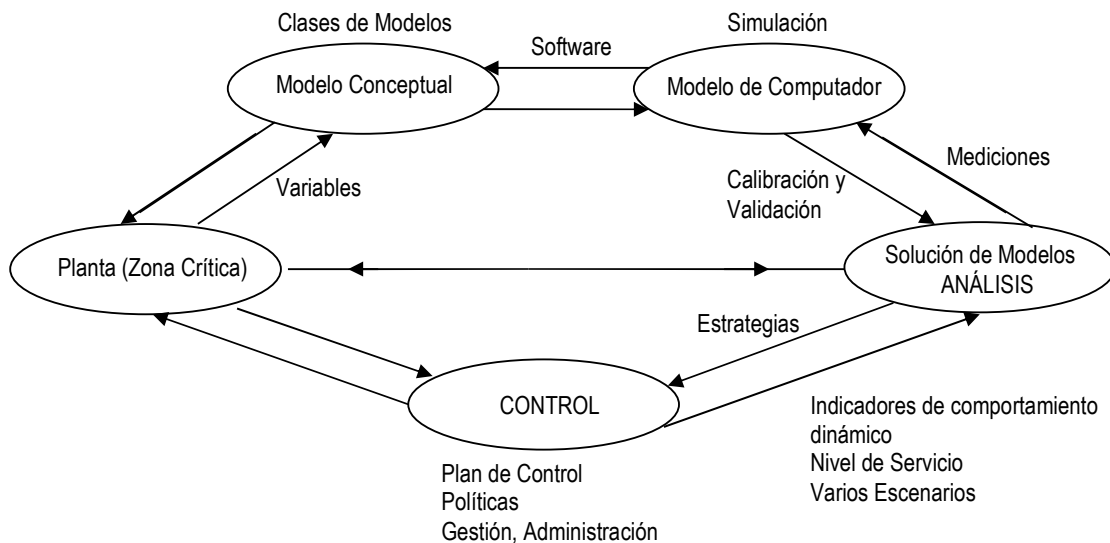


Figura 1.1 Etapas en el análisis del Tráfico Vehicular

Cabe señalar que este trabajo no afronta directamente el Plan de Control, Políticas, Gestión, ni Administración del Tráfico Vehicular.

Las distintas etapas a desarrollarse, de manera resumida, están explicadas a continuación.

Inicialmente es necesario conocer el comportamiento dinámico del sistema físico natural o planta, que en el presente caso constituyen las ZC-Q, que sean representativas para efectos de simulación. En esta fase es necesario considerar la estructura geométrica de las vías, las intersecciones señalizadas y no señalizadas, los aspectos de movilización, etc.

También es necesario describir las diferentes variables del Tráfico Vehicular tanto principales: flujo, velocidad, densidad; como secundarias y sus relaciones, así como un análisis estadístico del mismo.

Una vez familiarizados con el comportamiento del Tráfico Vehicular en sus componentes más importantes, corresponde detallar la metodología y las herramientas utilizadas para la construcción de los modelos, por un lado y el análisis mediante simulación, por otro lado.

Para la elaboración del modelo conceptual aparecen: la Teoría de Colas, las Redes Petri y los Modelos de Simulación. Ensayos de diferentes modelos, utilizando variables tales como: flujos y densidades (modelos macroscópicos), longitudes de colas y tiempos de espera con la Teoría de Colas; y, sistemas continuos y de eventos discretos con las Redes Petri.

Para la implementación de un modelo por computador son necesarias dos herramientas: mediciones mediante cámaras digitales de video o también observaciones del tipo estadístico; y, para la simulación un software de desarrollo, como el Toolbox de Redes Petri del Matlab; y, para las ZC-Q un software profesional como el AIMSUN [40], que permite manejar un gran número de vías, nodos y diferentes escenarios. Aquí aparece la calibración y validación del modelo por computador.

Una vez validado el modelo es necesario, para el análisis del Comportamiento Dinámico, la determinación del Nivel de Servicio en los nodos de las ZC-Q y la simulación de diferentes condiciones de circulación con y sin perturbaciones.

1.1 MODELACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR

La Modelación puede realizarse utilizando modelos caja blanca (modelación física), esto es partiendo del Comportamiento Dinámico y utilizando principios físicos, matemáticos y de Ingeniería de Tráfico [10], [22], [24]. Otra forma de abordar este problema es considerando modelos caja negra (modelación estadística), o sea a través de mediciones de entrada y salida que describen la dinámica de la planta y que por un procedimiento de identificación, permita obtener mediante una técnica computacional modelos entrada – salida, como por ejemplo usando Mínimos Cuadrados o Redes Neuronales [12], [33]. Cuando los sistemas son complejos y la descripción de los principios físicos no son suficientes, es necesario utilizar modelos caja gris (modelación semi - física) [5], [32], en los que el ajuste de parámetros vía identificación, están hechos en ciertas partes del modelo o en los parámetros, donde no existe una suficiente precisión, tal como sucede en la descripción de modelos caja blanca.

El presente trabajo utiliza el primer enfoque, es decir parte de los principios físicos del Comportamiento Dinámico del Tráfico Vehicular. Existen en la literatura modelos desarrollados en base a la consideración de la dinámica de fluidos [6], [25]. En este trabajo se trata de buscar modelos alternativos.

En la modelación del Tráfico Vehicular, las características fundamentales del flujo vehicular están representadas en sus tres variables principales: flujo, velocidad y densidad. Mediante las diferentes relaciones entre ellas, quedan determinadas las características de la corriente de tránsito. La calidad o nivel de servicio experimentado por los usuarios de cualquier sistema vial, está determinado por indicadores relacionados con estas tres variables, las que a su vez pueden ser expresadas en términos de otras, llamadas variables asociadas o secundarias como: volumen, intervalo, espaciamiento, distancia y tiempo.

En vista de que el Tráfico Vehicular no es uniforme y varía en tiempo y espacio, cualquier medición de variables de interés para describir el flujo, es en realidad un proceso de muestreo de variables aleatorias; por lo que al hablar de variables de

flujo, velocidad y densidad, éstas en realidad constituyen los parámetros de distribuciones estadísticas y no números absolutos.

Las mediciones de flujos en puntos específicos, son realizadas en un intervalo de tiempo. El flujo se define como el número de vehículos contados dividido para el tiempo transcurrido.

La medición de velocidad requiere de igual forma de observaciones en tiempo y espacio [4]. Para que los resultados sean teóricamente correctos, es necesario el uso de la velocidad media espacial, la misma que está definida como la velocidad promedio de todos los vehículos en un tramo de vía.

La densidad es el número de vehículos por longitud de vía (concentración en el espacio) y tiene su sinónimo llamado ocupación (concentración en el tiempo). La ocupación tiene que ver con el tiempo promedio de permanencia de los vehículos dentro de los sensores (detectores).

Los modelos de Tráfico Vehicular han estado sujetos a varias controversias respecto a su validez y aplicabilidad a los problemas reales de flujo, es así que la única ley física relacionada con el flujo vehicular, es la ecuación de conservación del número de vehículos, por lo que todos los modelos creados hasta el momento, reflejan ya sea idealizaciones intuitivas o aproximaciones deducidas de observaciones empíricas [3], [7].

Existen diversas formas de clasificar a los modelos dinámicos de flujo vehicular, de acuerdo al nivel de detalle, si son continuos o discretos, determinísticos o estocásticos, analíticos o simulados; de acuerdo al número de carriles en las vías de carreteras o urbanas, según las características de cruces, así como la consideración de perturbaciones [21], [22], etc.

Si la clasificación es según el grado de detalle, están los modelos microscópicos y modelos macroscópicos. Los microscópicos describen el comportamiento de los conductores y vehículos de forma individual y con un alto nivel de detalle; un cambio de carril está descrito como una cadena de decisiones que toma el

conductor. Los macroscópicos estudian el comportamiento de los vehículos a gran escala, asumiendo que el accionar de los conductores depende de las condiciones de tráfico y utilizan variables como el flujo, la velocidad y la densidad. Las maniobras de cambio de carril específicamente no están modeladas.

Puesto que los modelos de Tráfico Vehicular se identifican con los sistemas dinámicos, se clasifican en: modelos de tiempo continuo, los que describen los estados continuos del sistema de tráfico en respuesta a un estímulo continuo; y, los modelos de tiempo discreto, los que asumen que los cambios de estado son en instantes discretos de tiempo.

Los modelos determinísticos consideran variables definidas mediante relaciones exactas, mientras que los modelos estocásticos incorporan procesos que tienen variables aleatorias.

Los modelos de acuerdo al uso, son analíticos cuando requieren una solución analítica, o de simulación para una solución que dependa de la herramienta computacional disponible. Los modelos microscópicos son ideales para la simulación fuera de línea, los mismos que se conocen como Simuladores Microscópicos de Tráfico Vehicular (*Microscopic Traffic Simulator* MITSIM).

Considerando que los modelos de Tráfico Vehicular son sistemas dinámicos de características de tiempo continuo (vías) y de tiempo discreto (intersecciones señalizadas); implica una combinación con los atributos de los Sistemas de Eventos Discretos (*Discret Event Systems* DES), para las estrategias de control, cuyo propósito es reducir la congestión del tráfico, así como la minimización tanto de las colas como del tiempo de espera en las intersecciones.

El evento es la representación de un cambio instantáneo en alguna parte de un sistema, el mismo que puede caracterizarse por un valor y un instante en el que ocurre. El valor puede ser un número, un vector, una palabra o en general, un elemento cualquiera de un conjunto determinado. En resumen, un cambio en el estado de un sistema es llamado evento.

Los modelos de estado discreto son conocidos como modelos de eventos discretos. Los DES son aquellos cuyo comportamiento entrada – salida pueden ser descritos por una secuencia de eventos, sujetos a que tengan un número finito de cambios, en cualquier intervalo finito de tiempo.

Los sistemas de colas son una clase importante de los sistemas dinámicos de eventos discretos, definidos como un conjunto de subprocesos interconectados en una red, dentro de la cual la actividad fluye de un subproceso a otro.

Los DES son representados a través de los Grafos de Eventos, que es una representación gráfica de los estados y la relación entre estos. La utilidad de estos grafos de eventos radica en su capacidad de modelación y análisis de la dinámica de un DES, puesto que con su configuración pueden representar las relaciones existentes entre los cambios en los valores de las variables de estado [8], [18].

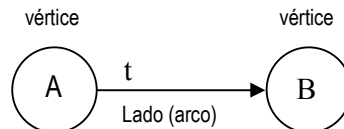


Figura 1.2 Grafo dirigido de eventos.

En un grafo de eventos, los vértices representan los cambios de estado que resultan cuando un evento particular ocurre, y los lados las relaciones lógico - dinámicas entre tales cambios.

El grafo está definido por la terna (V, L, ϕ) , donde V y L son conjuntos finitos de elementos llamados vértices y lados respectivamente, a la vez que ϕ es una función que asigna a cada elemento de L un par de elementos $\{a, b\}$ de V .

Si los lados tienen un sentido estricto, los vértices toman el nombre de nodos y los lados el de arcos, y el grafo es llamado Gráfico Bipartito, siendo éste la base de la modelación de las Redes Petri (*Petri Net* PN) [42].

La aplicación al Tráfico Vehicular está dada por el hecho de que los semáforos son dispositivos secuenciales, que pueden ser modelados utilizando PN. Al combinar los atributos de eventos discretos de los semáforos, con los atributos de tiempo continuo del flujo vehicular, aparecen las Redes Petri Híbridas (*Hybrid Petri Net HPN*) [28].

Las PN son modelos matemáticos que sirven para la descripción y análisis de estados y transiciones (gráficos bipartitos) de un sistema. A través de su estructura matemática es posible modelar el comportamiento y las características de un sistema, para la descripción de la dinámica del proceso [11]. Su estructura está representada en la figura 1.4.

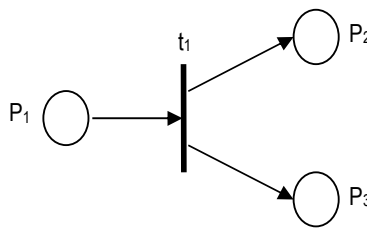


Figura 1.4 Estructura básica de una Red Petri

Los elementos de esta estructura básica de PN son los lugares (círculos), las transiciones (barras) y los arcos (flechas).

La modelación, el análisis formal y el diseño de un DES están relacionados con las PN, puesto que éstas son simuladoras de eventos discretos.

Se consideran las PN ordinarias, como estructuras que describen la lógica del sistema modelado, pero no su evolución en el tiempo. Para el análisis del comportamiento temporal de un DES, el tiempo es introducido en las PN, dando lugar a las Redes Petri Temporalizadas (*Timed Transition Petri Net TTPN*), éstas pueden ser determinísticas o estocásticas. Si en la figura 1.4, los lugares se cambian por doble círculo y las transiciones por rectángulos, esta figura corresponde a una TTPN.

Puesto que una combinación de las características discretas y continuas da lugar a la HPN [8], ésta es utilizada en el análisis del comportamiento dinámico del tráfico, lo que permite describirlo como un fluido, considerando al mismo tiempo la dinámica discreta de la semaforización y su influencia sobre la dinámica del flujo, lo que conduce a la obtención de un modelo de Tráfico Vehicular.

Adicionalmente, los eventos discretos aplicados al Tráfico Vehicular, están asociados a un fenómeno de filas de espera (Teoría de Colas).

Los modelos de sistemas de colas responden a un enfoque estocástico de los sistemas de tráfico en general. Su configuración está mostrada en la figura 1.3.

Los elementos más importantes de un sistema de colas son: la llegada, la cola, el servicio y la salida. En general un sistema de colas consiste de uno o varios servidores que prestan un servicio a uno o varios usuarios, que acceden al sistema. El proceso de llegadas está controlado por una fuente reguladora de usuarios y, en general, estas llegadas serán de forma aleatoria [11].

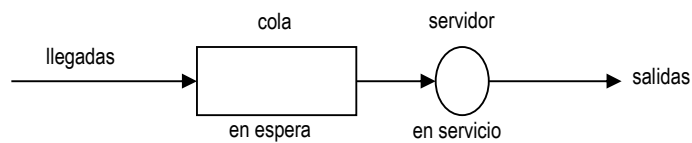


Figura 1.3 Estructura de un sistema de colas

Interesa saber el intervalo de tiempo entre las llegadas de dos usuarios consecutivos. Además, según sea el proceso de llegadas, los usuarios pueden llegar individualmente o en grupos. Si cuando un usuario llega al sistema, el servidor está libre, se le da servicio. Si el tiempo de servicio es mayor que el intervalo entre llegadas, el siguiente usuario, cuando accede al sistema, encuentra que el servidor está ocupado, por lo que debe quedar en espera formando la cola.

En la mayoría de los sistemas de colas, el proceso de llegadas sigue una

distribución de Poisson, que describe procesos Markovianos (procesos estocásticos que dependen sólo del estado anterior). Bajo esta circunstancia, está demostrado que la duración del intervalo entre llegadas tiene una distribución exponencial.

Por otro lado, los modelos de simulación de los sistemas de Tráfico Vehicular, por la naturaleza y complejidad, reflejan el comportamiento de los sistemas basados en una representación de eventos en espacio y tiempo, y la naturaleza estocástica del tráfico, debida a la acción de los conductores y a las perturbaciones. Estos modelos consideran la estructura de una red vial, la información de la demanda de tráfico, que puede ser considerada por medio de flujos de tráfico en las secciones o por matrices Origen – Destino (O/D) en una zona específica, el control de tráfico y el movimiento de los vehículos.

En este trabajo de Tesis, para efectos de análisis de una ZC-Q, se utiliza la herramienta de simulación AIMSUN NG (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks*) [40]. AIMSUN es un simulador microscópico de tráfico, que abarca diferentes redes de tráfico tales como redes urbanas, autopistas, carreteras, circunvalaciones, redondeles y variadas combinaciones. El simulador ha sido diseñado e implantado como una herramienta para el análisis de tráfico y como ayuda para la evaluación y diseño de sistemas de tráfico.

Existen reportes de que el AIMSUN es una herramienta muy útil para probar nuevos sistemas de control de tráfico y políticas de administración y gestión [1], tanto basadas en tecnologías tradicionales como en la implementación y operación de Sistemas de Transportación Inteligentes (*Intelligent Transportation Systems ITS*).

1.2 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE TRÁFICO VEHICULAR

Una red vial, cualquiera que sea su diseño, debe soportar un flujo vehicular máximo y una densidad máxima, condiciones definidas por las dimensiones de las

vías, el número de carriles, así como también las condiciones de tráfico que tienen que ver con los tipos de giros, sentidos de circulación, paradas restringidas, estacionamientos, normativas de tránsito, etc., es decir todas aquellas características que definen el sentido y dirección del flujo.

El comportamiento del Tráfico Vehicular, depende también del sistema de gestión semafórica, el mismo que debe garantizar la mejor circulación posible. Estos sistemas son básicamente Centros de Control de Tráfico, que deben aplicar políticas de control adaptables a las circunstancias del tráfico en cada momento y lugar [14].

Las distintas estrategias de control están sujetas a investigaciones de campo, basadas en aforos, modelos de distribución del flujo observado y en asignaciones realizadas en estudios de planificación, lo que permite generar modelos de flujo de tráfico representativos que se aproximan a la realidad, apoyados en formatos de simulación, que sirven en la toma de decisiones [1].

En general, los modelos de optimización de semáforos así como los modelos de simulación, que permiten entender el comportamiento del Tráfico Vehicular, están concebidos en ambientes donde se respetan las normas de tránsito y se toman en cuenta las características inherentes tanto del conductor como del vehículo.

No siempre será posible agrupar todos los factores que modelen el comportamiento del Tráfico Vehicular, sin embargo se crean varios escenarios para predecir los efectos que pueden provocar una serie de perturbaciones, como: accidentes, bloqueo de vías, construcciones, mantenimiento, etc.

Por estas razones, los modelos dinámicos son importantes para entender el comportamiento del Tráfico Vehicular, y éstos son construidos en base a un número reducido de vías e intersecciones. En situaciones reales los modelos dinámicos para las ZC son inmanejables, por lo que es necesario construir un modelo de simulación.

El análisis de Tráfico Vehicular, considera dispositivos de control de tránsito, que

tienen que ver con las intersecciones señalizadas, que dan lugar a un comportamiento de eventos discretos (secuencial), que puede ser descrito por los DES [2]. También el análisis del flujo vehicular está hecho a través de las variables principales: flujo, velocidad y densidad, así como de sus variables relacionadas, que poseen características espaciales y temporales.

A nivel de paquetes computacionales de desarrollo aparecen: el CSIM (simulador en lenguaje C), que es una herramienta de desarrollo de simulaciones orientadas a procesos para modelos de eventos discretos; el MITSIM y a nivel comercial el TRANSYT (*TRAffic Network StudY Tool*), el SCOOT (*Split Cycle Offset Optimization Technique*) [15], el AIMSUN [40], etc.

Este trabajo de Tesis utiliza el simulador AIMSUN, por sus ventajas de modularidad y generalidad para el análisis, la evaluación y la aplicación de controladores. Adicionalmente el AIMSUN tiene la posibilidad de manejo de rutinas para modificar las condiciones de simulación para propósitos de implementación de estrategias de control (*Application Programme Interface API*), situación que es de vital importancia para la toma de decisiones, administración y operación de los sistemas de Tráfico Vehicular.

La aplicación de los modelos de simulación está hecha sobre ZC-Q representativas, con algún nivel de congestión, utilizando mediciones de presencia en intersecciones, con cámaras de video y datos proporcionados por la EMSAT, para la calibración, validación y verificación del modelo de simulación.

El trabajo contempla algunas ZC-Q, en las cuales existe información. Una ZC sencilla, sobre la que se estudia la dinámica del sistema de Tráfico Vehicular. Una ZC más amplia, que incluye varios nodos para probar la eficiencia del software de simulación y disponer de resultados parciales para la calibración y validación. Una ZC más compleja, sobre la cual se analizan indicadores de Comportamiento Dinámico.

El simulador AIMSUN sigue un método de simulación microscópico, que significa que cada vehículo dentro de la red, es continuamente modelado y monitoreado

dentro del período de simulación, mientras viaja a través del circuito de tráfico. El modelo considera básicamente dos componentes: aceleración y desaceleración. Además contempla la excitación, la respuesta y la velocidad relativa, dando lugar al Modelo Siga al Líder (*Car-following*) y Cambio de Carril (*Lane-changing*). El Plan de Control aparece como un DES que incluye una intersección señalizada o no (movimientos y/o fases), para el mejoramiento de la dinámica del Tráfico Vehicular. El modelo contiene atributos de tiempo continuo (vías e intersecciones) y de eventos discretos (semáforos).

Es un software de simulación adecuado, porque permite asignar diferentes parámetros del sistema y del usuario, e implementar diferentes escenarios para analizar el comportamiento dinámico de una ZC, con el propósito de introducir alternativas en la operación de un Sistema de Tráfico Vehicular.

El AIMSUN puede ser implementado usando información de demanda de tráfico o información mediante matrices O/D, ambas trabajan con flujos promedios, típicamente flujos horarios. Sin embargo es posible tratar con información estadística como distribuciones de flujo y distribuciones de arribos y salidas, para un análisis de colas. Requiere de la localización de sensores en las secciones de las vías, con el propósito de medir el comportamiento dinámico; estos sensores son utilizados para calibrar el modelo de la ZC.

En este trabajo la simulación está basada en mediciones de flujos, obtenidas mediante video cámaras Traficam Setup Software (*Video Image Processor VIP*) [39], conteo manual y datos proporcionados por la EMSAT. Estas mediciones a su vez sirven para el análisis del Comportamiento Dinámico del Tráfico Vehicular.

El análisis estadístico de la información es utilizado en la Validación y Verificación del modelo, tomando en cuenta ciertas condiciones de flujo y colas. Un análisis estadístico de flujo también sirve para realizar un análisis de congestión.

Existen diferentes formas de obtener reportes de resultados en AIMSUN, ya sea para el caso determinístico como para el caso estocástico. Permite analizar datos de un vehículo (usuario) en particular y Series de Tiempo (sistema) mientras corre

la simulación. Se manejan distintos estilos para mostrar los resultados, ya sea mediante Tablas o Gráficos en las secciones y nodos de la ZC. Es posible colorear secciones y nodos de la Red, usando algún criterio o mediante etiquetas [40].

Los resultados de la simulación en AIMSUN aparecen mediante atributos dinámicos y estáticos de un vehículo. Los atributos estáticos muestran identificación, origen, destino, parámetros y la trayectoria seguida por el vehículo [9]. Los atributos dinámicos están referidos a la velocidad, flujos, colas a través de Series de Tiempo, como por ejemplo la velocidad de un vehículo, la velocidad en secciones de vías.

Los estilos y modos, que presenta el AIMSUN, permiten visualizar valores promedio de flujos, velocidades, ocupación en secciones de vía, etc. Las variables son seleccionadas de diferente forma e inclusive pueden ser comparadas utilizando Series de Tiempo.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO VEHICULAR

2.1 COMPONENTES DEL TRÁFICO VEHICULAR

Para analizar el Tráfico Vehicular, es necesario definir conceptos relativos a la Ingeniería de Tránsito y Transporte, así: [10]

Tránsito es la acción de ir o pasar (moverse) de un punto a otro por vías, calles o parajes públicos.

Transporte o transportación es la acción y efecto de trasladar a personas o cosas de un lugar a otro. Está relacionado con costos directos e indirectos y su productividad.

Tráfico es el tránsito de personas y circulación de vehículos por calles, carreteras, caminos, etc.

Ingeniería de Transporte: “aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planificación, al proyecto funcional, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el fin de prever la movilización de personas y mercancías de una manera segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente”.

Ingeniería de Tránsito: “aquella fase de la Ingeniería de Transporte que tiene que ver con la planeación, el proyecto geométrico y la operación de tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros medios de transporte”.

La Ingeniería de Tránsito es aquella a la que le concierne específicamente el aspecto funcional de la vialidad y el movimiento de vehículos y peatones [10]. Los siguientes aspectos formalizan a esta clase de Ingeniería.

Características del tránsito: pone en evidencia la influencia de la capacidad y limitaciones de los usuarios en el tránsito, estudia al usuario (peatón o conductor) y sus reacciones desde el aspecto psíquico-físico, señalando la rapidez a la aceleración, frenado, maniobra, etc., considera las variables de flujo, velocidad y densidad; atiende al aspecto geométrico de las vías, así como el origen y destino del movimiento, etc.

Reglamentación de tránsito: relacionado con el aspecto técnico, considera el grado de responsabilidad del usuario; el peso, dimensiones de vehículos y sus accesorios; prioridad del paso, sentidos de circulación, zonificación de la velocidad, limitaciones de tiempo de estacionamiento, entre otros.

Otros aspectos inherentes a la Ingeniería de Tránsito tienen que ver con la Planificación vial y la Administración del Transporte público y privado.

Por otro lado, los elementos básicos relacionados con el usuario son los peatones y conductores, mientras que los relacionados con el vehículo y la vialidad son las calles o carreteras (vías). Prácticamente todas las personas son consideradas como peatones, constituyéndose parte de la solución y del problema del tránsito.

Los conductores están caracterizados por sus facultades de reacción física y psíquica. Estas facultades pueden estar afectadas por factores como la fatiga, enfermedad, drogas, estado emocional, el clima, época del año, etc.

El vehículo es el elemento importante para establecer los lineamientos del proyecto geométrico de las vías e intersecciones. Se clasifican en vehículos ligeros o livianos (autos) y vehículos pesados (buses, camiones), tanto públicos como privados.

Las vías son las franjas de terreno acondicionadas para el tránsito de vehículos,

llamadas comúnmente carreteras a nivel rural y calles a nivel urbano. El diseño geométrico de las vías tiene que ver con los volúmenes horarios de tránsito, el tipo de vehículos y la velocidad, para fijar las normas geométricas de las vías. La red vial óptima debe atender las necesidades de movilidad y accesibilidad de los usuarios.

Los dispositivos para el control del tránsito, son las señales (preventivas, restrictivas, informativas), marcas (rayas, símbolos, letras), semáforos (vehiculares, peatonales, especiales) y cualquier otro dispositivo que se coloque sobre o adyacente a las vías, para prevenir, regular y guiar a los usuarios. Estos dispositivos tienen la intención de satisfacer una necesidad, llamar la atención, transmitir un mensaje simple y claro, imponer respeto a los usuarios y estar ubicado en un lugar adecuado para su visualización.

En cuanto a leyes, políticas y reglamentaciones del tránsito y transporte, la ciudad de Quito cuenta con la Dirección Nacional de Tránsito (DNT) de la Policía Nacional del Ecuador, a través de su Departamento de Ingeniería de Tránsito y Señalización [16]; y la Empresa Municipal de Servicios y Administración de Transporte (EMSAT) [17].

2.2 VARIABLES ASOCIADAS A LA DINÁMICA DEL TRÁFICO VEHICULAR

El Comportamiento Dinámico del Tráfico Vehicular, es descrito mediante un fundamento teórico que utiliza variables principales, tales como flujo, velocidad y densidad, considerando indicadores de Niveles de Servicio, sobre un análisis de flujo y congestión, a través de modelos macroscópicos y microscópicos.

Las teorías de Tráfico Vehicular buscan describir de una manera matemática precisa, las interacciones entre vehículos, sus operadores y la infraestructura, que consiste en las vías por donde circulan los vehículos y todos sus elementos operacionales, como por ejemplo semáforos, señalización y otros [9], [10].

Los modelos analíticos de la dinámica de redes de Tráfico Vehicular, comprenden métodos a ecuaciones diferenciales con un enfoque macroscópico y microscópico, generalmente de segundo orden, de sección de longitud finita y *Car following* respectivamente, Redes Petri Híbridas (HPN), determinísticas y estocásticas [42], así como la Teoría de Colas [23], [11].

La dinámica del flujo de Tráfico Vehicular en una red de tráfico urbano, tiene que ver con el Nivel de Servicio en vías: flujos y colas, el Plan de Control en las intersecciones: fases y ciclos [15]. El Nivel de Servicio está determinado por la demanda de tráfico, los ciclos y tiempos de verde apropiados, la capacidad de las vías y carriles, el volumen total (ocupación espacial) y el tráfico horario; elementos con los cuales se analiza el comportamiento a través de las medidas de efectividad, como son: categorías, variables e indicadores.

El Plan de Control de una red de tráfico urbano introduce las intersecciones, requiere de una secuencia de eventos modelados a través de un DES, utiliza grupos de señales, fases y movimientos. Un adecuado Plan de Control da lugar a una buena Calidad de Servicio [28].

2.2.1 VOLUMEN DE TRÁNSITO [8]

Los sistemas de Tráfico Vehicular son sistemas dinámicos, constituidos por medios físicos y estáticos del tránsito, tales como vías (carreteras y calles), intersecciones, terminales, etc. Están sujetos a ser solicitados y a ser utilizados por volúmenes de tránsito, los cuales poseen características o atributos espaciales (ocupan un lugar) y temporales (consumen un tiempo).

Las distribuciones espaciales de los volúmenes de tránsito resultan de la necesidad del desplazamiento entre determinados orígenes y destinos. Las distribuciones temporales de los volúmenes de tránsito, se deben a los estilos y forma de vida, que determinan patrones de viaje basados en el tiempo (ciertas épocas del año, horas específicas del día, etc.).

Los estudios sobre volúmenes de tráfico, se realizan con el propósito de obtener información sobre el movimiento de vehículos, sobre puntos o secciones específicas dentro de un sistema vial (ZC). Los datos de volúmenes de tránsito se expresan con respecto al tiempo y su conocimiento permite estimaciones razonables de la calidad de servicio [10].

El volumen de tránsito es el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados de una vía, durante un período determinado.

$$Q = N/T \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde: **Q** número de vehículos por unidad de tiempo (vehículos/período)

N número total de vehículos que pasan (vehículos)

T período determinado (unidades de tiempo).

El volumen de tránsito **Q** es considerado como un parámetro que mide la concentración en el tiempo (ocupación).

La duración del período determinado define diferentes tipos de volúmenes de tránsito absolutos o totales; entre otros está el tránsito horario, que es el número total de vehículos que pasan durante una hora, y la tasa de flujo o flujo **f** que es el número total de vehículos que pasan durante un período inferior a una hora ($T < 1$ hora). Típicamente está el uso de las variaciones horarias del volumen del tránsito, con valores promedio en forma de tablas o gráficos, que muestran el Comportamiento Dinámico durante el día.

2.2.2 VELOCIDAD [8]

La velocidad es uno de los principales indicadores utilizados para medir la calidad de operación a través de un sistema de transporte. Desde que se inventaron los medios de transporte, los conductores desde un enfoque individual, miden parcialmente la calidad de su viaje por su habilidad y libertad en conservar

uniformemente la velocidad deseada. La velocidad es estudiada, regulada y controlada con el objeto de conseguir un adecuado equilibrio entre el conductor, vehículo y vía, de manera que garantice la seguridad y las condiciones de la zona.

La velocidad a la que fluye el Tráfico Vehicular es un importante indicador en la operación de un sistema de transporte. Ciertamente está bajo el control del conductor.

La velocidad es considerada desde el punto de vista temporal y desde el punto de vista espacial. La primera es la velocidad promedio de los vehículos que pasan por un mismo punto en un intervalo de tiempo determinado, lo que refleja una distribución temporal de velocidades. La segunda es la velocidad promedio de los vehículos que en un instante determinado se encuentran en un tramo de vía, con lo que se consigue una distribución espacial de velocidades y está dada por:

$$\bar{v}_e = \frac{d}{t} \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde: d distancia dada o recorrida

\bar{t} tiempo promedio de recorrido

Cabe señalar que existe una velocidad global, donde incluye una velocidad de marcha (velocidad promedio del vehículo en movimiento) y todas las demoras operacionales, ajenas a la voluntad del conductor, ésta sirve básicamente para comparar condiciones de fluidez del Tráfico Vehicular.

Al realizar un análisis estadístico de las velocidades, utilizando distribuciones de frecuencias, las tendencias dan lugar a un histograma, cuyo polígono es semejante a la distribución de Gauss.

La velocidad instantánea de los vehículos en un punto de la vía, es el referente en la toma de una muestra suficientemente representativa de los vehículos que transitan por dicho punto, bajo condiciones preestablecidas de tráfico, estado del tiempo, etc. La figura 2.1 muestra un ejemplo de la distribución estadística de la

velocidad promedio por hora, correspondiente a una zona seleccionada por la EMSAT, durante las 24 horas del 2 de Mayo de 2006.

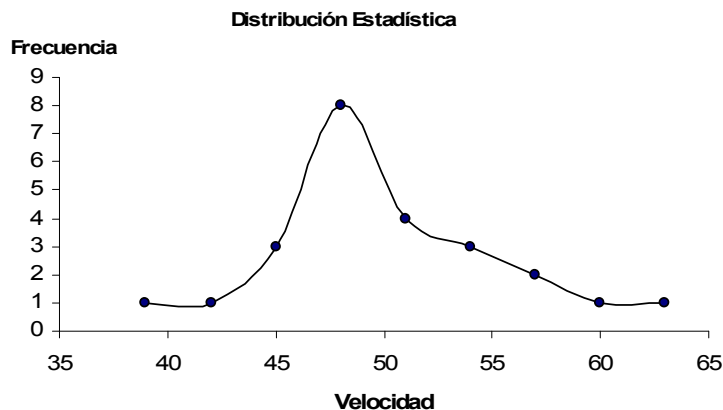


Figura 2.1 Frecuencias de velocidades en un punto de vía

2.2.3 FLUJO VEHICULAR [8]

El análisis de flujo vehicular permite entender las características y el comportamiento del tránsito y la forma como circulan los vehículos en cualquier sistema vial, lo cual permite determinar el nivel de eficiencia del tráfico [10]. Este análisis además ayuda al desarrollo teórico de los modelos macroscópicos y microscópicos, que relacionan sus diferentes variables como: volumen, velocidad, densidad, intervalo y espaciamiento.

También el análisis del flujo vehicular está enfocado desde una descripción probabilística o aleatoria del flujo de tránsito, usando las distribuciones estadísticas de los vehículos en las vías, que son empleadas en la planificación y control de tránsito.

Los principales conceptos relacionados con las variables del flujo vehicular son la tasa de flujo, el volumen, el intervalo simple entre vehículos consecutivos y el intervalo promedio entre varios vehículos.

La tasa de flujo f , es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto, sin embargo puede ser expresada en vehículos por hora (diferente al volumen horario Q).

Intervalo simple h_i , es el intervalo de tiempo entre el paso de dos vehículos consecutivos, generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

Intervalo promedio \bar{h} , es el promedio de todos los intervalos simples h_i , expresado en segundos por vehículo.

$$\bar{h} = 1/f \quad \text{Ec. 2.3}$$

Las variables relacionadas con la velocidad tienen que ver con la densidad, el espaciamiento simple entre vehículos consecutivos y el espaciamiento promedio entre varios vehículos.

Densidad ρ , es el número N de vehículos que ocupan una longitud específica d de una vía, en un momento dado, viene expresada en vehículos por kilómetro (veh/km), referido a un carril o a todos los carriles de una vía; se calcula mediante:

$$\rho = N/d \quad \text{Ec. 2.4}$$

Espaciamiento simple s_i , es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, expresados en metros y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

Espaciamiento promedio \bar{s} , es el promedio de todos los espaciamientos simples s_i , existentes entre los diversos vehículos que circulan por la vía, viene dado en metros por vehículo (m/veh):

$$\bar{s} = 1/\rho \quad \text{Ec. 2.5}$$

Considerando un grupo vehicular con una velocidad \bar{v}_e (aproximadamente constante), el tiempo \bar{h} y el espacio \bar{s} , están relacionados mediante:

$$\bar{s} = \bar{v}_e \cdot \bar{h} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Haciendo los reemplazos pertinentes en las ecuaciones anteriores, se llega a la conocida Ecuación Fundamental del flujo vehicular:

$$\mathbf{f} = \bar{v}_e \cdot \rho \quad \text{Ec. 2.7}$$

cuya forma general está dada por:

$$\mathbf{f} = \mathbf{v} \cdot \rho \quad \text{Ec. 2.8}$$

Esta ecuación es el punto de partida para analizar las características y modelos básicos de Tráfico Vehicular, a través de sus tres variables principales: flujo \mathbf{f} , velocidad \mathbf{v} y densidad ρ .

La variable de fácil medición es el flujo \mathbf{f} , siguiéndole en su orden la velocidad \mathbf{v} y la densidad ρ , por esta razón usualmente la densidad ρ es considerada como variable dependiente.

Uno de los objetivos finales del análisis del flujo vehicular (a través de sus modelos y la simulación) radica en el mejoramiento de la operación de los sistemas de tráfico existentes, que recae en la selección de las mejores condiciones de operación, sujeto a las condiciones de la zona.

Los indicadores de comportamiento o medidas de efectividad, inherentes al criterio de optimización que dan lugar a la función objetivo, están asociados a las variables principales de flujo, velocidad y densidad, lo que da lugar a las llamadas variables de decisión o control.

Es necesaria la acción de control sobre algunos componentes del sistema de Tráfico Vehicular, lo que permite el mejoramiento de los índices de comportamiento. Para ello es necesario el manejo de modelos de Tráfico Vehicular y su simulación, para una vez entendido el Comportamiento Dinámico abordar el aspecto de control.

Los modelos de flujo vehicular están enfocados en dos grandes grupos: microscópicos, que consideran los espaciamientos y las velocidades individuales de los vehículos, con base en la teoría de seguimiento vehicular (*Car following*), y macroscópicos que describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios.

2.3 MEDIDAS DE EFECTIVIDAD DEL FLUJO VEHICULAR

Un flujo vehicular dentro de un sistema vial, funciona aceptablemente bien cuando la magnitud del flujo, circulando a una velocidad razonable, es menor que la capacidad del sistema; en otras palabras, cuando el sistema tiene la suficiente capacidad (oferta) para alojar el flujo vehicular presente (demanda) sin demoras excesivas para los usuarios. Cuando los valores de los flujos vehiculares están muy próximos a la capacidad, el tránsito se satura y la congestión se hace presente. Más aún los flujos vehiculares inferiores a la capacidad, que circulan a velocidades bajas y densidades altas, representan condiciones de operación forzada, que incluso pueden llegar a detenciones forzadas del tránsito, produciendo bajos niveles de operación [8].

2.3.1 CAPACIDAD VIAL [8]

Un estudio de la capacidad de un sistema vial, es al mismo tiempo un estudio cuantitativo y cualitativo, que permite evaluar la suficiencia (cuantitativo) y la

calidad (cualitativo) del servicio ofrecido por el sistema (oferta) a los usuarios (demanda).

Para determinar la capacidad de un sistema vial, no sólo es necesario conocer sus características físicas o geométricas, sino también las características de los flujos vehiculares, bajo una variedad de condiciones físicas y de operación.

La capacidad u oferta es una medida de la eficiencia con la que un sistema vial presta servicio a la demanda de tránsito, presente o futura, considerada como una cantidad conocida. El propósito que generalmente se persigue, es el de determinar la calidad del servicio que presta un cierto tramo o componente de arteria.

Teóricamente está definida como la tasa máxima de flujo (f_{max}), que puede soportar una carretera o calle. Entonces, la capacidad de una infraestructura vial es el máximo número de vehículos que pueden pasar por un punto o sección uniforme de un carril o calzada, durante un intervalo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control.

El intervalo de tiempo utilizado en la mayoría de los análisis de capacidad, es de 15 minutos, debido a que en este intervalo de tiempo, puede presentarse un flujo estable. Además los sistemas viales de circulación discontinua tienen elementos fijos que producen interrupciones periódicas del flujo del tránsito, tales como los semáforos, las señales de alto y otros tipos de regulación.

La capacidad en una intersección con semáforo, para cada acceso, está definida como la tasa de flujo máximo, que puede pasar a través de la intersección, bajo condiciones prevalecientes de:

- Del tránsito, donde incluyen volúmenes por tipo de movimiento (izquierda, directo, derecha), composición vehicular (automóviles, autobuses, camiones), maniobras de estacionamiento, conflictos peatonales y paradas de autobuses.

- La calle, que describen las características geométricas de los accesos en términos del número y ancho de los carriles.
- El semáforo, que consideran la secuencia de fases, asignación de tiempos y el tipo de operación o control.

La determinación de la capacidad de un grupo de carriles está ligada al uso del concepto de flujo de saturación f_{max} , definida como la tasa máxima de flujo en un acceso o grupo de carriles, que puede pasar a través de la intersección, bajo las condiciones prevalecientes del tráfico y la calle, suponiendo que tiene el 100% del tiempo disponible de verde efectivo. Está expresada en vehículos por hora de luz verde (vphv).

2.3.2 NIVELES DE SERVICIO [8], [9]

El concepto de Nivel de Servicio, al igual que el de la dinámica de Tráfico Vehicular, se usa para medir la calidad del flujo vehicular (demanda de tráfico), un apropiado ciclo y tiempo de verde, la capacidad de la vía, el volumen total (ocupación) y el tráfico horario. Es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular, tales como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial.

Los factores que afectan el Nivel de Servicio, son clasificados en internos y externos. Los factores internos corresponden a las variaciones de velocidad, volumen, composición del tránsito, movimiento en las intersecciones, etc. Los externos corresponden a las características geométricas, perturbaciones y diferentes condiciones de circulación. Para sistemas viales de circulación continua o discontinua, aparecen diferentes Niveles de Servicio [10], en general se tiene:

- A)** Una circulación a flujo libre, cuando los vehículos están exentos de la presencia de otros, poseen alta libertad de circulación.

- B)** Un flujo estable, donde se empieza a observar otros vehículos integrantes de la circulación, disminuye un poco la libertad de maniobra.



A)

B)

Figura 2.2 Niveles de Servicio a bajo flujo

- C)** Un flujo estable, pero la operación de los usuarios individuales se ve afectada de forma significativa por las interacciones con otros usuarios.

- D)** Una densidad elevada con un flujo estable, con una velocidad y libertad de maniobra que se ven seriamente restringidas.



C)

D)

Figura 2.3 Niveles de Servicio a flujo medio

- E)** El funcionamiento está cerca al límite de su capacidad, la velocidad de todos se ve reducida a un valor bajo, bastante uniforme. La libertad de maniobra es extremadamente difícil, la circulación es normalmente inestable, debido a que los pequeños aumentos de flujo o ligeras perturbaciones del tránsito producen colapsos.
- F)** Representa condiciones de flujo forzado, se forman colas y la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, las mismas que se tornan muy inestables.



E)

F)

Figura 2.4 Niveles de Servicio a flujo alto

El Nivel de Servicio en una intersección con semáforo se define a través de las demoras, las cuales representan para el usuario una medida del tiempo perdido de viaje, del consumo de combustible, de la incomodidad y de la frustración. Viene expresado en términos de la demora media por vehículo, debido a las detenciones. Para un periodo de análisis de 15 minutos [10], son válidos los siguientes Niveles de Servicio, relacionados con un intervalo de operación con demoras:

- a) Muy bajas, menores de 5.0 segundos por vehículo. La mayoría de vehículos llegan durante la fase verde y no se detienen del todo.
- b) Entre 5.1 y 15.0 segundos por vehículo. Algunos vehículos comienzan a

detenerse.

- c) Entre 15.1 y 25.0 segundos por vehículo. La progresión del tránsito es regular y algunos ciclos empiezan a perderse.
- d) Entre 25.1 y 40.0 segundos por vehículo. Las demoras pueden deberse a la mala progresión del tránsito, o llegadas en la fase roja, o longitudes de ciclo amplias. Muchos vehículos se detienen y se hace más notable la pérdida de ciclos.
- e) Entre 40.1 y 60.0 segundos por vehículo. Las demoras son provocadas por progresiones pobres o ciclos muy largos.
- f) Superiores a 60.0 segundos por vehículo. Los flujos de llegada exceden la capacidad de la intersección, lo que ocasiona congestión y operación saturada.

2.3.3 NIVEL DE CONGESTIÓN [8], [9]

El objetivo de la modelación, la simulación y el análisis del Tráfico Vehicular es diseñar, operar y controlar los sistemas viales, de tal manera que las demoras inducidas a los usuarios sean mínimas. En los períodos de máxima demanda, el movimiento vehicular va tornándose deficiente con pérdidas de velocidad, lo que hace que el sistema tienda a saturarse, hasta llegar a funcionar a niveles de congestionamiento, con las consiguientes demoras y colas asociadas.

Las demoras pueden causarlas los dispositivos para el control de tránsito, al interrumpir el flujo; las ocasionadas por la misma corriente vehicular en situaciones de flujo continuo, que constituyen condiciones de circulación; y, también aquellas debidas a perturbaciones en el sistema del flujo vehicular, tales como accidentes, vehículos parados, lluvia, etc.

Para el caso de los dispositivos de control de tránsito, todos los tipos de semáforo así como las señales de alto y ceda el paso, producen detenciones en un viaje normal. En el caso de las perturbaciones, las demoras son periódicas provocadas por los llamados cuellos de botella, durante las mismas horas del día. Las demoras no periódicas (perturbaciones) son producto de incidentes (accidentes o vehículos descompuestos) o cierres eventuales de una vía o algún carril de la vía.

En condiciones de congestionamiento, donde los patrones de llegada y servicios son altos, los enfoques a nivel macroscópico son los que más se aproximan a este fenómeno, describiendo la operación vehicular en función de sus variables de flujo, generalmente tomados como promedios.

2.3.4 PLAN DE CONTROL [9]

Una Red Urbana de tráfico introduce intersecciones y requiere de una secuencia de eventos para administrar un grupo de señales, fases y tiempos de acceso. Esta categoría incluye la modelación de un control de tráfico y un Plan de Control para cada intersección. Señales especiales tales como paradas, ceda el paso, siempre deben ser consideradas en la simulación. Un adecuado Plan de Control da lugar a una buena calidad de servicio de tráfico.

2.3.5 CARACTERÍSTICAS E INDICADORES DE COMPORTAMIENTO [8]

Las características de un sistema vial están determinadas por las condiciones prevalecientes de sus componentes estructural y operacional. El componente estructural tiene que ver con las condiciones de la infraestructura vial, referida a las características físicas de la vía: número de carriles, accesos, características geométricas, continuas y discontinuas.

El aspecto operacional está determinado por la distribución del tránsito en el

tiempo y en el espacio, esto es, las concentraciones, la distribución de flujos vehiculares, la velocidad de los vehículos en las vías, los Niveles de Servicio y la congestión determinada por las colas y los tiempos de espera. Este aspecto operacional considera las condiciones de control, en relación a los semáforos y señales restrictivas.

El análisis del nivel de eficiencia o de funcionalidad de un sistema vial contempla categorías, variables e indicadores que determinan la calidad del servicio y la obtención de medidas de efectividad.

La tabla 1.1, muestra una síntesis de las categorías con sus variables e indicadores, relacionados con el sistema y el usuario, para sistemas de Tráfico Vehicular señalizados.

Tabla 1.1 Medidas de efectividad del comportamiento del Tráfico Vehicular.

Categoría	Variable	Indicador
Nivel de servicio	flujo	f_{max} flujo máximo f tasa de flujo
	velocidad	v_t velocidad media temporal v_e velocidad media espacial
	concentración	Q volumen horario ρ densidad k ocupación
Congestión	Demanda	λ tasa de llegadas
	Servicio	μ tasa de salidas
	Cola	n longitud promedio de vehículos, sistema q longitud promedio de línea de espera, usuario
	Demora	t_s tiempo promedio gastado, sistema t_q tiempo promedio en línea de espera, usuario
	Probabilidad	$P(t_s \leq t)$: prob. de gastar un tiempo t_s , sistema $P(t_q \leq t)$: prob. de gastar un tiempo t_q , usuario
Semáforo	Fases	f movimientos de flujo φ fases
	Ciclos	g duración de verde r duración de rojo a duración de ámbar

2.4 DESCRIPCIÓN DEL FLUJO VEHICULAR

Es importante realizar la descripción del flujo vehicular para conocer algunas metodologías y las aplicaciones más importantes sobre este tema, con un particular énfasis en los aspectos que relacionan las variables del flujo vehicular, la descripción probabilística del flujo de tránsito, las distribuciones estadísticas y el control de tránsito.

Existen enfoques determinísticos, en los que se realizan cálculos precisos de variables en función de otras variables que toman ciertos valores específicos, enfoques estocásticos, en los que se considera al flujo como un fenómeno aleatorio.

2.4.1 FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

En razón de que el flujo vehicular no es uniforme, entonces es considerado como un proceso aleatorio, por lo que su análisis desemboca en el campo estadístico, considerando el aspecto probabilístico y los procesos estocásticos.

Así, la probabilidad está asociada con la ejecución de un *experimento*, cuyos *resultados* ocurren de forma aleatoria. El conjunto de todos los resultados de un experimento está definido como el *espacio muestra* y cualquier subconjunto del espacio muestra es llamado *evento*.

Los resultados de un experimento son naturalmente numéricos y están representados sobre una escala numérica. La representación numérica de los resultados es definida como *variable aleatoria*.

Una variable aleatoria x , puede ser *discreta* o *continua*, la misma que está asociada con una *función densidad de probabilidad* $p(x)$ o $f(x)$ respectivamente,

esta función a la vez asigna medidas de probabilidad a las variables aleatorias [20].

La función densidad de probabilidad debe satisfacer las siguientes condiciones:

Discreta Rango de acción: $x = a, a + 1, \dots, b$

Condiciones: $p(x) \geq 0$ $\sum_{x=a}^b p(x) = 1$ Ec. 2.9

Continua Rango de acción: $a \leq x \leq b$

Condiciones: $f(x) \geq 0$

$$\int_a^b f(x) dx = 1$$
 Ec. 2.10

La *media* de x , $E(x)$ es una medida numérica de tendencia central de los datos (o suma ponderada) de la variable aleatoria.

La *varianza* de x , $\text{var}(x)$ es una medida de la dispersión de x alrededor de la media $E(x)$. A la vez es la medida de *dispersión* o de *variación aleatoria* alrededor del valor de la media. También es la medida del *grado de incertidumbre*, en el sentido de que al tener una varianza de valor alto, se pensaría en una variable de carácter probabilística en vez de determinística.

Discreta $E(x) = \sum_{x=a}^b xp(x)$ $\text{var}(x) = \sum_{x=a}^b [x - E(x)]^2 p(x)$ Ec. 2.11

Continua $E(x) = \int_a^b xf(x) dx$ $\text{var}(x) = \int_a^b [x - E(x)]^2 f(x) dx$ Ec. 2.12

2.4.2 PROCESO DE POISSON Y LA DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

Sea x el número de eventos (llegadas) que tienen lugar durante una unidad de tiempo específica (minuto, hora). La Función Densidad de Probabilidad de Poisson está dada como:

$$P(x = n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}, \quad n = 1, 2, \dots \quad \text{Ec. 2.13}$$

La media y la varianza de Poisson vienen dadas por:

$$E(x) = \lambda \quad \text{var}(x) = \lambda \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde $E(x) = \lambda$ representa el número promedio de eventos que ocurren por unidad de tiempo. El parámetro λ está definido como la tasa a la que ocurre el evento (número por unidad de tiempo).

Si el número de llegadas a una estación de servicio, durante un período específico, ocurre de acuerdo con la Distribución de Poisson, entonces la distribución de los *intervalos* entre llegadas sucesivas debe seguir la Distribución Exponencial [20]. Específicamente, si λ es la tasa a la que ocurren los eventos de Poisson, la distribución del tiempo t , entre llegadas sucesivas está dada como:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \quad \text{Ec. 2.15}$$

La media y la varianza de la Distribución Exponencial están dadas por:

$$E(x) = 1/\lambda \quad \text{var}(x) = 1/\lambda^2 \quad \text{Ec. 2.16}$$

Si λ es la tasa a la que ocurren los eventos, entonces $1/\lambda$ es el intervalo promedio entre eventos sucesivos [20].

2.4.3 PROCESOS ESTOCÁSTICOS [4]

Los Procesos Estocásticos son modelos de probabilidad de procesos que evolucionan en el tiempo de una manera probabilística. Se definen como una colección indexada de todas las posibles funciones aleatorias (realizaciones) $\{X_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$. Estas realizaciones representan características de interés mensurable en el tiempo t . La figura 2.5 representa un espacio muestral de un proceso estocástico.

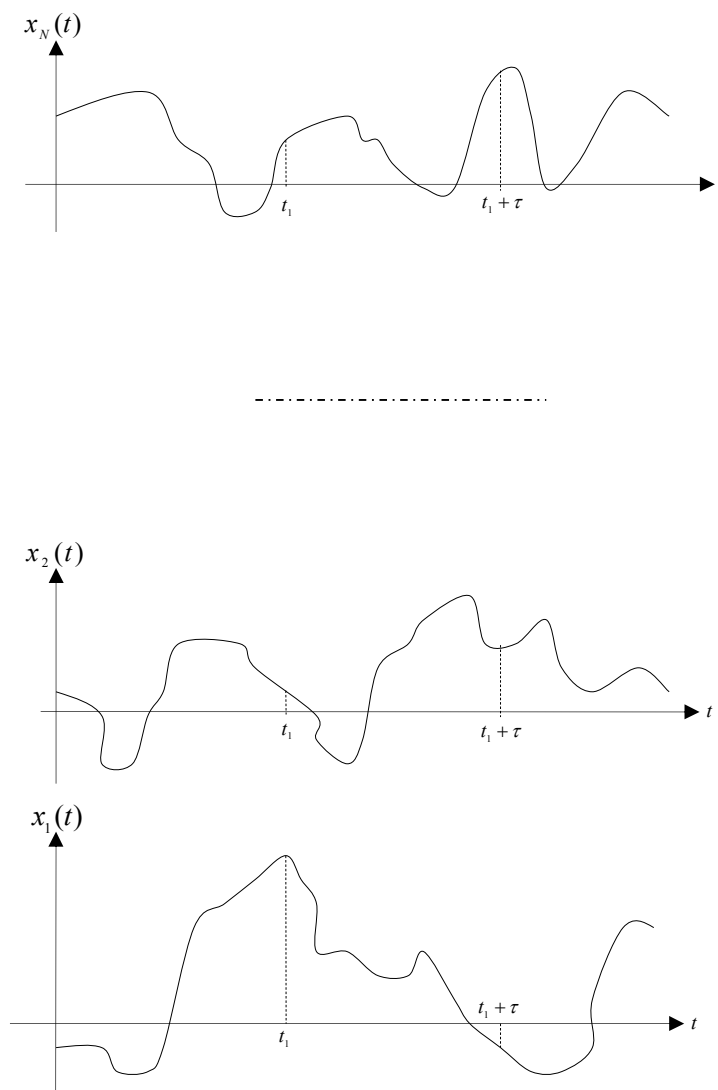


Figura 2.5 Espacio muestral de un conjunto de realizaciones

Si el número de realizaciones es suficientemente alto (lo más representativo) se tiene el modelo estadístico, éste puede ser considerado en el espacio muestral (variable aleatoria) y en el tiempo (realizaciones).

Para los modelos estadísticos en espacio muestral, el valor medio y la función de auto correlación, vienen dados por:

$$E_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad \text{Ec. 2.17}$$

$$R_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \quad \text{Ec. 2.18}$$

En los procesos estocásticos estacionarios el valor medio no cambia y la función de correlación no depende del instante de tiempo.

Para los modelos estadísticos en el tiempo, tomando una sola realización, se tiene que para un proceso estacionario (ergódico), el valor medio y la función de auto correlación están dados por:

$$E_x(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \quad \text{Ec. 2.19}$$

$$R_x(\tau, k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) x_k(t + \tau) dt \quad \text{Ec. 2.20}$$

En un proceso estacionario, si se toma un registro (intervalo corto de tiempo), se tiene que el valor medio y la función de correlación, están dados por:

$$E_x(t_1, k) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_k(t) dt \quad \text{Ec. 2.21}$$

$$R_x(t_1, t_1 + \tau, k) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_k(t) x_k(t + \tau) dt \quad \text{Ec. 2.22}$$

Para la función de densidad de probabilidad $p(x)$, el valor medio (primer momento) y el valor medio cuadrático (segundo momento), están dados por:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \quad \text{Ec. 2.23}$$

$$\Psi_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x)dx \quad \text{Ec. 2.24}$$

Los procesos estocásticos son de interés para describir el comportamiento de un sistema en operación durante algunos períodos. La condición actual del sistema puede estar en una de las realizaciones i , categorías mutuamente excluyentes llamadas *estados*. Por consiguiente en la notación, estos estados se etiquetan $1, 2, \dots, N$. La variable aleatoria $\{X_t\}$ representa el *estado del sistema* en el tiempo t . El sistema se observa en puntos de tiempo dados, etiquetados $t = 0, 1, 2, \dots$. De esta forma los procesos estocásticos $\{X_t\} = \{X_0, X_1, X_2, \dots\}$ proporcionan una representación matemática de cómo evoluciona la condición del sistema físico a través del tiempo [23].

2.4.4 CADENAS DE MARKOV DE TIEMPO DISCRETO

Es necesario hacer algunos supuestos sobre la distribución conjunta de X_0, X_1, X_2, \dots para obtener resultados analíticos. Un supuesto que conduce al manejo analítico es aquel que el proceso estocástico es una Cadena de Markov, que tiene la siguiente propiedad esencial:

Un proceso estocástico $\{X_t\}$ tiene la *propiedad markoviana* si $P\{X_{t+1} = j \mid X_0 = k_0, X_1 = k_1, \dots, X_{t-1} = k_{t-1}, X_t = i\} = P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$, para $t = 0, 1, \dots$ y toda sucesión $i, j, k_0, k_1, \dots, k_{t-1}$.

En palabras, esta propiedad markoviana establece que la probabilidad condicional de cualquier “evento futuro” dado cualquier “evento pasado” y el estado actual $X_t = i$, es *independiente* de los eventos pasados y sólo depende del estado actual del proceso.

Un proceso estocástico $\{X_t\}$ para $t=0,1,\dots$ es una cadena de Markov si presenta la propiedad markoviana [23].

2.4.5 DESCRIPCIÓN PROBABILÍSTICA DEL FLUJO VEHICULAR

Puesto que la circulación vehicular es muy dispersa, da como resultado un flujo vehicular correspondiente a un proceso aleatorio de llegadas, de tal manera que al conservar algunas características discretas, el análisis de su comportamiento cae en el aspecto probabilístico.

Para seleccionar la descripción probabilística que más fielmente represente un flujo vehicular específico, es necesario que éste cumpla con las condiciones:

- Cada conductor sitúa su vehículo independiente de los demás, excepto cuando su espaciamiento es muy pequeño.
- Para cualquier flujo, el número de vehículos que pasan por un punto, en un intervalo de tiempo dado, es independiente del número de vehículos que pasan por otro punto, durante el mismo intervalo.
- El número de vehículos que pasan por un punto dado, en un intervalo de tiempo, es independiente del número de vehículos que pasan por el mismo punto durante otro intervalo de tiempo.

Los supuestos anteriores son los que utiliza la Distribución de Poisson, la cual tiene aplicación para flujos vehiculares.

Suponiendo que la distribución de llegadas de los vehículos a un punto es de tipo Poisson, entonces la probabilidad de tener n llegadas en cualquier intervalo de tiempo t , viene dado por:

$$p_n(t) = P(x = n) = \frac{m^n e^{-m}}{n!} \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad \text{Ec. 2.25}$$

donde: x variable aleatoria y representa el número de llegadas de vehículos a un punto.

$p_n(t)$ probabilidad de que lleguen exactamente n vehículos a un punto durante un intervalo de tiempo t .

m número medio de vehículos que se espera lleguen durante el intervalo de tiempo t (vehículos/intervalo).

El valor m en función de la tasa de flujo de llegadas λ es $m = \lambda \cdot t$, entonces:

$$p_n(t) = P(x = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad \text{Ec. 2.26}$$

La probabilidad de que no lleguen vehículos durante el intervalo de tiempo t , es:

$$P(x = 0) = \frac{(\lambda t)^0 e^{-\lambda t}}{0!} = e^{-\lambda t} \quad \text{para } t \geq 0 \quad \text{Ec. 2.27}$$

Si no llegan vehículos durante el intervalo de tiempo t , entonces existe un intervalo de tiempo h , entre vehículos, de al menos t . Esto quiere decir que el intervalo h es igual o mayor que t . Esta característica define la Distribución Exponencial de Poisson de intervalos de tiempo entre vehículos, la cual se expresa como:

$$P(h \geq t) = e^{-\lambda t} \quad \text{para } t \geq 0 \quad \text{Ec. 2.28}$$

La probabilidad de que un intervalo h sea menor que t es:

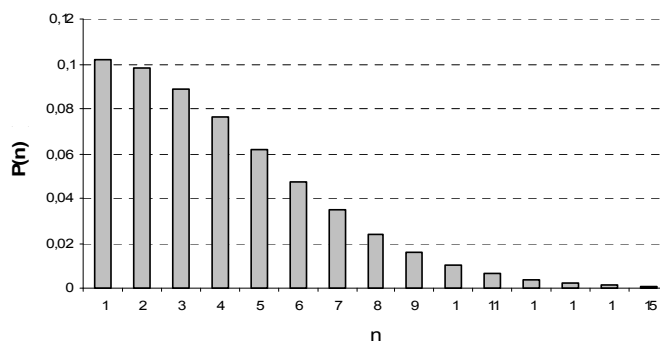
$$P(h < t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{para } t \geq 0 \quad \text{Ec. 2.29}$$

En estas condiciones, el valor medio del intervalo entre llegadas es: $E[h] = 1/\lambda$

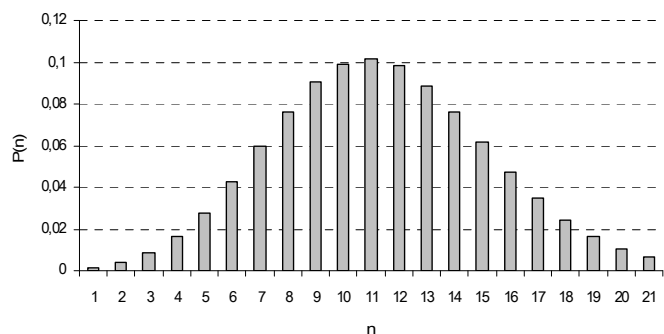
Una manera de calcular estas probabilidades, de acuerdo a la Distribución de Poisson, es mediante un proceso recursivo dado por [10]:

$$p(n+1) = \frac{m}{n+1} p(n) \quad \text{ó también} \quad p(n) = \frac{m}{n} p(n-1) \quad \text{Ec. 2.30}$$

La distribución de llegadas de vehículos según Poisson, es más simétrica mientras más alta es la tasa de flujo de llegadas. La figura 2.6 ilustra tal efecto [10].



(a)



(b)

Figura 2.6 Distribución probabilística de llegada de vehículos: (a) baja y (b) alta

CAPÍTULO 3

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

3.1 MODELOS DE FLUJO VEHICULAR

El desarrollo de modelos microscópicos y macroscópicos que relacionan sus diferentes variables, como el volumen, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento, ha sido uno de los resultados más útiles del análisis del flujo vehicular. Estos modelos constituyen la base del desarrollo del concepto de Niveles de Servicio, aplicado a diferentes tipos de redes viales.

3.1.1 MODELOS BÁSICOS

Otro enfoque, relacionando las diferentes parejas de las tres variables principales, se basa en la toma de datos y ajuste simple a curvas o regresión; con métodos deductivos a partir de condiciones límites o de frontera (normalizando a valores máximos); y, en analogías físicas (fluidos y gases) [6], [25]. Estas tres formas de aproximarse al fenómeno del tránsito han dado como resultado el desarrollo de modelos macroscópicos, los cuales suponen un movimiento homogéneo o condiciones de flujo estacionario y describen las características generales o globales de la corriente vehicular.

Los modelos básicos relacionados con el flujo vehicular, son los siguientes:

Modelo lineal: pone de manifiesto la relación lineal entre las variables densidad ρ y velocidad media espacial \bar{v}_e , considerando una velocidad media espacial a flujo

libre v_l y una densidad de congestamiento ρ_c , todo esto como una aproximación lineal obtenida de la aplicación de un ajuste por el método de los mínimos cuadrados.

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{\rho_c} \right) \rho \quad \text{Ec. 3.1}$$

En general la velocidad disminuye a medida que aumenta la densidad, desde un valor máximo o velocidad de flujo libre hasta un valor mínimo $\bar{v}_e = 0$, donde la densidad alcanza su máximo valor o valor de congestamiento ρ_c . Por un lado, para que exista velocidad a flujo libre, debe presentarse al menos un vehículo sobre la vía circulando a la velocidad máxima o límite establecida; por otro lado, al presentarse congestión los vehículos están detenidos uno tras otro.

La Ecuación Fundamental del flujo vehicular, considerando las variables *velocidad* – *densidad*, viene representada en la figura 3.1.

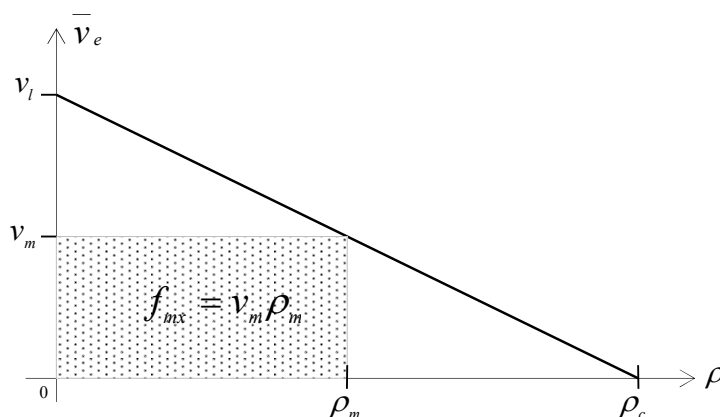


Figura 3.1 Relación lineal de la Ecuación Fundamental del flujo vehicular

De acuerdo a la gráfica, el flujo f es el área dada por el producto v (altura) por ρ (base). Según esta característica el flujo máximo representa el área máxima, donde base y altura se ubican en el punto medio, esto es:

$$f_{mx} = v_m \rho_m = \frac{v_l \rho_c}{4} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Modelo no lineal: relaciona las variables de flujo f y densidad ρ . Considerando la Ecuación Fundamental y asociándole la velocidad media espacial [10], [36], se tiene:

$$f = v\rho = \left[v_l - \left(\frac{v_l}{\rho_c} \right) \rho \right] \rho = v_l \rho - \left(\frac{v_l}{\rho_c} \right) \rho^2 \quad \text{Ec. 3.3}$$

Si a esta última expresión se le representa mediante las variables *flujo - densidad*, entonces el flujo es una función parabólica de la densidad, esto puede verse en la figura 3.2.

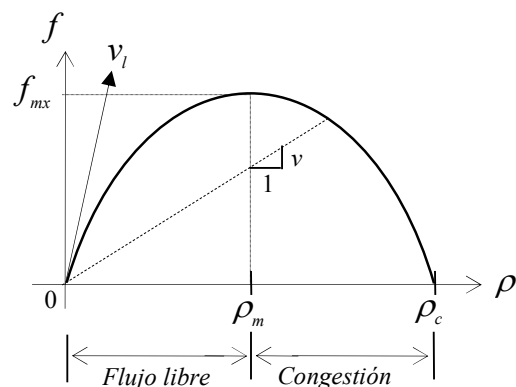


Figura 3.2 Relación no lineal de la Ecuación Fundamental del flujo vehicular

Las condiciones de operación de flujo libre están en el origen (densidad cero y flujo cero), mientras que la congestión está en la densidad máxima, es decir cuando los vehículos se detienen (flujo cero).

La pendiente de la recta desde el origen a cualquier punto de la parábola, representa la velocidad, por lo que la velocidad media está dada para el flujo máximo y la densidad media.

En el punto de congestión total (densidad máxima), no existe velocidad. En la medida en que el flujo y la densidad se aproximen a cero, aparece un vector que tiende a ser tangente a la curva, cuya pendiente representa la velocidad a flujo libre, la misma que dependerá de algunos factores, tales como: condiciones del conductor, características del vehículo y vías, estado del tiempo, visibilidad, etc.

Otra relación no lineal de la Ecuación Fundamental del flujo vehicular está expresada mediante el modelo *velocidad – flujo*, relación que es utilizada en la identificación de los Niveles de Servicio (velocidades) y niveles de productividad (flujos).

La relación *flujo – densidad* es la base para el control del Tráfico Vehicular, específicamente en autopistas, donde la densidad o concentración se expresa en términos del porcentaje de ocupación de tramos específicos en un momento dado.

Del análisis de los modelos de la Ecuación Fundamental del flujo vehicular, el rango de variación de las variables, que garanticen flujos no congestionados, viene dado por.

$$0 \leq f \leq f_{mx}$$

$$v_m \leq \bar{v}_e \leq v_l$$

$$0 \leq \rho \leq \rho_m$$

3.1.2 MODELOS MACROSCÓPICOS

Los modelos macroscópicos se emplean, cuando el nivel de detalle es menos importante que las características globales del flujo vehicular; sin embargo estos modelos son capaces de medir las velocidades promedio, el flujo y la densidad del Tráfico Vehicular.

En estos modelos el tiempo y el espacio son independientes (evolución tiempo - espacio). Para que tenga sentido la densidad, en la modelación del Tráfico Vehicular, hay que considerar suficientes vehículos. Además el número de vehículos en cualquier parte de una vía cambia con el tiempo. Siendo el vehículo un elemento discreto, sin embargo el flujo de éstos representa una densidad como una función continua o suave.

Asumiendo una sección de vía sin rampas de entrada ni de salida, dada por la figura 3.3. La densidad de vehículos en un punto x en el instante t viene dada por $\rho(x,t)$, el número de vehículos en el intervalo $[x, x + \Delta x]$ en el instante t es $\rho(x,t)\Delta x$ (vehículos por unidad de distancia x). Por otro lado el flujo de vehículos en el punto x al tiempo t , está dado por $f(x,t)$ (cantidad de vehículos que pasan a través del punto x por unidad de tiempo t).

Para definir una expresión de la densidad de vehículos en la sección de vía, es necesario considerar la variación de la cantidad de vehículos que entran por un extremo y salen por el otro extremo de la sección [36]. Entonces:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho(x,t)\Delta x] = [\text{flujo de entrada a } x - \text{flujo de salida de } x + \Delta x] \quad \text{Ec. 3.4}$$

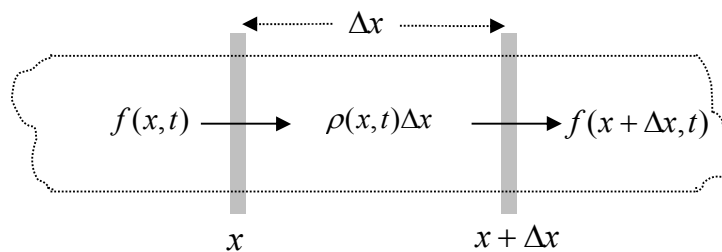


Figura 3.3 Intervalo de vía

donde, al dividir para Δx y tomar el límite cuando $\Delta x \rightarrow 0$, se tiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{f(x + \Delta x, t) - f(x, t)}{\Delta x} = - \frac{\partial f}{\partial x} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Todo esto concluye en la conocida *Ecuación de Conservación Vehicular* (ningún vehículo se genera o se pierde) [3] y viene dada por:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial f(x,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 3.6}$$

3.1.3 MODELOS MICROSCÓPICOS

El acto de conducir involucra algunos aspectos, tales como el fenómeno de seguir a un vehículo en un solo carril de la vía. Este aspecto es relativamente importante e interesante analizar por varias razones, entre las que se destacan: el simple análisis comparado con el hecho de cambiar de carril y la descripción matemática exitosa.

El hecho de seguir a otro vehículo es una actividad muy común cuando es difícil el rebasar al vehículo de adelante en vías de múltiples carriles o cuando el tráfico está restringido a vías de un solo carril. Este modelo es en general aplicable en los casos en que el flujo vehicular circula en un solo carril y mantiene la velocidad constante o con variaciones muy pequeñas, es decir, describe el flujo en estado estable.

El modelo *siguiente al líder* (*Car-following*) [9], asume que existe una correlación entre los vehículos en un rango de distancia, en el cual puede existir una interacción entre ellos. Normalmente este modelo tiene una validez entre los 100 y 125 metros de distancia, entre el líder y el que le sigue.

Al conducir un vehículo en un solo carril, el conductor se somete a algunos aspectos, como los siguientes:

Percepción: adquiere información relevante del movimiento del vehículo líder. Generalmente esta información es la velocidad, aceleración o desaceleración y la distancia entre los vehículos.

Toma de decisiones: interpreta la información recabada y la transforma en un conjunto de acciones que debe tomar, basándose adicionalmente en su vehículo y su experiencia como conductor.

Control: realiza las acciones de control de acuerdo a su procesamiento de información y a su conocimiento de la dinámica del vehículo.

Al momento, no está claro como el conductor realiza todas estas funciones. Muchas de las preguntas más importantes yacen en el factor humano, siendo éste el más difícil de describir adecuadamente.

En muchos casos se ha tratado de representar al conductor como una función de transferencia, sin embargo aparece el problema de que en general, el conductor tiene varias funciones de transferencia dependiendo de las circunstancias.

Para este tipo de modelo la *Respuesta* está representada por la aceleración o desaceleración del vehículo siguiente, la diferencia de velocidades entre el vehículo líder y el vehículo siguiente representa el *Estímulo* [14]. Desde un punto de vista práctico, para fines de simulación, lo más recomendable es representar al conductor como:

$$\mathbf{Respuesta} = \lambda \mathbf{Estímulo} \quad \text{Ec. 3.7}$$

En el modelo de *Car-following*, representado por la figura 3.4, el conductor del vehículo siguiente n trata de mantenerse a una distancia prudente del vehículo líder $n-1$ y evitar colisiones. Estas dos condiciones se pueden lograr si el conductor mantiene una pequeña velocidad promedio relativa $\dot{X}_{rel} = \dot{X}_{n-1} - \dot{X}_n$, en intervalos pequeños de tiempo Δt , es decir:

$$\left\langle \dot{X}_{n-1} - \dot{X}_n \right\rangle = \left\langle \dot{X}_{rel} \right\rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \dot{X}_{rel}(t) dt \quad \text{Ec. 3.8}$$



Figura 3.4 Modelo básico del *Car-following*

En general el conductor está representado de la manera más sencilla posible, con una ganancia que relaciona su respuesta cuando recibe un estímulo. La forma de representarle al conductor ha sido motivo de muchos estudios, dentro de los más recientes se lo representa a través de agentes inteligentes [32], [34], en los cuales se trata de incluir el factor humano.

Dadas las condiciones del vehículo, la respuesta del conductor estará en el control de la aceleración del vehículo, y el estímulo será su percepción de la velocidad relativa entre los dos vehículos; de tal manera que un modelo muy simple y muy utilizado de *Car-following* se reduce a [9], [36]:

$$\ddot{x}(t+T) = \lambda \left[\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t) \right] \quad \text{Ec. 3.9}$$

donde: x son las distancias relativas a un punto de referencia tanto del vehículo líder y del que le sigue, y T es el tiempo de respuesta del conductor.

3.2 MODELOS USANDO TEORÍA DE COLAS

El estudio de colas determina las medidas del funcionamiento de una situación donde interviene el tiempo de espera y la longitud de cola promedio, entre otras. Esta información sirve para decidir respecto a un nivel apropiado de servicio para las estaciones.

Desde el punto de vista del análisis de colas, la llegada de clientes está representada por medio del **tiempo entre llegadas** y el servicio está descrito por

el **tiempo de servicio** a cada cliente. En general, los tiempos entre llegadas y de servicio pueden ser probabilísticos o determinísticos [11].

En la mayor parte de las situaciones de colas, el arribo de los clientes ocurre de forma totalmente aleatoria. Este carácter aleatorio significa que la ocurrencia de un evento (por ejemplo, la llegada de un cliente o la salida de un servicio) no está influida por el tiempo que transcurre desde la ocurrencia del último evento.

Los tiempos aleatorios entre llegadas y de servicio se describen de forma cuantitativa, con el proceso de modelado de colas, mediante la Distribución Exponencial [27].

La Teoría de Colas aparece en la solución de múltiples problemas de la vida real, como el Tráfico Vehicular, la regulación semafórica, control de tiempo de accesos a procesadores de ordenadores que trabajan en tiempo compartido. Una Cola está definida como el número de vehículos que esperan a ser servidos, sin incluir aquellos que están atendidos.

Las demoras y las colas, resultado del congestionamiento, es un fenómeno de espera comúnmente asociado a muchos problemas de tránsito. La Teoría de Colas, mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos, es una herramienta importante para el análisis de este fenómeno.

Los vehículos llegan al sistema con una tasa de llegadas λ . Entran a la estación de servicio, si está desocupada son atendidos a una tasa media de servicio μ , equivalente a la tasa de salidas. Si la estación de servicio está ocupada se forman en la cola y esperaran ser atendidos.

Los términos asociados a la Teoría de Colas, están detallados a continuación:

Llegadas (demanda) o características de entrada, son expresadas en términos de tasas de flujo (vehículos/hora) o intervalos de tiempo (segundos/vehículo). Su distribución es de tipo determinístico o probabilístico. El proceso de llegadas sigue

una distribución de Poisson que describe procesos Markovianos (procesos estocásticos que dependen sólo del evento anterior).

Servicios (capacidad) o características de salida, están expresados como tasas de flujo o intervalos, y su distribución también puede ser determinística o probabilística.

Procedimiento de servicio (disciplina de la cola), en la mayoría de los sistemas viales consiste en que, el primero que llega es el primero que sale (*First-In-First-Out* FIFO). El tiempo de servicio debe ser igual o menor que el intervalo entre llegadas, para evitar el congestionamiento.

Las llegadas de Poisson y los tiempos exponenciales de servicio, se deciden en base al análisis de datos primarios del sistema de estudio. **Técnicas Estadísticas** transforman datos primarios en formas adecuadas para un Estudio Analítico. Estas técnicas trabajan con estimación de Distribución de Probabilidad y Métodos de Pronósticos.

Los modelos considerados en la Teoría de Colas, utilizan la notación de Kendall, de la forma:

A/B/C/m/d

donde: **A** proceso de llegadas
B proceso de servicios
C número de servidores
m máximo número de usuarios simultáneos admitidos
d disciplina de la cola.

Un modelo **D/D/1** asume llegadas y salidas de tipo determinístico o a intervalos uniformes, con una estación de servicio.

Un modelo **M/M/1** considera llegadas y salidas de tipo probabilístico o distribuidas exponencialmente, con una estación de servicio.

Se omite:

m cuando la capacidad de usuarios simultáneos admitidos al sistema es infinita.

d si la disciplina de la cola es del tipo FIFO.

3.2.1 MODELOS M/M/1 [11], [27]

El modelo **M/M/1** significa que: el tipo de distribución del tiempo entre llegadas es un proceso **Markoviano** de tipo Poisson - Exponencial, el tipo de distribución del tiempo de servicio es un proceso **Markoviano**; y el número de servidores **1**.

El estudio de las Colas está fundamentado en procesos puros de nacimiento (llegadas) y en procesos puros de muerte (servicios). Se forma la Cola cuando el tiempo que se demora a la salida es mayor que el intervalo de tiempo entre llegadas o a su vez el servicio no está disponible.

Cuando los patrones de llegadas y de servicios del sistema de tránsito se mantienen por largos periodos, está la consideración de un estado estacionario. En estas condiciones los promedios y las probabilidades no cambian mientras se mantenga el servicio en funcionamiento.

Este enfoque no puede ser aplicado en situaciones de máxima demanda, en las cuales el flujo de llegadas λ excede a la capacidad en estado estacionario μ . De ahí que para mantener condiciones de flujo estacionario es necesario que se cumpla con la condición $\lambda < \mu$. Es necesario aclarar que aunque las llegadas sean menores que las salidas, siempre existe la posibilidad de formación de Colas, debido a la característica estocástica del proceso [11], [23].

Utilizando un diagrama de transición de estados para un proceso *llegada – salida*, se llega a la determinación de la tasa a la cual la probabilidad “fluye” del estado $S(n-1)$ al estado $S(n)$ [27]. La figura 3.5 muestra algunos estados de transición.

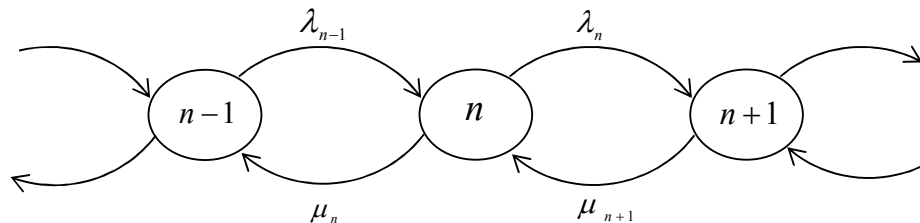


Figura 3.5 Diagrama de transición de estado

donde: $\lambda = \text{tasa del proceso de nacimiento}$

$\mu = \text{tasa del proceso de muerte}$

Entonces, la tasa de llegadas por unidad de servicio (intensidad de tráfico), viene dada por:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Aplicando continuidad se tiene las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del sistema **M/M/1** con un proceso de Poisson.

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda_n + \mu_n)P_n(t) + \lambda_{n-1}P_{n-1}(t) + \mu_{n+1}P_{n+1}(t) \rightarrow n \geq 1 \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_0P_0(t) + \mu_1P_1(t) \rightarrow n = 0 \quad \text{Ec. 3.12}$$

Estas ecuaciones representan un modelo híbrido de un Sistema de Eventos Discretos, puesto que considera la transición de estados y el tiempo continuo, su solución está dada por [27]:

$$P_n = e^{-(\lambda+\mu)t} \left[\rho^{(n-i)/2} I_{n-i}(at) + \rho^{(n-i-1)/2} I_{n+i+1}(at) + (1-\rho)\rho^n \sum_{j=n+i+2}^{\infty} \rho^{-j/2} I_j(at) \right] \quad \text{Ec. 3.13}$$

donde: $a = 2\mu\rho^{1/2}$

$$I_n(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(x/2)^{n+2m}}{(n+m)!m!} \rightarrow n \geq -1 \quad (\text{Función de Bessel})$$

Un modelo simplificado con la solución en equilibrio, viene dado por:

$$P_n = \lim_{t \rightarrow \infty} P_n(t) \rightarrow P_n = P_0 \prod_{i=0}^{n-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Ec. 3.14}$$

donde:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{n-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}}$$

$$P_{n+1} = \frac{\lambda_n}{\mu_{n+1}} P_n$$

Si el sistema es estacionario, esto es si existe $\lim_{t \rightarrow \infty} P_n(t) = P_n$ y es finito, entonces considerando el valor medio de la función de densidad de probabilidad del proceso de Poisson, tanto de la tasa de llegadas λ como de la tasa de servicio μ , se resuelven las ecuaciones diferenciales anteriores de la forma:

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = 0 = -(\lambda + \mu)P_n + \lambda P_{n-1} + \mu P_{n+1} \rightarrow n \geq 1 \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = 0 = -\lambda P_0 + \mu P_1 \rightarrow n = 0 \Rightarrow P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0 \quad \text{Ec. 3.16}$$

Mediante un proceso de inducción, se tiene:

$$n = 1 \Rightarrow P_2 = \frac{\lambda^2}{\mu^2} P_0 \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$P_{n+1} = \frac{\lambda^{n+1}}{\mu^{n+1}} P_0, \quad n \geq 0 \quad \text{Ec. 3.18}$$

Al tratarse de probabilidades, entonces:

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{\mu^n} \quad \text{Ec. 3.19}$$

La última sumatoria es una progresión geométrica, por lo que:

$$P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{\mu^n} = P_0 \left(\frac{1}{1 - \rho} \right) \quad \text{Ec. 3.20}$$

La probabilidad de tener exactamente n vehículos en el sistema (vehículos que están siendo servidos, más los que esperan en la cola), viene dada por:

$$P_n = \rho^n P_0 = \rho^n (1 - \rho) \quad , \quad 0 < \rho < 1 \quad \text{Ec. 3.21}$$

Una condición de distribución estacionaria se tiene si y sólo si $\rho < 1$, es decir que $\lambda < \mu$, con lo que la tasa de llegadas es menor que la tasa de servicio.

Entonces, las medidas de eficacia en estado estacionario están representadas por parámetros relacionados con los usuarios (vehículos) y con los tiempos.

Si N es el número de vehículos en el sistema y N_q es el número de vehículos en la cola, una vez alcanzado el estado estacionario, entonces el número medio de vehículos en el sistema, viene dado por [8], [36]:

$$L = E(N) = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad \text{Ec. 3.22}$$

El número medio de vehículos en la cola es:

$$L_q = E(N_q) = \frac{\rho^2}{1 - \rho} = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad \text{Ec. 3.23}$$

Por otro lado, si T_q es el tiempo que un vehículo pasa en la cola, entonces el tiempo medio que un vehículo pasa en la cola W_q , viene dado por:

$$W_q = E(T_q) = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} = \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} \quad \text{Ec. 3.24}$$

También, si T es el tiempo que un vehículo pasa en el sistema, entonces el tiempo medio que un vehículo pasa en el sistema W , está dado por:

$$W = E(T) = W_q + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu(1-\rho)} \quad \text{Ec. 3.25}$$

Estos parámetros pueden ser expresados en las llamadas fórmulas de Little [23], [27], dadas por:

$$\begin{aligned} L &= \lambda W \\ L_q &= \lambda W_q \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.26}$$

Finalmente, la probabilidad $P(t)$ de tener que gastar un tiempo t en el sistema es:

$$P(t) = (\mu - \lambda)e^{(\lambda - \mu)t} \quad \text{Ec. 3.27}$$

3.3 MODELACIÓN DE UNA RED DE TRÁFICO URBANO

En esta Tesis se considera una Red de Tráfico Urbano (*Urban Traffic Network* UTN) como un sistema híbrido, incluyendo componentes de tiempo continuo (modelo de vía) y componentes de eventos discretos (intersección señalizada). El modelo es usado para propósitos de control [9], [11].

En una UTN las intersecciones señalizadas, son aquellos elementos de la red que

conectan dos o más vías y consisten del área física ocupada por vehículos cruzando la intersección, como también la parte adyacente de las vías desde las cuales el flujo vehicular ingresa y el flujo vehicular continúa. En este modelo, el flujo está representado por medio de un modelo macroscópico que depende del tiempo.

La vía comprende y se extiende a aquellos elementos de la red que conectan dos intersecciones señalizadas adyacentes. Este esquema da lugar al método de modelación modular, en el cual pueden agregarse varios nodos a partir de un nodo inicial.

Aquí se presenta la construcción del modelo de una intersección aislada, sin embargo, este modelo es un acercamiento modular, para construir un modelo de UTN más grande, aplicando los diferentes atributos a cada nodo. En base al análisis del flujo vehicular está planteado un modelo de tráfico urbano [8], [15].

Una Red de Tráfico Urbano, está dado por $UTN = \{I, R\}$, donde: $I = \{I_h, h = 1, \dots, H\}$ es el conjunto que reúne las H intersecciones señalizadas, $R = \{R_k, k = 1, \dots, K\}$ es el conjunto que reúne K diferentes vías en el área urbana.

La figura 3.6 muestra la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca correspondiente a la ZC EPN-PUCE. Esta intersección particular I_h consiste de dos direcciones entrantes R_1 y R_2 , tres direcciones salientes R_4 , R_5 y R_6 y las vías adyacentes.

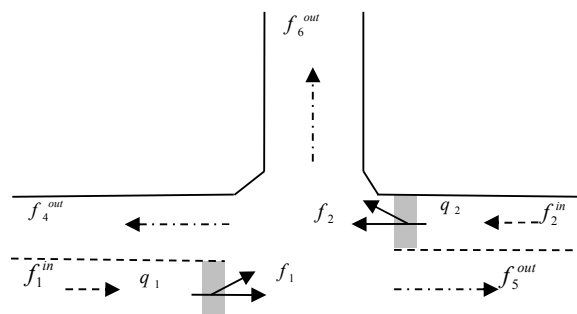


Figura 3.6 Intersección I_h señalizada de dos fases

3.3.1 MODELO DE INTERSECCIÓN SEÑALIZADA [8], [15], [36]

Los flujos mostrados en la figura 3.6, son gobernados por un semáforo de dos fases. El flujo (entrante) f_j^{in} , $j \in INh$ representa el flujo vehicular acercándose a la intersección desde la vía adyacente R_j , además f_j , $j \in INh$ representa el flujo vehicular que cruza la intersección, desde las direcciones entrantes j , cuando son habilitadas por el semáforo, y f_i^{out} , $i \in OUTH$ representa el flujo que deja la intersección en la dirección i . Además q_j , $j \in INh$ denota la cola de vehículos en la dirección entrante j que esperan la luz verde.

Respecto a la dinámica del semáforo, cada fase está caracterizada por los flujos (movimientos) que están habilitados dentro de dicha fase. En consecuencia, solamente la luz verde y ámbar se toman en cuenta, en razón de que los flujos de entrada que no encuentran luz verde o ámbar, tienen la luz roja.

Además en la intersección de la figura 3.6, los flujos habilitados durante cada fase del semáforo se muestran en la tabla 3.1, donde: \mathcal{G}_φ^g y \mathcal{G}_φ^a , $\varphi = 1, 2$ representa la duración del verde y ámbar de la fase φ .

Tabla 3.1 Fases de la intersección de la figura 3.6

Fases	Flujos habilitados	Longitud
1ra	f_1	$\mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_1^g + \mathcal{G}_1^a$
2da	f_2	$\mathcal{G}_2 = \mathcal{G}_2^g + \mathcal{G}_2^a$

Cada flujo de entrada f_j , $j \in INh$, habilitado por el semáforo en cualquier instante τ , está dado por la ecuación que describe la dinámica de la intersección:

$$f_j(\tau) = \begin{cases} f_{sj}, & \text{if } q_j(\tau) > 0 \\ \min\{f_j^{in}(\tau), f_{sj}\}, & \text{if } q_j(\tau) = 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 3.28}$$

donde: f_{sj} es el flujo de saturación, determinado experimentalmente.

La dinámica de la cola está descrita por:

$$\dot{q}_j(\tau) = f_j^{in}(\tau) - f_j(\tau) \quad \text{Ec. 3.29}$$

Además, los flujos de salida pueden ser calculados por asociación con la intersección I_h y la matriz Origen – Destino $A(\tau)$, cuyo elemento genérico $\alpha_{i,j}(\tau)$ indica el porcentaje de vehículos que vienen de la dirección j y se dirigen en dirección i , para todo instante τ y cualquier $i \in OUTH$, entonces:

$$f_i^{out}(\tau) = \sum_{j \in INh} \alpha_{i,j}(\tau) \cdot f_j(\tau) \quad \text{Ec. 3.30}$$

En los modelos expresados por la dinámica de la intersección y el flujo de salida, el comportamiento del manejo de eventos puede ser representado por un simple cambio en los parámetros f_{sj} y $\alpha_{i,j}$.

Los eventos que caracterizan a una UTN están considerados de la siguiente forma:

- Los cambios de fase afectan la dinámica continua, debido a que cada cambio corresponde a la habilitación o deshabilitación de los diferentes flujos entrantes, determinados por los semáforos.
- Los eventos requeridos para el control pueden ser recalculados, cuando un flujo entrante $f_j^{in}(\tau)$ genera la cola q_j , debido a cambios de las condiciones de tráfico y a cambios dinámicos de la cola y el plan óptimo del semáforo.
- Los eventos especiales reúnen todos aquellos eventos extraordinarios, tales como accidentes de tráfico, que pueden bloquear una dirección de entrada o salida.

3.3.2 MODELO DE VÍAS [8], [15], [36]

El modelo de las vías está representado por flujos unidireccionales, de suerte que para caminos bidireccionales es necesario descomponer en flujos separados. La ecuación que representa la dinámica del flujo, está dada por:

$$f_l(x,t) = v_l(x,t)\rho_l(x,t) \quad \text{Ec. 3.31}$$

La dinámica de la densidad de tráfico, en la sección $R_{k,l}$ depende de sus flujos de entrada y salida, y de su longitud de sección; cuya forma discretizada está dada por:

$$\dot{\rho}_{k,l}(\tau) = \frac{1}{\Delta_{k,l}} [f_{k,l-1}(\tau) - f_{k,l}(\tau) + f_{k,l}^r(\tau) - f_{k,l}^w(\tau)] \quad \text{Ec. 3.32}$$

donde: $f_{k,l}^r(\tau)$ representa el flujo secundario que entra y $f_{k,l}^w(\tau)$ representa el flujo que existe en la sección $R_{k,l}$.

Cada vía unidireccional R_k es discretizada espacialmente en L_k secciones, dando lugar a $R_{k,l}$, donde $l=1,\dots,L_k$ de diferentes longitudes $\Delta_{k,l}$, como lo muestra la figura 3.7.

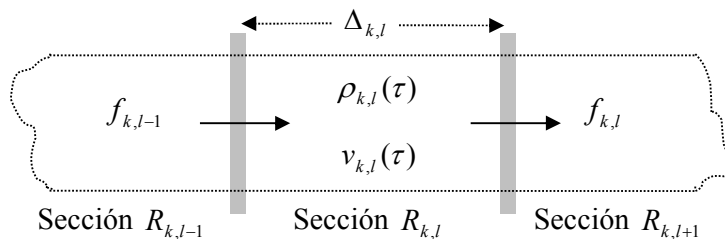


Figura 3.7 Sección de vía $R_{k,l}$

En áreas urbanas las vías que conforman la intersección son bastante cortas, por ello pueden ser consideradas como una sola sección de vía. En consecuencia el

índice l de una sección no se lo toma en cuenta. Entonces el flujo de salida en la vía R_k coincide con el flujo de entrada de la cola a través de la intersección, en la dirección entrante k dada por $f_k^{in}(\tau)$; el flujo de salida depende también de la dinámica del semáforo a través de la intersección, donde aparece la densidad vehicular $\rho_{k+1}(\tau)$, correspondiente a la cola al final de la vía R_k . A su vez, el flujo saliente de la vía R_k corresponde al flujo que alimenta la intersección en la dirección de salida k , esto es $f_k^{out}(\tau)$.

Los estados de una UTN viene representados por:

$$x_i = [f_j(\tau), q_j(\tau), \rho_j(\tau)]^T \quad \text{Ec. 3.33}$$

Por otro lado, el comportamiento de tráfico en la vía puede ser modelada en base al modelo macroscópico de segundo orden, que incluye las siguientes variables:

$\rho_{k,l}(\tau)$ densidad vehicular (número de vehículos por unidad de longitud: $R_{k,l}$ al tiempo τ)

$f_{k,l}(\tau)$ flujo de tráfico (volumen de vehículos), representa el número instantáneo de vehículos existentes en la sección $R_{k,l}$ hacia la sección $R_{k,l+1}$ al tiempo τ

$v_{k,l}(\tau)$ velocidad de los vehículos, dependiente de las variables anteriores y expresada por:

$$v_{k,l}(\tau) = \frac{f_{k,l}(\tau)}{\rho_{k,l}(\tau)} \quad \text{Ec. 3.34}$$

Haciendo analogía entre el flujo y la teoría de la hidrodinámica, se tiene que:

$$\frac{\partial f_{k,l}(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \rho_{k,l}(x,t)}{\partial t} = 0, \quad l = 1, \dots, L_k \quad \text{Ec. 3.35}$$

3.3.3 SEÑALIZACIÓN PARA EL CONTROL DE FLUJO VEHICULAR

Se denominan dispositivos para el control de tráfico a las señales, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo que se coloque sobre o adyacente a las vías, por una autoridad pública para: prevenir, regular y guiar a los usuarios [10].

La señalización es de carácter preventivo (señales preventivas), de carácter restrictivo (señales restrictivas) y de carácter informativo (señales informativas).

Los semáforos son dispositivos eléctrico – electrónicos, que tienen como función ordenar y regular el tránsito de vehículos y peatones en las vías, por medio de luces, generalmente de color rojo, ámbar y verde, operados por una unidad de control.

En una intersección, el flujo total de vehículos que llega a cada uno de sus accesos, es dividido en diferentes fases de movimiento, en cada una de las cuales se efectúa un desplazamiento específico de vehículos. Ciertas fases de movimiento reciben el derecho al uso del recurso por medio de una señal verde o de siga, mientras que otros son detenidos con una señal de rojo, ceda el paso o pare.

Para la descripción lógica de las señales de control de tráfico, es necesario definir la señal y la fase. La señal es un flujo de tráfico específico que ocurre en una intersección, en otras palabras es el conjunto de vehículos que tienen derecho al recurso (paso por la intersección) en una misma fila.

Las señales se combinan para formar las fases. Cuando una fase es seleccionada, los verdes se despliegan para un grupo de señales involucradas, mientras que las otras señales reciben un rojo. Una fase comienza con la pérdida de derecho de paso del grupo de señales que entran en conflicto con las que lo ganan. Un grupo de señales pierde derecho de paso en el momento de aparecer la indicación ámbar.

Otros términos asociados con la señalización para el control del flujo vehicular son:

- Ciclo o longitud de ciclo, es el tiempo necesario para una evolución completa de los eventos, en otras palabras, es el tiempo necesario para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
- Secuencia de fases, es el orden predeterminado en el que ocurren las fases del ciclo.
- Reparto, es el porcentaje de la longitud del ciclo asignado a cada una de las diferentes fases.
- Intervalo de despeje, es el tiempo de exposición de la indicación ámbar del semáforo que prosigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.

La distribución de los tiempos de cada fase debe estar en relación directa con los volúmenes de tránsito, es decir que la duración de cada fase y del ciclo dependerá de la demanda. El ciclo del semáforo no debe ser muy largo por cuanto pueden formarse longitudes de cola significativas, pero tampoco debe ser muy corto porque interrumpe el flujo vehicular, lo que produce inconvenientes en el conductor y un aumento en costos y contaminación. Ciclos típicos están alrededor de 90 segundos [10].

Los semáforos pueden ser de tiempo fijo, en cuyo caso se realiza un plan de control de acuerdo con los requerimientos del flujo de tránsito. Este es un control en lazo abierto por cuanto no son accionados por el tránsito y se utiliza en intersecciones donde los patrones de tránsito son relativamente estables, o en las que las variaciones de intensidad de circulación se pueden adaptar a un programa previsto, sin ocasionar demoras o congestionamientos excesivos.

Los semáforos accionados por el tránsito, tienen la característica principal de que su programación, responde en general a las variaciones en la demanda del

Tráfico Vehicular. Dicha demanda es registrada por detectores conectados al control del semáforo. Estos semáforos son utilizados en horas de máxima demanda, cuando existen amplias fluctuaciones de tránsito en intersecciones complejas.

Los semáforos son totalmente accionados o semiaccionados. En los semiaccionados por el tránsito, el derecho de paso corresponde usualmente a la arteria principal y es transferido a la vía transversal de acuerdo a la demanda, la misma que es registrada por los detectores instalados en el o los accesos de las vías transversales, considerando tiempos mínimos y máximos de verde.

Los semáforos totalmente accionados, trabajan sobre la demanda registrada a través de los detectores. Estos semáforos actúan en lazo cerrado, por lo que permiten regular el tránsito vehicular aún en presencia de perturbaciones, debidas a la presencia de incidentes. Dentro de estos semáforos están aquellos de control volumen – densidad o adaptable, que consiguen la óptima reducción de las demoras y la máxima eficiencia del movimiento vehicular.

Los requerimientos para la instalación de un semáforo fijo, están dados por:

- Volumen mínimo de vehículos, donde la intensidad de tránsito de las vías que se cruzan es la principal justificación. Considerando cualquiera de las ocho horas de un día representativo, los volúmenes mínimos se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Volumen mínimo en vías que se cruzan [10]

Número de carriles por vía		Vehículos por hora por vía	
Principal	Secundaria	Principal	Secundaria
1	1	500	150
2 o más	1	600	150
2 o más	2 o más	600	200
1	2 o más	500	200

- Interrupción de tránsito continuo, se aplica cuando las condiciones de operación de la calle principal son de tal naturaleza que el tránsito en la calle secundaria sufre demoras o riesgos excesivos al entrar o cruzar la calle principal, bajo condiciones similares al caso anterior. Estos volúmenes mínimos se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Volumen mínimo cuando existe interrupción de tránsito [10]

Número de carriles por vía		Vehículos por hora por vía	
Principal	Secundaria	Principal	Secundaria
1	1	750	75
2 o más	1	900	75
2 o más	2 o más	900	100
1	2 o más	750	100

- Volumen mínimo de peatones, si se tiene volúmenes de 600 o más vehículos por hora en ambos sentidos en la calle principal y si cruzan 150 o más peatones por hora.
- Antecedentes acerca de accidentes, este requisito debe ir relacionado con alguno de los requisitos de las condiciones anteriores.

En caso de existir redes de Tráfico Vehicular con varias secciones semaforizadas, es conveniente un sistema de coordinación, que debe estar sujeto a un control maestro, considerando usualmente retardos.

3.3.4 ATRIBUTOS DE TIEMPO CONTINUO Y DE EVENTOS DISCRETOS [8]

Atributos de tiempo continuo

Al modelar el Tráfico Vehicular como un fluido, se consideran características

espaciales y temporales, como componentes de tiempo continuo.

En cuanto se refiere a las vías, se tiene como atributos la velocidad v , el flujo f y la densidad ρ , también se considera la máxima densidad admisible ρ_{max} y el flujo de saturación f_{max} .

Atributos de eventos discretos

Los atributos de eventos discretos que caracterizan a una red urbana, son clasificados en cuatro clases:

- Cambios de fases, esta clase de eventos afecta la dinámica de tiempo continuo, ya que el cambio de cada fase habilita o deshabilita los flujos de entrada (acceden al recurso). Los cambios de estado están determinados por los semáforos, que tienen su propia dinámica de evento discreto.

En las intersecciones señalizadas, en lo que concierne a la dinámica del semáforo, cada fase ϕ es caracterizada por los flujos f que están habilitados dentro de dicha fase. En consecuencia solamente los intervalos de verde y ámbar se toman en cuenta, puesto que todos los flujos de entrada que no encuentran un recurso disponible (luz verde o ámbar), están frente a un rojo, lo que da lugar a la formación de una cola q y los tiempos de espera.

- Los eventos de requerimiento de control, cuando un flujo de entrada cambia, cambia la dinámica de la cola y el plan óptimo de semáforos deberá ser recalculado, utilizando un controlador prioritario.
- Eventos especiales, caracterizados por situaciones extraordinarias como accidentes, paro de vehículos, en los que se produce un bloqueo o cambio en los flujos.
- Eventos de tipo general como son el destino, el número y tipo de vías y el tipo de usuario.

3.4 MODELOS USANDO REDES PETRI

Las Redes Petri, aparecen como una herramienta matemática y gráfica, proporcionando un entorno uniforme para la modelación, el análisis formal y el diseño de sistemas de eventos discretos. Una de sus mayores ventajas es que el mismo modelo sirve para el análisis y la evaluación del comportamiento, así como para una construcción sistemática de un simulador y controlador de eventos discretos [42].

3.4.1 REDES PETRI ORDINARIAS

Una Red Petri Ordinaria o Discreta puede ser identificada como un caso particular de grafos directos bipartitos, constituidos por tres tipos de elementos: *lugares p* (representados por círculos), *transiciones t* (representados por barras) y *arcos directos* (representados por flechas) que conectan los *lugares* con las *transiciones* y las *transiciones* con los *lugares*, de manera que representan transiciones entre *lugares* de entrada y salida.

Los *lugares* de entrada (o de salida), pueden representar las condiciones previas *pre conditions* (o condiciones posteriores, *post conditions*) en la transición de un evento.

También los *lugares de entrada* pueden representar la disponibilidad de recursos, la *transición* su utilización y los *lugares de salida* la liberación de recursos.

Con el propósito de modelar el comportamiento dinámico del sistema, en términos de sus estados y sus cambios, cada *lugar* potencialmente puede contener un número positivo de *tokens* (representados por marcas sólidas). La presencia o ausencia de un *token* en un *lugar*, puede indicar que una condición asociada con ese *lugar* es verdadera o falsa.

En cualquier instante de tiempo la distribución de *tokens* en los *lugares*, denominado *marcación*, define el estado actual del sistema modelado.

El cambio de las distribuciones de *tokens* en los *lugares* puede reflejar la ocurrencia de eventos o la ejecución de operaciones. El flujo de *tokens* está condicionado a las siguientes reglas:

- **Regla de habilitación:** una *transición* t está habilitada si cada *lugar de entrada* p de t , contiene al menos un número de *tokens* igual al peso del arco dirigido que conecta p con t .
- **Regla de disparo:** un disparo de una *transición* t habilitada remueve de cada *lugar de entrada* p el número de *tokens*, igual al peso del arco dirigido que conecta p con t y deposita en el *lugar de salida*.

Formalmente, una Red Petri está definida por un conjunto de 5 elementos [11]:

$$PN = (P, T, I, O, M_0) \quad \text{Ec. 3.36}$$

donde: $P = \{p_i\}$, $i = 1, \dots, m$ conjunto finito de *lugares*

$T = \{t_j\}$, $j = 1, \dots, n$ conjunto finito de *transiciones*

$I(p, t)$ incidencias de *arcos* con sentido *lugar – transición*

$O(t, p)$ incidencias de *arcos* con sentido *transición - lugar*

M_0 marcas iniciales asociadas a los *lugares*

La figura 3.8 representa un modelo de Red Petri con flujo de *tokens* a través de *arcos* múltiples.

Las *transiciones* que no tienen *arcos* de entrada, se llaman *transiciones fuente*, éstas siempre están habilitadas. Las *transiciones* sin *arcos* de salida sólo consumen *tokens*.

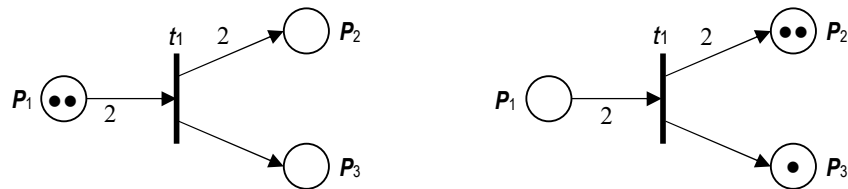


Figura 3.8 Habilitación y disparo de transición por arcos múltiples

Utilizando Redes Petri Ordinarias, es posible modelar y simular eventos discretos como en el caso del comportamiento dinámico de un semáforo de dos fases L_1 y L_2 , como lo muestra la figura 3.9 [26].

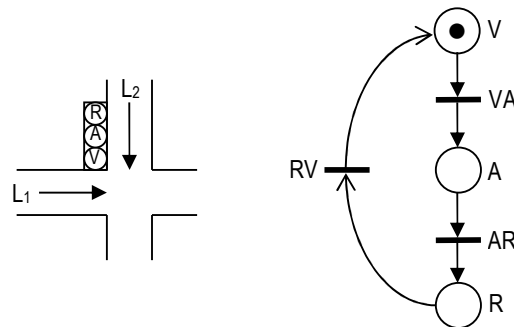


Figura 3.9 Modelo de una intersección semaforizada

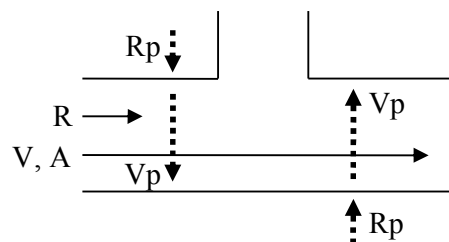


Figura 3.10 Cruce peatonal

La figura 3.10 muestra el diagrama de cruce peatonal, donde el semáforo es actuado por medio de un pulsador activado por un peatón [18].

Para la construcción y simulación del modelo se utiliza el toolbox de redes Petri del Matlab [31]. La figura 3.11 muestra el diagrama de simulación del semáforo actuado, usando dicha herramienta.

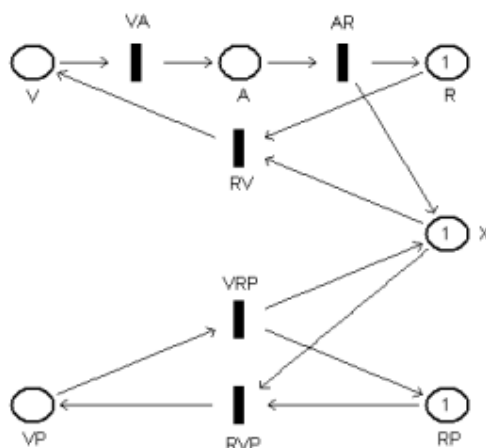


Figura 3.11 Reporte de simulación del semáforo actuado

3.4.2 REDES PETRI TEMPORALIZADAS

La población de un sistema de Tráfico Vehicular se describe por el número de vehículos, que es un valor discreto. Entonces un modelo de evento discreto puede describir adecuadamente el comportamiento del Tráfico Vehicular.

En el enfoque macroscópico de sistemas de Tráfico Vehicular, en vez de considerar los vehículos en forma individual, principalmente se considera tres variables reales: densidad, velocidad y flujo. De esta manera se llega a un modelo agregado de Tráfico Vehicular basado también en Redes Petri Continuas, dando lugar a las Redes Petri Híbridas [2], [40].

La red de vías se subdivide en secciones. Cada sección es modelada por una

Red Petri Continua. El modelo para toda la red es obtenida uniendo los modelos de las secciones. El flujo de vehículos de una sección a la próxima sección (dinámica de tiempo continuo de la vía), se representa por el flujo de la transición que interconecta a ambas secciones. De esta manera el modelo es altamente composicional.

En el modelo propuesto se considera una velocidad de transición constante, además el flujo de la transición es proporcional al grado de habilitación. Este hecho está de acuerdo con el diagrama fundamental de tráfico. El flujo de transición es proporcional a la marca del lugar de entrada (número de vehículos), lo que determina el grado de habilitación.

A continuación se define el fundamento de la modelación de las vías. El estado de una sección de vía está descrito por tres variables macroscópicas: densidad ρ de los vehículos, velocidad promedio v y flujos f . La marca de un lugar representa el número de vehículos en la sección, estos vehículos están uniformemente distribuidos a lo largo de la sección y tienen una velocidad media.

Nótese que la marca es proporcional a la densidad de los vehículos a lo largo de la sección, el flujo de vehículos saliendo de la sección está dado por $f = v\rho$.

Un sistema de tráfico con baja densidad fluye a una velocidad libre (flujo de tráfico libre). Aquí el flujo de la sección se incrementa proporcionalmente con la densidad. Cuando la densidad de la sección es más alta, la velocidad media decrece y el flujo de salida en esta sección se mantiene idealmente constante. Si la densidad es mucho más alta, el tráfico se hace pesado y el flujo de la sección decrece, esta relación entre el flujo y la densidad es representada por el diagrama fundamental de tráfico.

La modelación de la red puede hacerse considerando flujo libre, flujo constante o flujo de congestión, en cuyo caso se debe añadir mayores retardos.

El Tráfico Vehicular es un sistema dinámico híbrido, de eventos discretos en el semáforo y de tiempo continuo en las vías. Por esta razón se introducen las

Redes Petri Temporalizadas con la finalidad de simular la dinámica de tiempo continuo. Una Red Petri Temporalizada asocia retardo a sus nodos (lugar o transición), lo que da lugar a una Red Petri Continua.

Se puede construir un modelo agregado para sistemas de Tráfico Vehicular Usando Redes Petri Continuas se puede construir modelos de Tráfico Vehicular, subdividiendo la red en secciones. Cada sección es modelada por separado por una Red Petri Continua. El modelo para la red completa se obtiene agregando las redes de las secciones. En el modelo propuesto el flujo a través de las transiciones es variable (no es instantáneo como en las Redes Petri Discretas). Se utiliza Redes Petri con retardo en las transiciones.

Los retardos en las transiciones definen la duración del disparo, es decir cuanto hay que esperar desde el consumo de tokens en sus pre conditions hasta la producción de tokens en sus post conditions. Los tiempos de disparo y habilitación definen el tiempo a transcurrir hasta que la transición pueda ser hábil, si se cumplen las condiciones de marca.

Otra forma de plantear el modelo es mediante la introducción de retardos en los lugares. Así se tiene retardos para lugares o tiempos de espera, que indican cuanto debe permanecer una marca en un lugar antes de permitir la habilitación de una transición.

En resumen una Red Petri Híbrida está compuesta de una PN "ordinaria" (discreta) y una PN continua (temporalizada) [15].

Los sistemas de eventos discretos temporalizados permiten modelar tanto la dinámica activada por eventos que incluye cambios en las fases, requerimientos de control y eventos especiales; como gráficos que contienen lugares y transiciones discretas, representadas por círculos y barras.

Las Redes Petri Temporalizadas tanto de lugares como de transiciones, permiten representar la dinámica de tiempo continuo y vienen representados los lugares por doble círculo y las transiciones por rectángulos.

3.5 MODELOS DE SIMULACIÓN POR COMPUTADOR

Una Red de Tráfico Urbano (*Urban Traffic Network* UTN) es tratada como un Modelo Híbrido, porque tiene una dinámica de tiempo continuo en las vías y los usuarios (vehículos) y eventos discretos en los ciclos de los semáforos. El movimiento de los vehículos considera un modelo de micro simulación del tipo siga al líder (*Car-following*). El Plan de Control consiste de una secuencia de eventos que incluye una intersección señalizada (movimientos y fases) [40].

El modelo de simulación por computador debe considerar:

La estructura de red: El modelo de una red de tráfico está compuesto de un grupo de secciones (enlaces de una sola dirección) conectados a otros a través de nodos (intersecciones), que pueden tener diferentes características de tráfico tales como características geométricas de una zona crítica, tamaños, número de vías, grupos de secciones, posibles movimientos de giro, etc. Este es el prototipo de la planta.

Información de la demanda de tráfico: La planta tiene variables como flujo, colas, velocidad; algunas representan variables de estado o flujos de entrada y salida. El modelo debe incluir al menos flujo y Plan de Control. La información de la demanda de tráfico puede ser definida por medio de flujos de tráfico en las secciones y por matrices O/D.

Control de Tráfico: El modelo de simulación toma en cuenta diferentes tipos de control de tráfico: semáforos, señales de ceda el paso y de ingreso a las vías. Los dos primeros son utilizados en nodos de intersecciones y el tercero al final de un nodo de juntura. Las intersecciones señalizadas consideran un control en lazo abierto a través de un Plan de Control.

Modelo del movimiento del vehículo: Durante su viaje a lo largo de la red, los vehículos son actualizados de acuerdo al modelo del vehículo del tipo *Car-following* y *Lane-changing*.

El modelo propuesto usa datos obtenidos a través de mediciones de campo. El modelo de simulación incluye flujos y colas para el caso determinístico. En este trabajo de Tesis no se analiza el caso estocástico. También se incluye el Plan de Control considerado como un Sistema de Eventos Discretos (*Discrete Event Systems* DES).

3.5.1 MODELO DE FLUJO Y CONGESTIÓN

La ZC EPN–PUCE compuesta por intersecciones y vías, considera dos Casos de estudio. La figura 3.14 muestra una vista aérea física de dicha Zona Crítica (Google 2006). La figura 3.15 presenta una abstracción de la estructura básica de esta Zona Crítica obtenida de una sección del mapa de la ciudad de Quito, descargada en AutoCad [38].



Figura 3.14 Vista aérea de la ZC EPN–PUCE

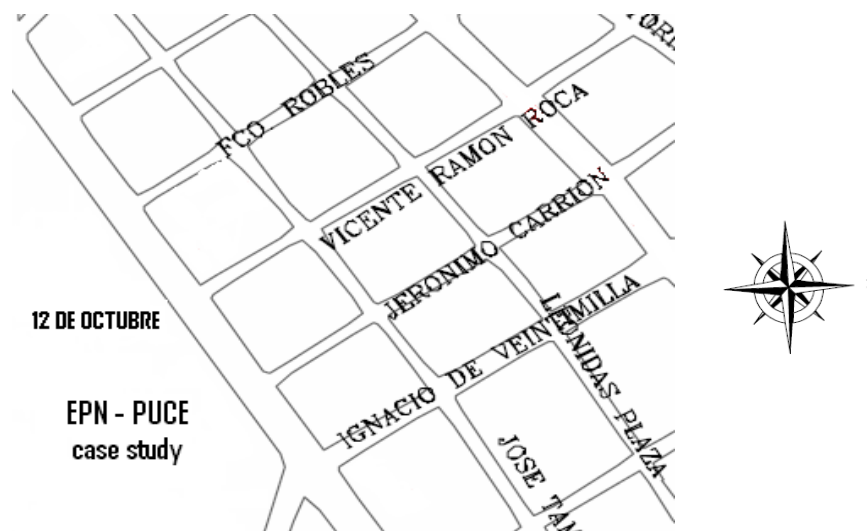


Figura 3.15 Abstracción de la estructura básica de la ZC EPN–PUCE

El modelo de simulación de flujos se muestra en la figura 3.16

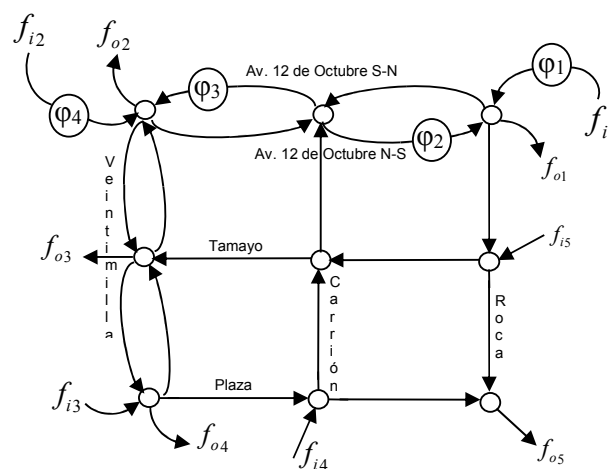


Figura 3.16 Modelo de simulación de flujos de la ZC EPN–PUCE

El método utilizado en el nodo (intersección) de la Av. 12 de Octubre y Roca, es el de demanda de tráfico.

La figura 3.17 muestra la intersección señalizada con dos fases (ϕ_1 y ϕ_2), correspondiente a la Av. 12 de Octubre y Roca. Esta intersección en particular contempla dos direcciones de entrada (vías), denominadas f_{i0} y f_{i20} y tres direcciones de salida, denominadas f_{i1} , f_{i22} y f_{i33} . Las colas se forman en la

intersección señalizada: q_1, q_2 [15], [21].

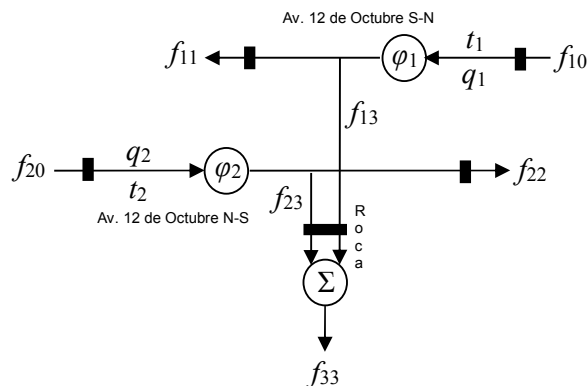


Figura 3.17 Modelo de simulación usando demanda de tráfico

3.5.2 MODELO DE SIMULACIÓN

Los estados de la Red son: flujos y colas en las vías; divisiones, ciclos y retardos en los semáforos (para un control en lazo cerrado) [21]; y, posiciones y velocidades de los vehículos. Los flujos correspondientes a la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca se relacionan mediante la expresión matricial, dada por:

$$\begin{bmatrix} 0.9 & 0.0 \\ 0.0 & 0.85 \\ 0.1 & 0.15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{10}^3 \\ f_{20}^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}^3 \\ f_{22}^3 \\ f_{33}^1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.37}$$

Donde, el superíndice representa el número de carriles en la vía. Las colas se relacionan con las distribuciones de los arribos entre dos vehículos consecutivos λ y las salidas μ , de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\lambda_1, \mu_1) \\ f_2(\lambda_2, \mu_2) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.38}$$

Éstas son funciones no lineales y requieren de un análisis estadístico de colas.

La estructura geométrica de la Red se modela a través de secciones interconectadas en cada nodo o intersección, como se muestra en la figura 3.18 [40].

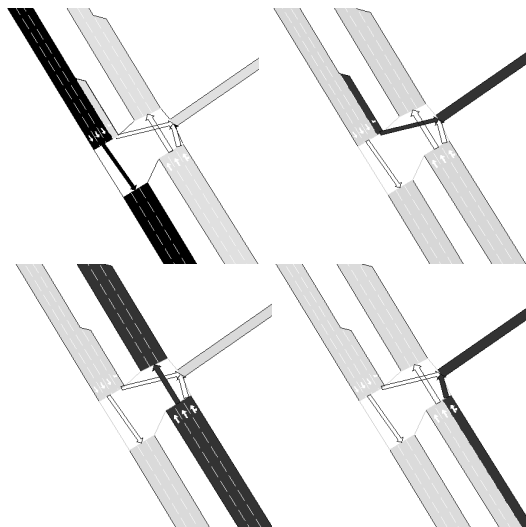


Figura 3.18 Conjunto de señales en la intersección de Av. 12 de Octubre y Roca

La simulación de los semáforos requiere de dos instancias: de las fases con sus movimientos y señales; y de la secuencia de eventos del Plan de Control.

La tabla 3.4 muestra la instancia de las fases en la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca.

Tabla 3.4 Fases, movimientos y señales en Av. 12 de Octubre y Roca

Fases	Movimientos	Señales
φ_1		S_1 S_3 S_4
φ_2		S_1 S_2

La figura 3.19 muestra la secuencia de eventos, con la longitud del ciclo y el tiempo de verde, pero considerando la intersección semaforizada de la Av. 12 de Octubre y Veintimilla, correspondiente también a la ZC EPN-PUCE.

La tabla 3.5 presenta la secuencia de eventos correspondientes a la intersección de la Av. 12 de Octubre y Veintimilla.

Tabla 3.5 Secuencia y arreglo de eventos en la Av. 12 de Octubre y Veintimilla

	Tiempo de:		Arreglo de fases	
	inicio	duración	ϕ_1	ϕ_2
S_1	0	90	1	1
S_2	0	60	0	1
S_3	60	30	1	0
S_4	0	60	1	0

Por otro lado, la ZC EPN-PUCE completa (figura 3.16) tiene dos intersecciones semaforizadas (con semáforos) y siete intersecciones no semaforizadas (con señalización: pare, ceda el paso); en consecuencia es necesario un Plan de Control Maestro para coordinar las secuencias de eventos.

En esta ZC se utiliza una matriz O/D, la misma que contiene datos de simulación. En esta matriz se ubican los flujos de entrada en las filas y los flujos de salida en las columnas, tal como se presenta en la Ec. 3.39 [40].

$$O/D = \begin{bmatrix} 10 & 1182 & 7 & 13 & 92 \\ 1380 & 62 & 101 & 293 & 108 \\ 171 & 360 & 7 & 24 & 67 \\ 64 & 15 & 19 & 32 & 31 \\ 23 & 15 & 19 & 31 & 111 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.39}$$

Los vectores de los flujos de entrada y salida vienen dados por:

$$f_i = \begin{bmatrix} 1304 \\ 1944 \\ 629 \\ 161 \\ 199 \end{bmatrix} \quad f_o = \begin{bmatrix} 1648 \\ 1634 \\ 153 \\ 393 \\ 409 \end{bmatrix}$$

Ec. 3.40

3.5.3 PARÁMETROS

El modelo de simulación tiene: vías, intersecciones, Planes de Control, vehículos (usuarios); variables como: flujos, colas, tiempos de verde; parámetros, tales como número y dimensiones de las vías, longitud de los vehículos, secuencias, capacidad vial. Las variables y los parámetros se obtienen a través de mediciones o cálculos, utilizando variables primarias.

Los parámetros estáticos son asignados o analizados usando el simulador AIMSUN. Es posible asignar o definir parámetros tales como: dimensiones (longitud, ancho), aceleración y desaceleración deseadas, tiempo de reacción, clase de vehículo, etc. Las características dinámicas también pueden ser asignadas y desplegadas, tales como: velocidad actual, velocidad media deseada, posición actual, etc.

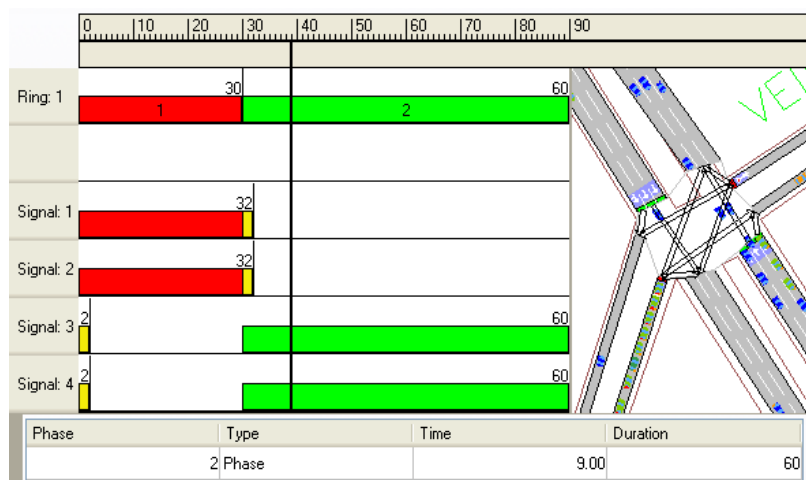


Figura 3.19 Secuencia de eventos del semáforo en Av. 12 de Octubre y Veintimilla

3.5.4 MEDICIONES

En esta Tesis la simulación está basada en mediciones de flujo, esto corresponde a información obtenida mediante video cámaras [39] y software desarrollado en LabView [35]; conteo manual, correspondiente a flujo de tráfico y longitudes de cola.

La tabla 3.6 es un ejemplo de las mediciones de campo en la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca. Los datos corresponden al número de vehículos que ingresan a la calle Roca desde la Av. 12 de Octubre en el sentido Norte – Sur. Cada ciclo semafórico en esta intersección es de 75 segundos. Estos datos se presentan en segmentos de 15 minutos (12 ciclos).

Tabla 3.6 Detalle de mediciones en intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca

Fecha: 26 de Octubre de 2006

Hora de inicio: 12h00

Medición: Vehículos ingresan a la Roca desde la Av. 12 de Octubre N - S

Primer ¼ de hora		Segundo ¼ de hora		Tercer ¼ de hora		Último ¼ de hora	
# Ciclo	Total	# Ciclo	Total	# Ciclo	Total	# Ciclo	Total
1	12	1	14	1	9	1	8
2	6	2	6	2	6	2	9
3	8	3	6	3	7	3	4
4	4	4	4	4	6	4	3
5	8	5	6	5	7	5	10
6	8	6	10	6	5	6	13
7	4	7	5	7	6	7	4
8	9	8	6	8	5	8	9
9	2	9	8	9	7	9	5
10	7	10	8	10	5	10	2
11	6	11	7	11	4	11	8
12	5	12	8	12	5	12	6
Suman	79	Suman	88	Suman	72	Suman	81

En resumen, según los datos de la tabla 3.6, se deduce que el flujo horario en la calle Roca es de 320 [veh/h].

Por otra parte, el simulador profesional AIMSUN requiere de la localización de sensores en las secciones de las vías con el propósito de medir el Comportamiento Dinámico. Estos sensores son utilizados para Calibrar y Validar los modelos de simulación de las ZC-Q.

También el análisis estadístico de la información es utilizado para la Validación del modelo de simulación y el análisis de congestión, considerando condiciones de flujo [23].

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR

4.1 SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DEL TRÁFICO VEHICULAR

La evaluación comparativa de estrategias de administración de tráfico, que se usan en la simulación, esencialmente involucran un estudio enfocado en ciertas variables como los flujos de tráfico, tiempos de viaje, velocidades, longitudes de cola, etc.

La simulación de tráfico ha estado en uso desde los años 50, pero el reciente desarrollo de la tecnología computacional ha ayudado a desarrollar el software más sofisticado para el uso de la simulación, como herramienta para la toma de decisiones. La simulación de tráfico es la representación del modelo, de las acciones e interacciones de tráfico que existen en los medios de transporte, sobre períodos extendidos de tiempo. Los modelos de simulación aplican las técnicas matemáticas para predecir la dinámica del sistema, basada en una representación de eventos individuales en el espacio y en el tiempo, y reflejan la naturaleza aleatoria del tráfico [1], [9], [14].

Los modelos de simulación pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de representación del flujo vehicular (microscópico y macroscópico), o al tipo de proceso (basados en eventos o en el tiempo), o según el propósito (descriptivo o normativo), o de acuerdo al modo del proceso (fuera de línea o en tiempo real).

Los modelos microscópicos capturan el movimiento de cada vehículo. Pueden rastrearse a los vehículos a través de la red, sus trayectorias de tiempo - espacio pueden trazarse. Los modelos macroscópicos están en el otro lado del espectro. Ellos tienden a emplear la tasa de flujo variable y otros descriptores en general (fenómeno de choque de onda) de cómo el tráfico está moviéndose.

Los modelos simples fuera de línea pueden simular el comportamiento de sistemas con mayor rapidez que los modelos en tiempo real, mientras más complejos sean los sistemas pueden correr más lentamente que en tiempo real. Un segundo de tiempo simulado debe ser un segundo de tiempo real.

El énfasis está en probar y evaluar las varias estrategias de operación de tráfico para aliviar la congestión de tráfico que existe en la red. Estas estrategias incluyen el uso de señales de límites de velocidad, y modificaciones de la infraestructura como la incorporación de carriles.

El modelo usa datos coleccionados en un día representativo y en una hora específica a intervalos cortos. En cada intervalo, la distribución de las llegadas de vehículos está regulada por la distribución aleatoria de Poisson.

Una herramienta de simulación y optimización de amplia aplicación es el TRANSYT (*TRAffic Network StudY Tool*) [1], [15]. TRANSYT que simula el tráfico a nivel microscópico, esencialmente tiene 2 elementos: el modelo de tráfico de la red y el proceso de optimización. El modelo de tráfico predice el valor del índice de comportamiento de la red, para cualquier plan de tiempo fijo para un conjunto de flujos medios que son de interés.

Debido a las fluctuaciones diarias y horarias en el tráfico (comportamiento aleatorio), se hace necesario ir por un sistema de simulación y optimización en línea como es el SCOOT [15] (*Split Cycle Offset Optimization Technique*), en el cual el tráfico puede ser censado en tiempo real a través de detectores. Tal sistema de simulación se ha implementado en ciudades a nivel mundial [1].

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

AIMSUN es un simulador de tráfico microscópico que puede tratar con diferentes redes de tráfico: urbanas, autopistas, circunvalaciones, vías de alta velocidad, arterias viales y una combinación de lo mencionado. Ha sido diseñado como una

herramienta de análisis, ayuda en el diseño y evaluación, útil para pruebas de sistemas de control y políticas de administración de tráfico, basada en tecnologías tradicionales y metodologías de sistemas de transportación inteligente.

AIMSUN sigue un método de simulación microscópico, lo que significa que el comportamiento de cada vehículo en la red está modelado continuamente a lo largo del periodo de simulación, mientras viaja a través de la red, de acuerdo con modelos de comportamiento vehicular, como es el de siga al líder (*car following*) y cambio de vía (*lane changing*).

Es un simulador combinado discreto y continuo, o sea existen algunos elementos del sistema (vehículos, detectores) cuyos estados cambian continuamente durante el tiempo de simulación, los cuales son evaluados en intervalos cortos y fijos de tiempo llamados ciclos de simulación. Hay otros elementos (semáforos, puntos de entrada) cuyos estados cambian discretamente en puntos o instantes específicos en el tiempo de simulación.

El sistema provee un alto detalle en la modelación de la red de tráfico, distingue entre diferentes tipos de vehículos, habilita un amplio rango de características geométricas de la red y puede también modelar incidentes, maniobras conflictivas y varios escenarios. La mayoría de dispositivos de tráfico presentes en una red real también son modelados: semáforos, detectores, señalizaciones, accesos, etc.

Los parámetros de modelación de los vehículos se agrupan en tres categorías, de acuerdo con el nivel de definición:

- Atributos de los vehículos, al nivel del tipo de vehículo como auto, bus, camión, etc. (longitud, ancho, velocidad máxima deseada, aceleración, desaceleración, etc.).
- Parámetros en la sección local, relacionados a secciones de vías (velocidad límite de la sección, velocidad de giro, visibilidad, distancia, etc.).
- Parámetros globales de la red (paso de simulación, tiempo de reacción de los

conductores a cambios de velocidad en el vehículo precedente, tiempo de reacción de parada, etc.).

Se puede decir que AIMSUN permite manejar la geometría de la red de tráfico, las variables de los vehículos y los detectores, sus estados, diferentes dispositivos de control de tráfico y diferentes condiciones de tráfico, lo que lo hace potencialmente útil para la evaluación del Comportamiento Dinámico, del Nivel de Servicio, de las políticas de Planificación y Administración de transporte; y, de las estrategias de control.

Los datos de entrada requeridos por el simulador son el escenario de simulación y un conjunto de parámetros de simulación, que describen el experimento (modelo) [1], [40]. El escenario se compone de cuatro tipos de datos: descripción de la geometría de la red (intersecciones y vías), Planes de Control de tráfico, datos de demanda de tráfico y planes de transportación pública. Los parámetros de la simulación son valores fijos que describen el experimento (tiempo de simulación, intervalos estadísticos) y algunos parámetros variables usados para calibrar el modelo (tiempos de reacción, longitud de vehículos, zonas de cambio de carril, porcentajes de giro).

Los requerimientos de entrada tienen que ver con el modelo de simulación de la red de tráfico, que está compuesta de un grupo de secciones (enlaces de una vía) conectadas a otros grupos a través de nodos (intersecciones), los cuales pueden contener diferentes características de tráfico. Para construir el modelo de la red se requieren los siguientes datos de entrada:

- Mapa del área, preferiblemente un mapa digitalizado en formato .dwg [38].
- Detalles del número de carriles por sección, carriles reservados y carriles laterales (rampas de entrada y salida).
- Posibles movimientos de giro para cada juntura, incluyendo detalles acerca de los carriles desde los cuales cada giro es permitido y marcados con líneas sólidas en la superficie de la vía.

- Velocidades límites para cada sección y velocidades de giro para giros permitidos en cada intersección.
- Detectores: posición y capacidad de medición.
- Señales de mensajes variables: posición (opcional) y posibles mensajes.

Los datos de demanda de tráfico se definen en dos formas diferentes:

- Por demanda de flujo de tráfico en las secciones: tipos y atributos de los vehículos, flujo en la sección de entrada de la red y porcentajes de giro en todas las secciones.
- Por matrices Origen - Destino O/D: definición de centroides (fuentes y sumideros de tráfico de una zona), tipos de vehículos y atributos, y las rutas que van de cada origen del centroide a cualquier destino del centroide.

Las salidas proporcionadas por AIMSUN son una representación gráfica continua del comportamiento de la red de tráfico en dos y tres dimensiones (despliega intensiones de giro, de frenado, a través de indicadores luminosos), datos estadísticos de salida (flujo, velocidad, tiempo de viaje, retardo, paradas) y datos recogidos por detectores simulados (conteo, ocupación, velocidad, longitud de cola). Esto permite analizar el comportamiento instantáneo del sistema de tráfico, definido usualmente en términos de variables de Tráfico Vehicular, como son flujos, velocidades, ocupaciones, longitudes de cola, y así sucesivamente, los cuales pueden ser medidos por detectores de tráfico en localizaciones específicas en la red.

AIMSUN permite desarrollar modelos de simulación con alto grado de validación.

Tiene la capacidad de generación de distintos tipos de intervalos de llegada, entre ellos la forma exponencial. En las secciones de entrada se manejan distribuciones exponenciales de intervalos de llegada. Puede aceptar rutinas de control usando DLL externas y una interfaz de aplicación (*Application Programme Interface API*) [40].

4.3 EDICIÓN DE LA SIMULACIÓN

En esta parte, se crea las zonas de los Casos de estudio que serán sometidos a la simulación. El modelo de la zona contempla la geometría de las vías y los datos necesarios como el flujo vehicular, características estáticas de vehículos, las fases y ciclos de intersecciones señalizadas, colocación de detectores para obtención de información, entre otros.

4.3.1 DEFINICIÓN DE LA ZONA CRÍTICA

La definición de la Zona Crítica se hace importando imágenes de mapas que permitan ubicar y crear el modelo de simulación. Los formatos de importación que soporta el AIMSUN son .dwg, como en el caso del *Autocad* que se usa en esta Tesis y .jpg de imágenes de *Google*. En este caso se usa el menú *File/Import*. Se empieza importando la Zona Crítica y creando un archivo de *background.dwg* (fondo). Para el caso de matrices O/D se definen centroides, que son Zonas Críticas completas con nodos (intersecciones) de entrada y salida. La figura 4.1 muestra la ZC EPN-PUCE y a la ZC de la Av. Colón entre la Av. 6 de Diciembre y Av. 10 de Agosto, correspondiente al mapa de Quito en *Autocad* versión 2005.

4.3.2 SECCIONES E INTERSECCIONES

Sobre el fondo de una ZC-Q se crea la geometría de la red, se añaden secciones seleccionando el botón *Create Section* del menú *Toolbar*. Se puede modificar la posición de la sección, crear nuevos vértices, añadir carriles, carriles laterales, vías y secciones de vías seleccionadas que pueden unirse en intersecciones, utilizando la opción *Join* del Menú. La creación de nodos para formar las intersecciones utiliza el ícono de creación de nodo, que permite desplegar el editor de nodos.

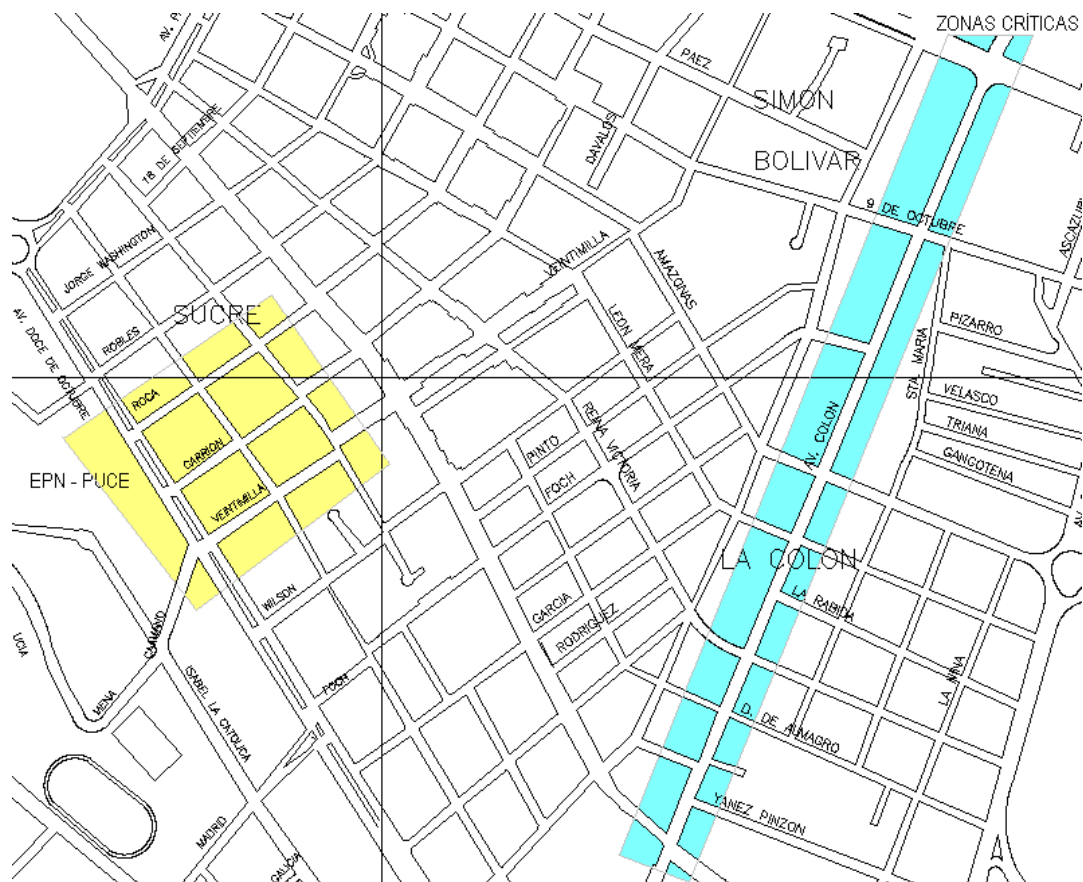


Figura 4.1 Imagen de Zonas Críticas de estudio (background)

La figura 4.2 muestra las secciones en las vías correspondientes a una intersección de la ZC EPN-PUCE.

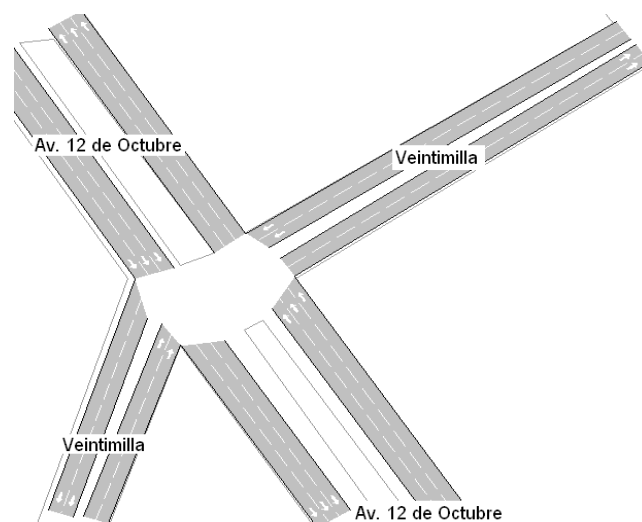


Figura 4.2 Trazo de secciones en vías de una intersección de la ZC EPN-PUCE

Se crea nodo por nodo haciendo clic en la opción *New* del editor de nodos y usando el *Mouse* para seleccionar los carriles en la sección origen (la tecla *Shift* permite seleccionar múltiples carriles), seguido de los carriles de la sección destino, como lo muestra la figura 4.3.

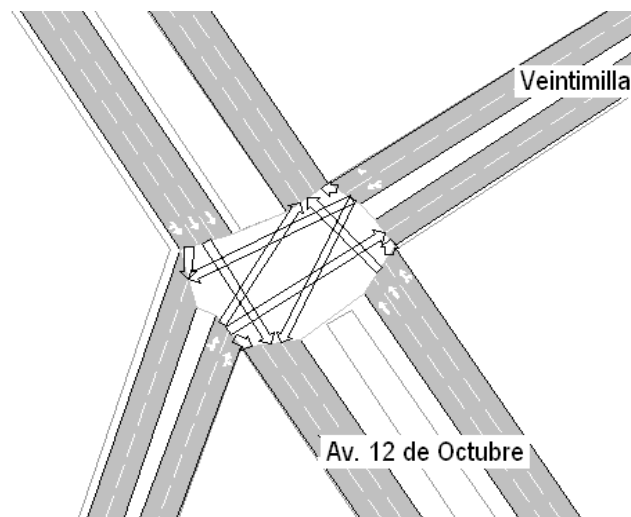


Figura 4.3 Creación de un nodo en la ZC EPN-PUCE

De esta manera también se pueden generar redondeles. Se diseñan arterias, rampas de entrada y salida, y vías en general.

AIMSUN además soporta la opción de crear capas, que son grupos de vías a diferentes altitudes, seleccionando en el menú *Network* la opción *Layer New*.

4.3.3 PLAN DE CONTROL

El simulador empieza creando grupos de señales, haciendo doble clic en la intersección y seleccionando la opción *Signal Groups*, permite interconectar grupos origen con grupos destino, que representan los movimientos que tiene opción el Tráfico Vehicular en las secciones e intersecciones modeladas, como lo muestran la figura 4.4 y la tabla 4.1.

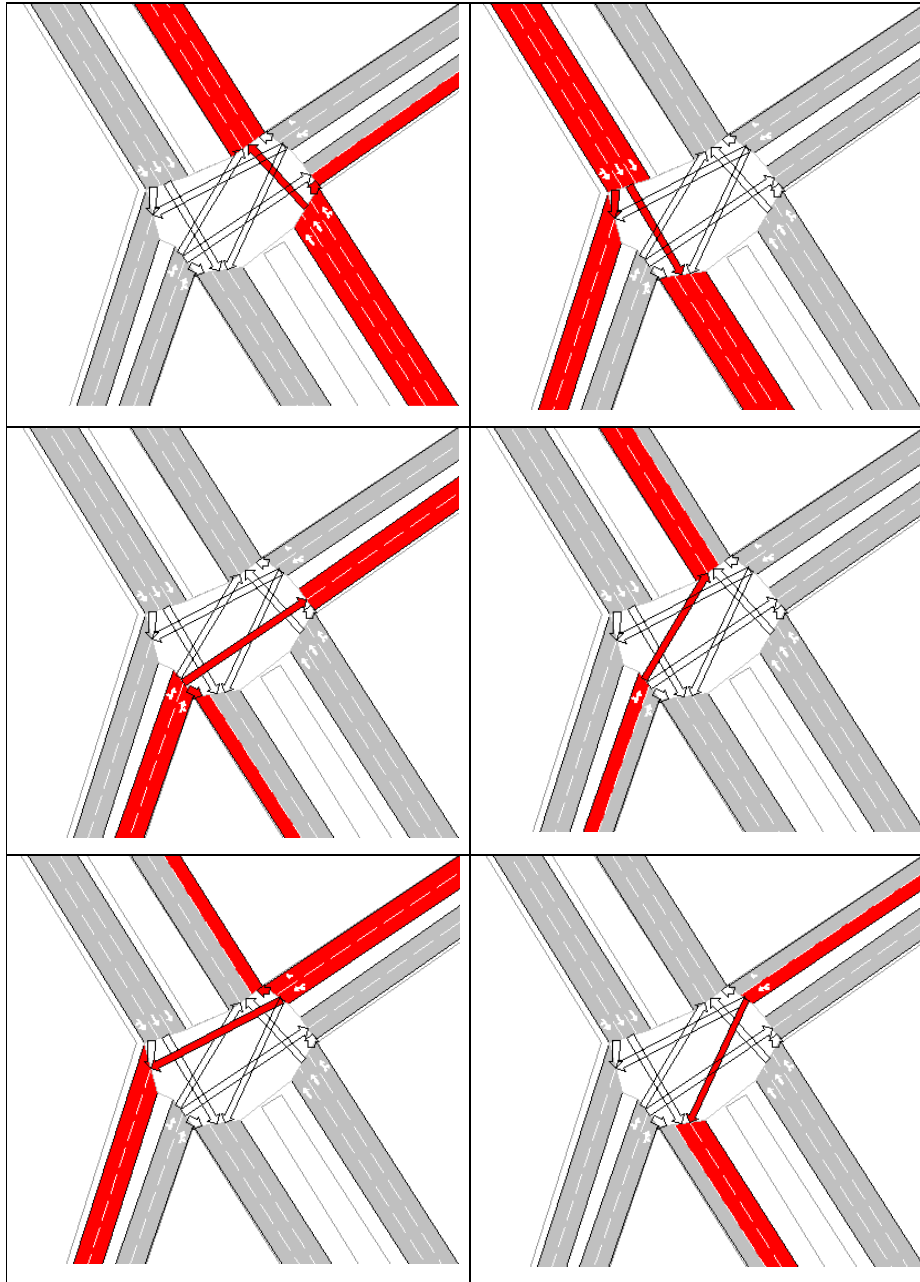


Figura 4.4 Grupos de señales de una intersección de la ZC EPN–PUCE

A continuación corresponde establecer el Plan de Control utilizando la creación de fases como una combinación de las señales. Los Planes de Control se crean en el menú *Site/New/Control Plan*.

Una vez que se ha creado el Plan de Control, haciendo doble clic en la intersección se procede a llenar la información de las fases. Para un Plan de

Control fijo se empieza a completar la información, con los parámetros del tiempo de inicio y de duración como lo muestra la figura 4.5.

Tabla 4.1 Pantalla para creación de grupos de señales

Principal Grupos Semafóricos Ceda el Paso Control Atributos

Nombre

Signal 1
Signal 2
Signal 3
Signal 4
Signal 5
Signal 6

Giros en el grupo semafórico

Desde	Hasta
<input checked="" type="checkbox"/> 101:	103:
<input checked="" type="checkbox"/> 101:	105:
<input checked="" type="checkbox"/> 101:	99:
<input checked="" type="checkbox"/> 102:	103:
<input checked="" type="checkbox"/> 102:	105:
<input checked="" type="checkbox"/> 104:	100:
<input checked="" type="checkbox"/> 104:	105:
<input checked="" type="checkbox"/> 104:	99:
<input checked="" type="checkbox"/> 106:	100:
<input checked="" type="checkbox"/> 106:	99:

Principal Grupos Semafóricos Ceda el Paso Control Series temporales Atributos

Plan de Control: Plan de Control 12:00:00 Tipo: Fijo Ciclo: 90 segs.

Desplazamiento: 0 Tiempo de ámbar: 2 segs.

Tiempos Prioridad al transporte público

	Tiempo de inicio	Duración
Signal 1	0	60
Signal 2	0	60
Signal 3	60	15
Signal 4	75	15
Signal 5	60	15
Signal 6	75	15

Figura 4.5 Creación de fases dentro de un Plan de control fijo

4.3.4 DETECTORES

Para realizar análisis y control, usando modelos de control en AIMSUN, es necesaria la utilización de detectores para obtener información de variables de Tráfico Vehicular. Dentro de la red de Tráfico Vehicular ya creada, se procede a ubicar los detectores eligiendo el ícono de detector y haciendo un doble clic en la posición deseada sobre la sección. Con doble clic en el detector se seleccionan las características del mismo.

Se puede también añadir señales de mensajes variables en las vías principales del modelo (*Variable Message Signs VMS*), de manera similar a los detectores pero usando el ícono correspondiente al VMS [1].

4.3.5 DEMANDA DE TRÁFICO

La demanda de tráfico se analiza utilizando dos métodos: estados de tráfico y matrices Origen – Destino O/D. En el primer caso es necesario contar con la información de los flujos de entrada en los nodos externos y los porcentajes de giro en los nodos externos e internos. En el segundo caso se definen Centroides con nodos externos de entrada y salida, en donde no interesa la dinámica de los estados internos, sino más bien a manera de caja negra, las relaciones entre las entradas a la región y las salidas de dicha región. El software requiere conocer los flujos de entrada y salida sólo de los nodos externos de la ZC, para poder establecer la influencia de una entrada sobre todas las salidas.

Cuando la simulación de Tráfico Vehicular se realiza utilizando el método de demanda de tráfico por medio de estados, una vez implementada la geometría de las secciones e intersecciones, se procede con el ingreso de la información de los flujos en los nodos y los porcentajes de giro; puesto que la información que se mide es de flujos: de entrada y de derivación a las secciones que conforman el nodo.

Generalmente se usa el flujo horario o el de cada 15 minutos, puesto que es el tiempo mínimo en el que el Tráfico Vehicular se estabiliza. La información de los flujos en las secciones y los porcentajes de giro en los nodos, se realiza en todas las secciones e intersecciones de la Zona de Estudio.

La figura 4.6 muestra los datos de mediciones de campo en la ZC EPN-PUCE, en la que se detallan los flujos de entrada y los correspondientes porcentajes de giro en cada una de las intersecciones.

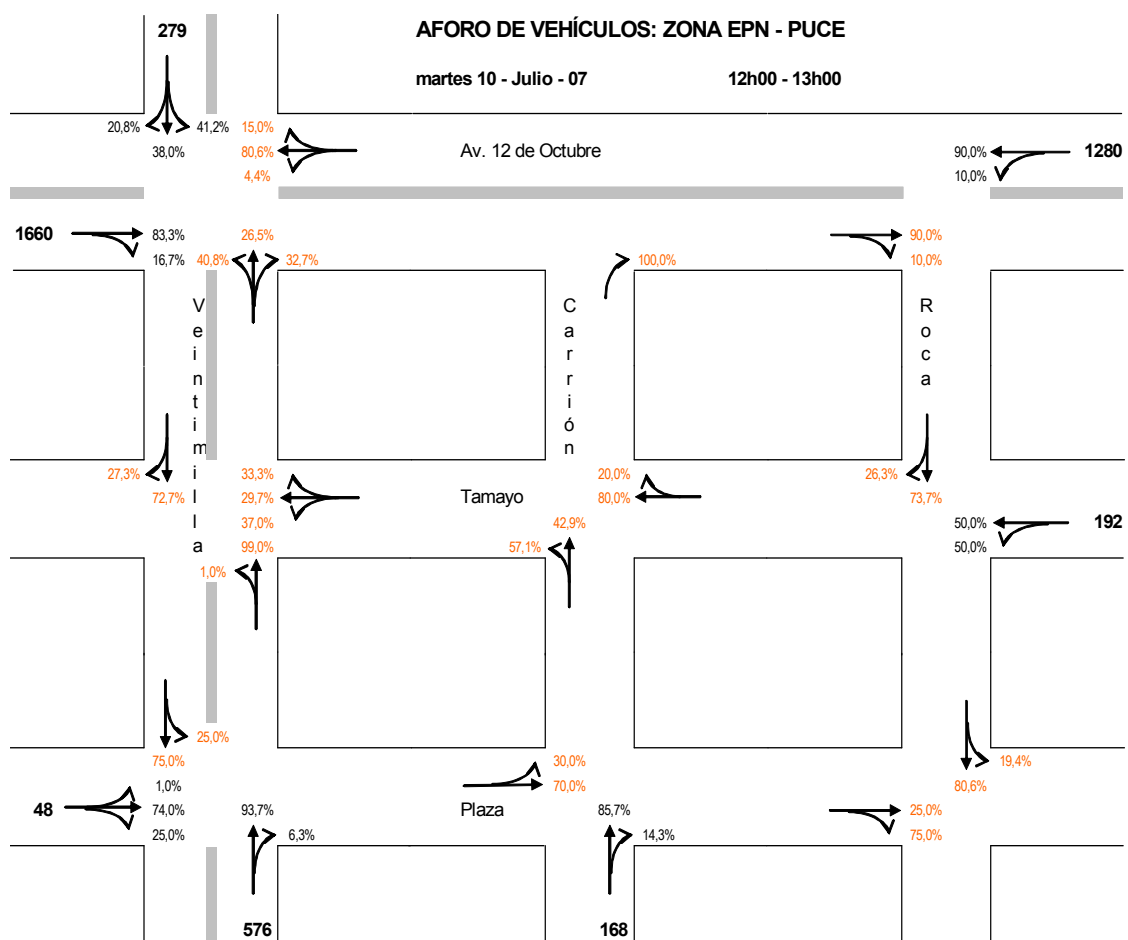


Figura 4.6 Datos de flujos de entrada y porcentajes de giro en la ZC EPN-PUCE

Estas medidas de campo se realizaron el martes 10 de julio de 2007 desde las 12h00 hasta aproximadamente las 13h20, tomando datos en cada intersección semaforizada (durante 5 ciclos completos) y no semaforizada (durantes 5 minutos continuos).

AIMSUN requiere la definición del estado de tráfico para representar la demanda mediante datos de entrada *veh/h* y porcentajes de giro, como lo muestran las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2 Tabla de flujos de entrada en la ZC EPN-PUCE

Flujo de entrada | Info del Giro | Parámetros

Tipo de Vehículo: 63: coche Desde: 12:00:00 Duración: 01:00:00

Mostrar sólo Entradas Copiar Pegar Usar Giros de Entrada

Sección	Flujo (veh/h)	Mantener Porcentaje
109:	1280	
121:	168	
124:	576	
151:	192	
155:	48	
169:	279	
171:	1660	

Tabla 4.3 Tabla de estado de giros en la ZC EPN-PUCE

Flujo de entrada | Info del Giro | Parámetros

Resaltar definiciones incorrectas Recalcular porcentajes de giro usando los flujos de salida

Mostrar Todas las Secciones Copiar Pegar Usar Giros de Entrada

Secciones del Giro	Porcentaje del Giro	Flujo en el Giro (veh)
99: hasta 100:	90	
99: hasta 199:	10	
107: hasta 98:	32.7	
107: hasta 168:	26.5	
107: hasta 170:	40.8	
108: hasta 123:	72.7	
108: hasta 154:	27.3	
109: hasta 199:	10	
109: hasta 112:	90	
112: hasta 168:	15	
112: hasta 170:	85	
119: hasta 118:	80.6	
119: hasta 146:	19.4	
120: hasta 196:	42.9	
120: hasta 153:	57.1	
121: hasta 120:	85.7	
121: hasta 145:	14.3	
122: hasta 107:	100	
122: hasta 154:	0	
124: hasta 122:	93.7	
124: hasta 144:	6.3	
144: hasta 145:	70	
144: hasta 120:	30	

Cuando la demanda de tráfico está dada como una matriz O/D, el primer paso es definir los centroides que corresponden a la matriz, sobre el fondo de la ZC, que va a permitir luego realizar las interconexiones desde una entrada hacia cada salida.

La figura 4.7 muestra los centroides de la ZC EPN – PUCE. Esta aplicación se realiza seleccionando el ícono de centroides en cada uno de los nodos (intersecciones) externos por donde hay entradas y salidas de flujos.

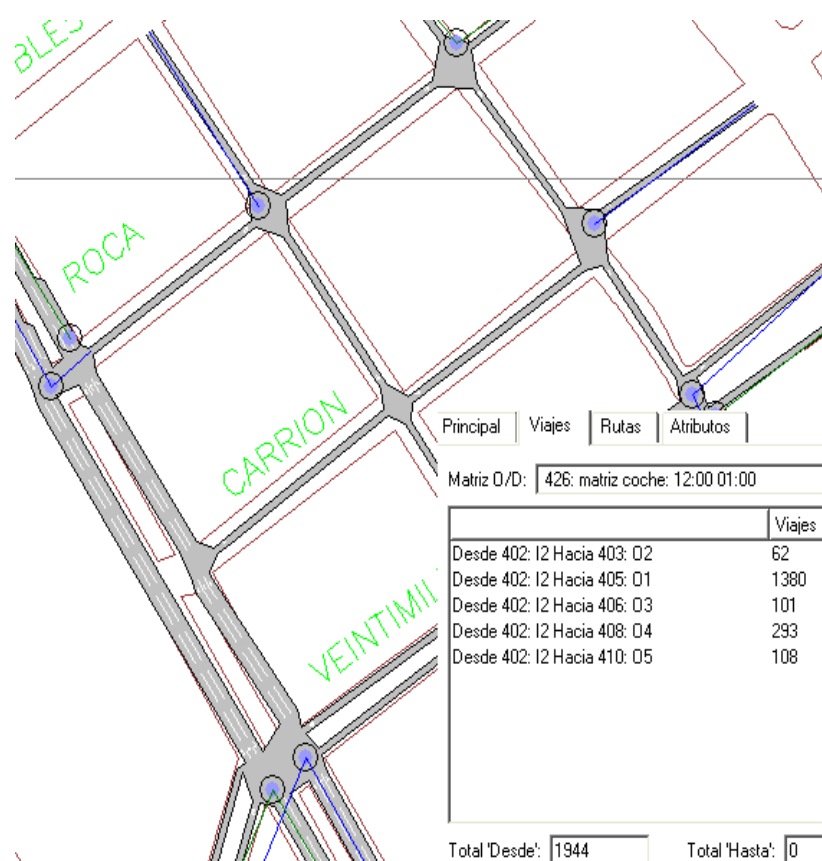


Figura 4.7 Centroides de la ZC EPN-PUCE

Para obtener los datos de la matriz O/D se corre la simulación con una entrada en particular y se obtiene, al final de la simulación, los flujos correspondientes en cada salida (previamente deben estar definidos los porcentajes de giro de las intersecciones internas de la ZC de estudio).

Esto se repite con cada entrada. Finalmente los datos se los presenta en un

arreglo matricial cuyas filas pueden ser las entradas y las columnas las salidas, como lo muestra la figura 4.8.

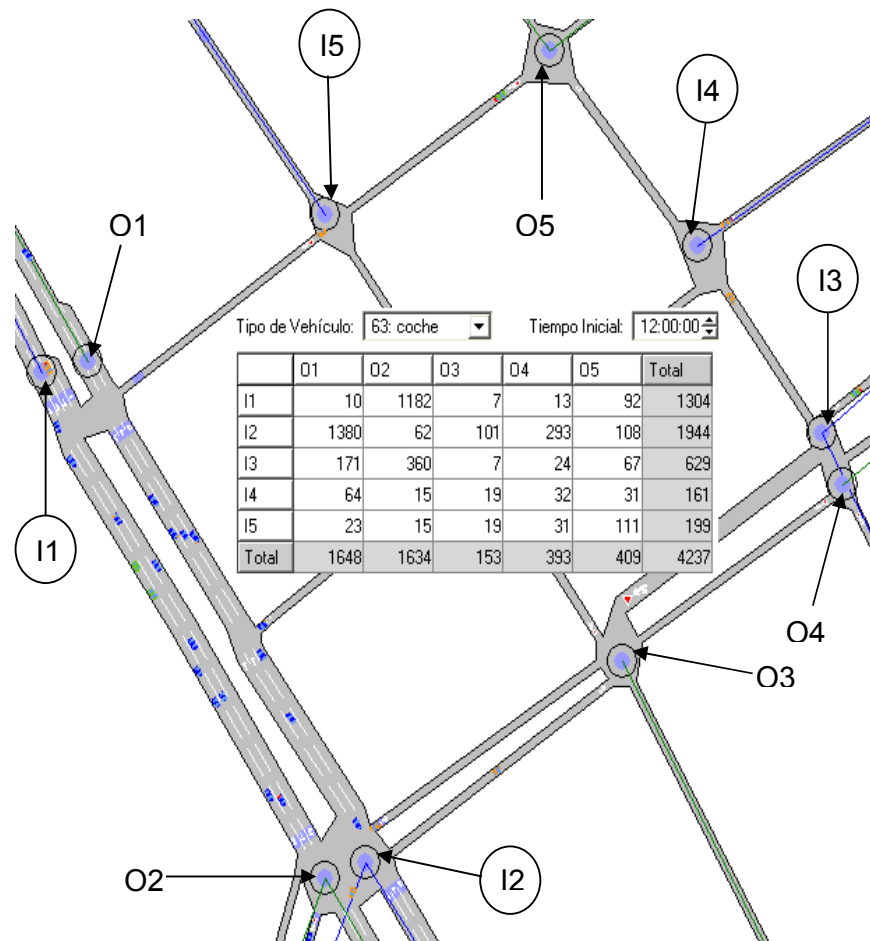


Figura 4.8 Implementación de la matriz O/D en la ZC EPN-PUCE

4.3.6 CORRIDA DE SIMULACIONES

Para correr la simulación es necesario crear el experimento, mediante la definición utilizando el menú *Site/New/Scenario*, luego se procede a digitar los parámetros correspondientes (fecha, tiempo inicial de simulación, tipo de demanda, etc.). Una vez definido el escenario, para proceder con la simulación es necesario crear una réplica mediante la opción *Experiment/New/Replication*.

Las figuras 4.9 a), b) y c) muestran las pantallas de configuración de un escenario.

Principal | Salida | AIMSUN API | Variables | Estrategias y Condiciones | Parámetros

Tiempos

Fecha Simulada: 10/07/2007

Tiempo Simulado Inici: 12:00:00 Duración: 01:00:00

Ciclo de Detección:

El mismo que el Paso de Simulación 1 segundos

Tráfico

Demanda de Tráfico: Traffic Demand 339 Plan de Transporte Público: Ninguno

Plan de Control Maestro: Master Control Plan Morning 343

Patrón de detección: Ninguno

a) Pantalla principal

Principal | Salida | AIMSUN API | Variables | Estrategias y Condiciones | Parámetros

Dónde

Driver: ODBC Base de Datos: Parámetros

Detección | Estadísticas | Caminos

Activar Guardar Mantener en Memoria Intervalo: 00:05:00

Principal | Secciones | Matrices O/D | Líneas de TP | Ruta Estadística

Sistema Transporte público

Secciones Matrices O/D

Giros e Intersecciones Ruta Estadística

Extra

Tipos de vehículos

Desviación

b) Tipo de salidas

Principal | Salida | AIMSUN API | Variables | Estrategias y Condiciones | Parámetros

Día de la semana: Martes Estación del año: Verano

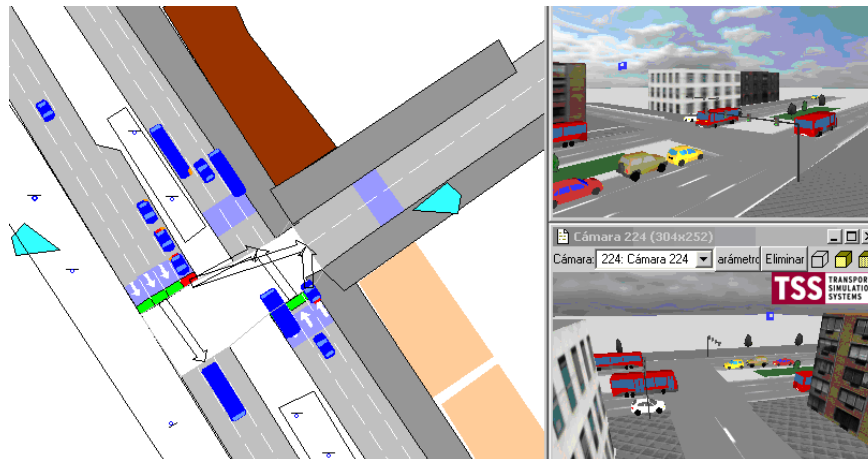
Meteorología: Sol Evento: Sin establecer

Metodología: Sin establecer

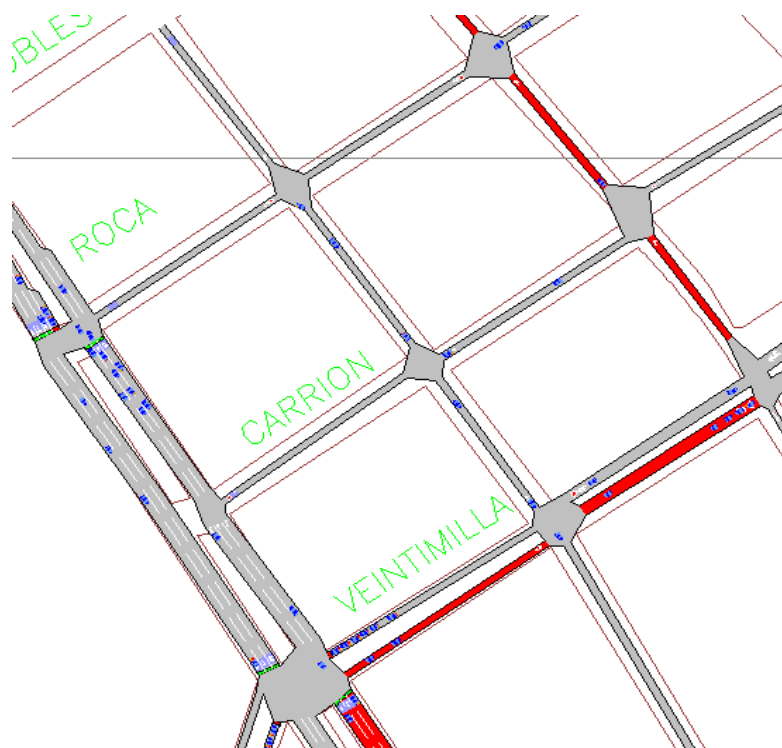
c) Parámetros

Figuras 4.9 Pantallas de configuración de un escenario

Las figuras 4.10 a) y b) muestran una visualización de la simulación implementada para las ZC EPN-PUCE con demanda de tráfico, mediante estados: a) en la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca en 2D y 3D; y b) en la ZC EPN-PUCE completa resaltando una de sus rutas.



a) Intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca



b) ZC EPN-PUCE completa resaltando una ruta estadística

Figuras 4.10 Simulaciones en la ZC EPN-PUCE

La simulación utiliza información medida con cámaras de video en el primer Caso de estudio y medidas de flujos en el segundo Caso de estudio (figuras 4.10 a) y b) respectivamente).

La figura 4.11 muestra una simulación de la ZC-Av. Colón entre la Av. 6 de Diciembre y Av. 10 de Agosto, resaltando una ruta estadística, utilizando información proporcionada por la EMSAT. En esta figura se presenta la ampliación de dos secciones.

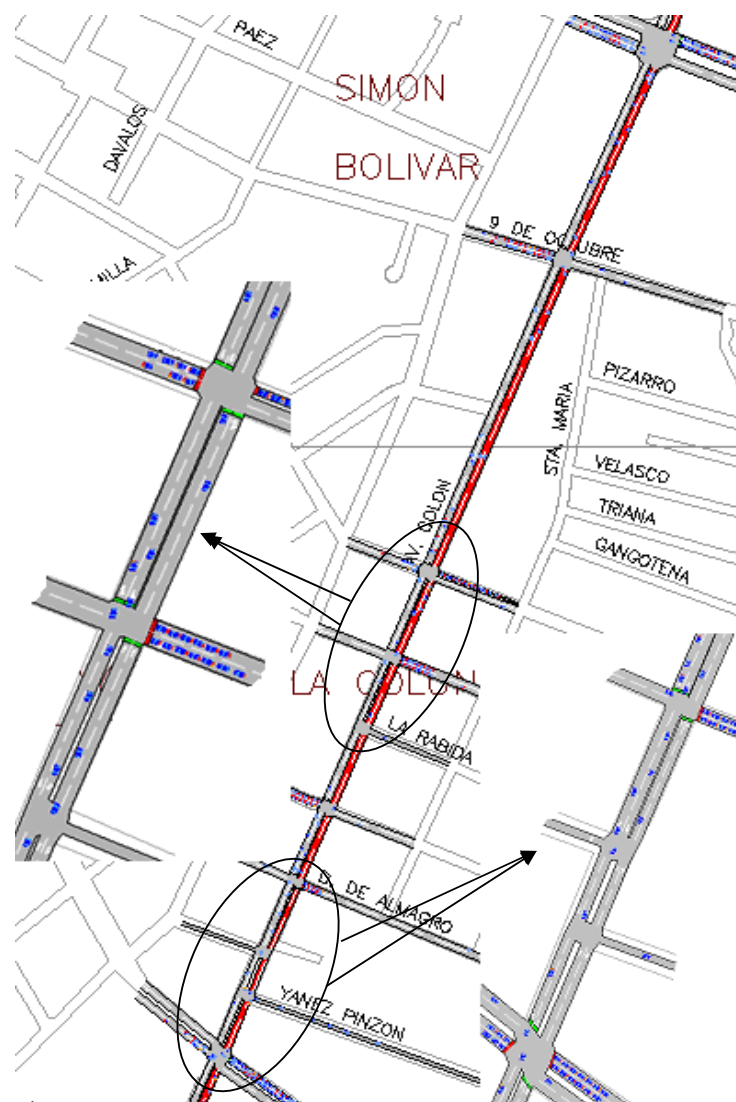


Figura 4.11 Simulación de la ZC-Av. Colón entre la Av. 6 de Diciembre y Av. 10 de Agosto

4.3.7 REPORTE DE SALIDA

Los reportes de salida son de dos tipos: reportes visuales de la simulación y resultados para comparación.

Los primeros permiten una forma inicial de calibración y validación. Permiten una visualización a nivel microscópico a diferentes velocidades de simulación en dos y tres dimensiones.

Los reportes proporcionan información de datos del vehículo, como: velocidad, series de tiempo, de conteos, estilos y modos en las secciones, por ejemplo de velocidades límites, flujos y velocidades con diferentes colores. Permite el rastreo de vehículos en trayectorias Origen – Destino.

Las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran visualizaciones típicas que proporciona el AIMSUN.

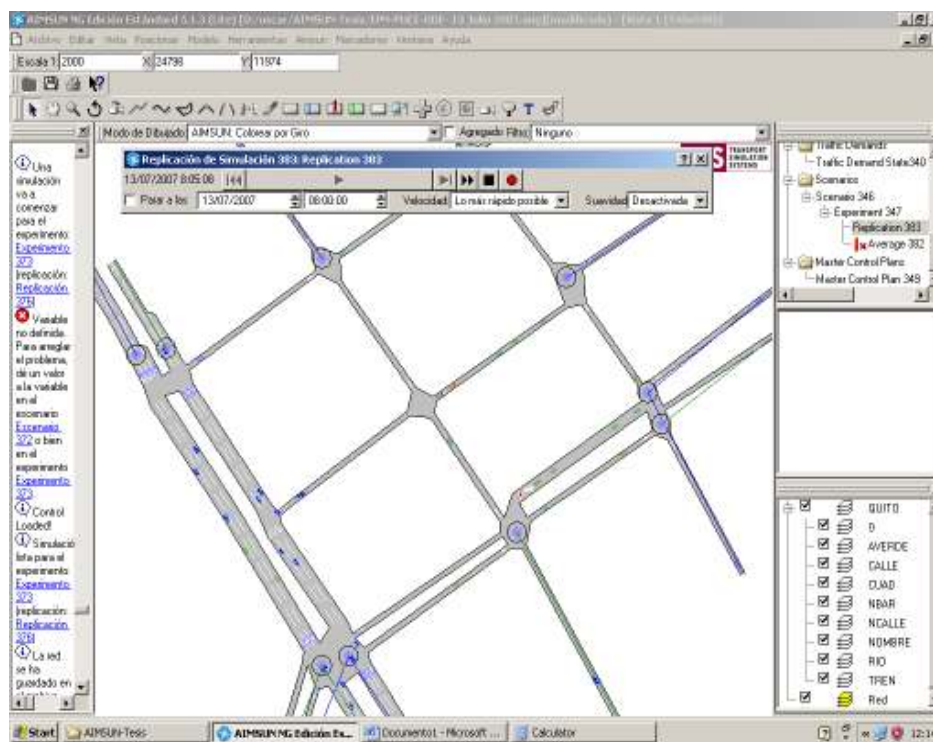


Figura 4.12 Visualización de pantalla completa de simulación en AIMSUN

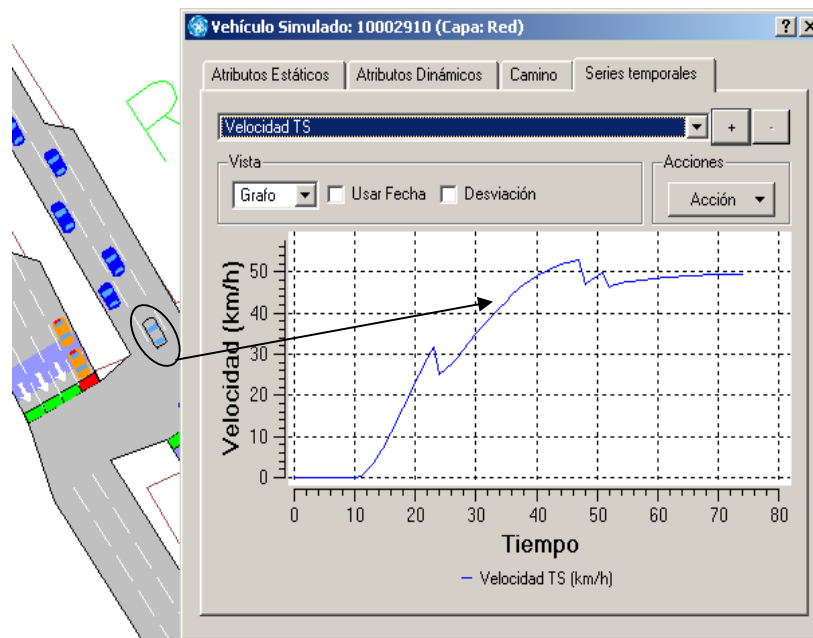


Figura 4.13 Visualización de Serie de Tiempo de un vehículo en particular



Figura 4.14 Visualización 3D en una intersección semafORIZADA

Se pueden también tener reportes de resultados de las características dinámicas y estáticas de los vehículos, como tablas de resultados (para efectos de comparación), como lo muestran las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.4 Características estáticas y dinámicas de vehículos

Estáticas			Dinámicas																																																																										
Static Attributes	Dynamic Attributes	Path	Static Attributes	Dynamic Attributes	Path																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Attribute</th> <th>Value</th> <th>Units</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>AIMSUN Id</td><td>1947</td><td></td></tr> <tr><td>Vehicle Type</td><td>coche</td><td></td></tr> <tr><td>Guided</td><td>No</td><td></td></tr> <tr><td>Tracked</td><td>No</td><td></td></tr> <tr><td>Equipped</td><td>No</td><td></td></tr> <tr><td>Guidance Acceptance</td><td>72.3921</td><td>%</td></tr> <tr><td>Length</td><td>4.33729</td><td>meters</td></tr> <tr><td>Width</td><td>2</td><td>meters</td></tr> <tr><td>Maximum Acceleratio...</td><td>2.9196</td><td>m/s²</td></tr> <tr><td>Deceleration Desired</td><td>-4.03512</td><td>m/s²</td></tr> <tr><td>Maximum Deceleratio...</td><td>-5.73987</td><td>m/s²</td></tr> <tr><td>Mean Speed Desired</td><td>114.821</td><td>km/h</td></tr> <tr><td>Speed Limit Accepta...</td><td>1.16035</td><td></td></tr> <tr><td>Minimum Distance B...</td><td>0.736172</td><td>meters</td></tr> <tr><td>Maximum Give Way ...</td><td>9.66339</td><td></td></tr> <tr><td>Reaction Time</td><td>0.3</td><td></td></tr> <tr><td>Reaction Time At Stop</td><td>1.1</td><td></td></tr> <tr><td>Vehicle Class</td><td>None</td><td></td></tr> </tbody> </table>			Attribute	Value	Units	AIMSUN Id	1947		Vehicle Type	coche		Guided	No		Tracked	No		Equipped	No		Guidance Acceptance	72.3921	%	Length	4.33729	meters	Width	2	meters	Maximum Acceleratio...	2.9196	m/s ²	Deceleration Desired	-4.03512	m/s ²	Maximum Deceleratio...	-5.73987	m/s ²	Mean Speed Desired	114.821	km/h	Speed Limit Accepta...	1.16035		Minimum Distance B...	0.736172	meters	Maximum Give Way ...	9.66339		Reaction Time	0.3		Reaction Time At Stop	1.1		Vehicle Class	None		<input type="checkbox"/> Follow <input type="checkbox"/> Get Floating Car Data <input type="checkbox"/> Collect Time Series Data <input type="checkbox"/> Store Path in a Google Earth File <table border="1"> <thead> <tr> <th>Attribute</th> <th>Value</th> <th>Units</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Current Speed</td><td>50.2609</td><td>km/h</td></tr> <tr><td>Previous Speed</td><td>53.5323</td><td>km/h</td></tr> <tr><td>Mean Speed Desired</td><td>55.4171</td><td>km/h</td></tr> <tr><td>Position</td><td>24906.5 - 12091.8</td><td>meters</td></tr> </tbody> </table>			Attribute	Value	Units	Current Speed	50.2609	km/h	Previous Speed	53.5323	km/h	Mean Speed Desired	55.4171	km/h	Position	24906.5 - 12091.8	meters
Attribute	Value	Units																																																																											
AIMSUN Id	1947																																																																												
Vehicle Type	coche																																																																												
Guided	No																																																																												
Tracked	No																																																																												
Equipped	No																																																																												
Guidance Acceptance	72.3921	%																																																																											
Length	4.33729	meters																																																																											
Width	2	meters																																																																											
Maximum Acceleratio...	2.9196	m/s ²																																																																											
Deceleration Desired	-4.03512	m/s ²																																																																											
Maximum Deceleratio...	-5.73987	m/s ²																																																																											
Mean Speed Desired	114.821	km/h																																																																											
Speed Limit Accepta...	1.16035																																																																												
Minimum Distance B...	0.736172	meters																																																																											
Maximum Give Way ...	9.66339																																																																												
Reaction Time	0.3																																																																												
Reaction Time At Stop	1.1																																																																												
Vehicle Class	None																																																																												
Attribute	Value	Units																																																																											
Current Speed	50.2609	km/h																																																																											
Previous Speed	53.5323	km/h																																																																											
Mean Speed Desired	55.4171	km/h																																																																											
Position	24906.5 - 12091.8	meters																																																																											

Tabla 4.5 Características estadísticas de una sección de vía

Main | Lanes | Time Series | Attributes |

Name: _____ External Id: _____

Type

Road Type: 51: Arterial

Maximum Speed: 50 km/h Capacity: 2700 veh/h

Distance Zone 1: 20 sec. Distance Zone 2: 3 sec.

Distance On Ramp: 5 sec. Yellow Box Speed: 10 km/h

Visibility Distance: 25 meters Max. Give Way Time Var.: 0

User Defined Cost: 0 Additional Volume: 0 PCUs

Second User Defined Cost: 0 Third User Defined Cost: 0

Inherent Speed: 0 km/h

Volume Delay Function: 40: VDF 25 Update Graph

Altitude

Initial: 0 meters Final: 0 meters Calculate Intermediates

Length: 80.1936 meters Slope percentage: 0.00 %

Por otro lado, AIMSUN permite hacer comparaciones entre Series de Tiempo de distintas secciones, como lo muestra la figura 4.15.

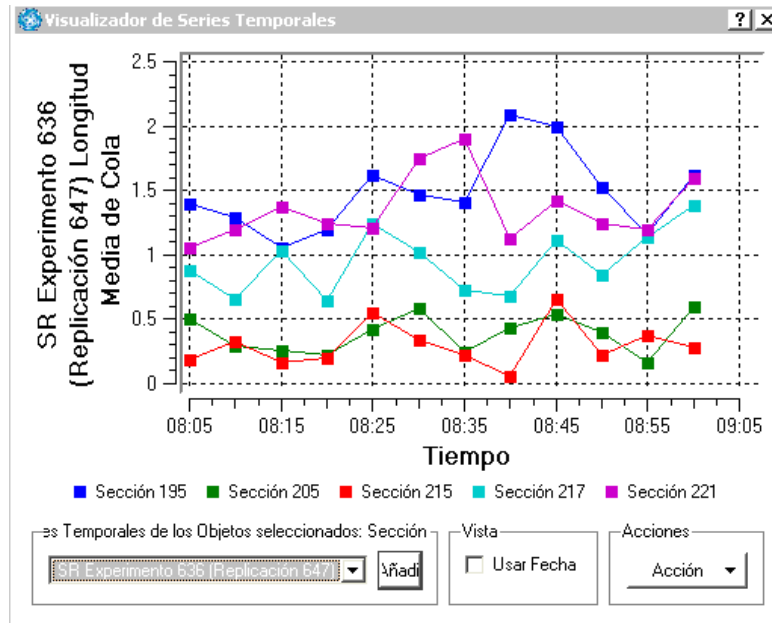


Figura 4.15 Series de Tiempo de distintas secciones

4.4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Desde un punto de vista metodológico, es ampliamente aceptado que la simulación es una técnica muy útil para realizar pruebas experimentales que permitan comparar diseños alternativos, reemplazando los experimentos del sistema físico por experimentos sobre una representación formal de un modelo de simulación, que en última instancia es un modelo de computador. Estos experimentos permiten un análisis bajo diferentes condiciones de operación y perturbaciones.

El proceso de determinación, de que un modelo de simulación es suficientemente cercano a la realidad, se realiza a través de lo que se conoce como validación del modelo. En realidad se debe calibrar, validar y verificar.

La calibración se refiere al proceso de ajuste de parámetros del modelo y su comparación con el comportamiento del sistema real. Las discrepancias entre los dos y la experiencia adquirida son utilizadas para mejorar el modelo hasta que se juzgue que se ha alcanzado la exactitud aceptable.

La validación es el proceso, mediante el cual se utiliza información de entrada, para calcular la información de salida usando el modelo y entonces comparar dicha salida con las mediciones reales del sistema real o sistema físico.

La verificación se refiere al proceso de comprobar, de que el modelo del computador se comporta como el sistema real, utilizando información de mediciones adicionales.

Este proceso de validación de modelos, en particular de un modelo de computador utilizando calibración, validación propiamente dicha y verificación, depende de un sistema a otro, de sus aplicaciones, del propósito del modelo; y, no necesariamente debe implicar estas tres fases. Por ejemplo modelos para predicción, requieren una buena precisión (probablemente hay que verificar el modelo) y constituyen modelos de alto orden y muy complejos; en cambio modelos para control son relativamente simples y de bajo orden.

4.4.1 CALIBRACIÓN USANDO AIMSUN

Con el simulador se realiza la calibración de los modelos de dos formas:

La primera a través de consideraciones de tipo geométrico en las vías y en los nodos, o sea usando secciones e intersecciones y Planes de Control, en este proceso se trata de reflejar la realidad.

La segunda forma se realiza ajustando los parámetros de los vehículos y las secciones, por ejemplo longitudes, velocidades de los vehículos, la presencia de buses o autos, los flujos máximos en las secciones, etc.

La validación del modelo de simulación se realiza a través de la comparación entre los datos de salida observados (mediciones) y los resultados de los experimentos del modelo del computador. En la simulación se utilizan detectores para medir flujos, velocidades, longitudes de cola, tiempo de espera y de viaje; y, la animación. Si es necesario debe recalibrarse y ajustarse algunos parámetros del modelo.

Además la verificación del modelo de simulación puede hacerse utilizando otras variables como colas, tiempos de viaje o utilizando otras réplicas o realizaciones de la simulación.

Puesto que, el Tráfico Vehicular tiene un comportamiento eminentemente estocástico, se puede realizar una validación estadística del modelo, usando los mismos intervalos de muestreo en los detectores que en las mediciones reales. Así: Si las variables muestreadas simuladas corresponden al flujo f , éstas se pueden caracterizar por los valores $f_{i,j}^s$, donde el superíndice representa valores simulados, el subíndice i -ésimo ($i = 1, 2, \dots, n$) representa el número de detector en el intervalo de muestreo del horizonte de simulación (tiempo de simulación) j -ésimo ($j = 1, 2, \dots, m$). Si $f_{i,j}^o$ son los valores de flujo observados en los mismos detectores y en los mismos intervalos de muestreo, se requiere utilizar técnicas estadísticas para validar el modelo que comparen ambas series de observaciones (simuladas y medidas) para determinar si es que éstas son suficientemente cercanas, aprovechando la capacidad del simulador, puesto que éste entrega Series de Tiempo [40].

4.4.2 VALIDACIÓN USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Por la naturaleza estocástica del comportamiento del Tráfico Vehicular, cada Serie de Tiempo no es igual para cada realización del proceso [4], entonces la forma de determinar si son suficientemente cercanas requiere de la utilización de técnicas estadísticas, como es la prueba de hipótesis [40].

Para el detector i se tiene la comparación entre valores simulados y valores medidos:

$$d_i = f_{i,j}^s - f_{i,j}^o, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \text{Ec. 4.1}$$

Tiene una media \bar{d}_i significativamente diferente de cero o no. El valor esperado δ_i debe ser cero. Esto se puede determinar usando la *estadística-t* [20], [40], dada por:

$$\bar{t}_{m-1} = \frac{\bar{d}_i - \delta_i}{\bar{S}_d / \sqrt{m}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

donde: δ_i es el valor esperado de \bar{d}_i

\bar{S}_d es la desviación estándar de \bar{d}_i

Para la prueba de hipótesis nula, se tiene:

$$H_0 : \delta_i \quad (|\bar{t}_{m-1}| > t_{m-1;\alpha/2}) \quad \text{Ec. 4.3}$$

- (i) Si para $\delta_i = 0$, el valor calculado \bar{t}_{m-1} y comparado con el de la distribución *t-Student* es significativo, para el nivel α establecido, se debe concluir que el modelo no está reproduciendo el comportamiento del sistema en forma adecuada, por lo que se debe rechazar al modelo.
- (ii) Si para $\delta_i = 0$, se tiene un valor \bar{t}_{m-1} insignificante, entonces se concluye que la simulación y los valores reales son prácticamente los mismos, por lo que la simulación es válida.

Este proceso deberá repetirse para todos los detectores.

4.5 SIMULACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS

La simulación está hecha en base a modelos de computador utilizando el simulador profesional AIMSUN. Los modelos se presentan en esta sección y las corridas con sus resultados aparecen en el Capítulo 5.

El Caso de estudio 1, corresponde a la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca, cuyo modelo utilizado para la simulación es el dado por las figuras 3.17 y 3.18, y complementado con las fases y señales detalladas en la tabla 3.4.

El Caso de estudio 2, corresponde a la Zona Crítica EPN – PUCE limitada por la Av. 12 de Octubre al Este, la calle Veintimilla al Norte, la Calle Plaza al Oeste y la calle Roca al Sur, cuyo modelo utilizado en la simulación es el dado por las figuras 3.16 y 3.19, y complementado con las fases y señales de la tabla 3.5.

El Caso de estudio 3, correspondiente a la Zona Crítica de la Av. Colón, entre la Av. 6 de Diciembre al Este y la Av. 10 de Agosto al Oeste, cuyo modelo de simulación usa datos de flujos medidos el 10 de Julio de 2007 entre la 08h00 y 10h00. La medición corresponde a 5 ciclos completos en las intersecciones semaforizadas y a 5 minutos continuos en las intersecciones no semaforizadas.

Para este último Caso de estudio se tiene el Plan de Control dado en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Plan de Control en intersecciones semaforizadas de la Av. Colón

Intersección con la Av. Colón	Duración (s)		
	verde	ámbar	rojo
Av. 6 de Diciembre	45	2	43
Diego de Almagro	55	2	33
Reina Victoria	55	2	33
Juan León Mera	55	2	33
Av. Amazonas	45	2	43
9 de Octubre	50	3	37
Av.10 de Agosto	45	2	43

La figura 4.16 muestra la configuración de flujos de entrada y sus correspondientes porcentajes de giro.

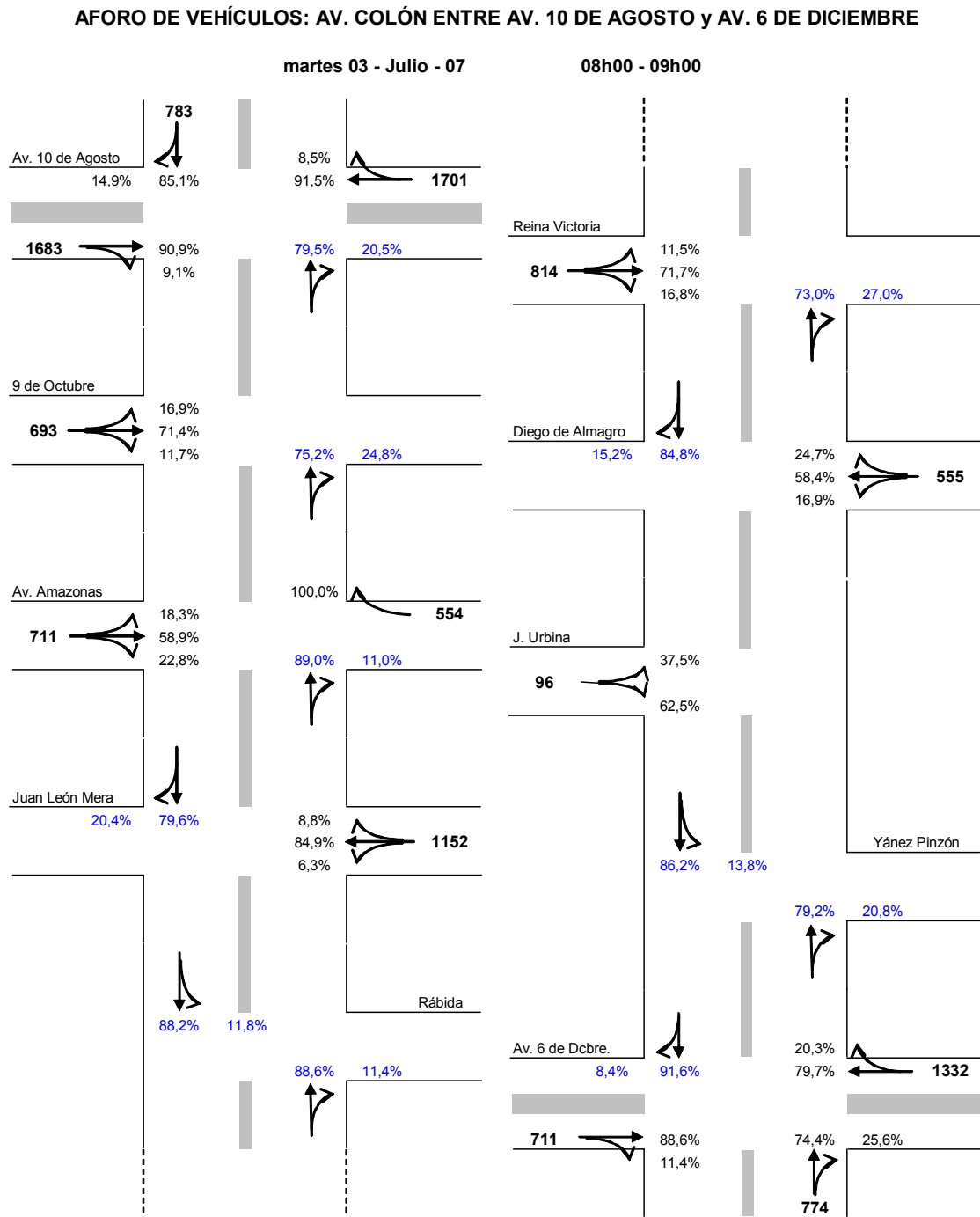


Figura 4.16 Datos de medidas de campo de la ZC de la Av. Colón

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DEL TRÁFICO VEHICULAR

Al analizar un modelo de simulación, es necesario que éste responda de la manera más aproximada a la realidad, para lo cual se requiere de una metodología de implementación de las diferentes etapas, ajustando parámetros y variables para que el modelo esté bien calibrado, luego de lo cual se añade la información de entrada obtenida a través de mediciones de campo, por medios manuales y automáticos, con lo que el modelo de simulación podrá ser validado.

Es necesario que el modelo de simulación sea alimentado con información adicional para su calibración. El modelo debe pasar también por una validación estadística, lo que permitirá manejar un modelo robusto.

La utilización del modelo de simulación para el análisis del Tráfico Vehicular, se relaciona también con ciertos indicadores típicos de parámetros y variables dados de la experiencia en otras regiones, con lo que se potencializa su uso y se proyecta para condiciones de circulación diferentes a las establecidas en primera instancia.

Lo importante del análisis del Tráfico Vehicular, a través de un modelo de simulación, es lo relacionado con el Nivel de Servicio, que es un indicador relevante y puede ser expresado en términos de variables macroscópicas.

Puesto que el objetivo general de esta Tesis es la Modelación, Simulación y el Análisis del Tráfico Vehicular en Zonas Críticas de la ciudad de Quito, es necesario elegir los Casos de Estudio, luego utilizar el simulador profesional AIMSUN a través del cual se procede con la construcción del modelo de la Zona Crítica seleccionada, esto en base a la geometría de las vías, intersecciones y nodos; con el mayor detalle posible y ajustando a las dimensiones y condiciones

reales. Una vez realizado el diseño geométrico es necesario introducir los aspectos de control, por medio de señalizaciones como pare, ceda el paso, vía exclusiva, etc.

En lo referente a los nodos, si éstos son semaforizados hay que definir las fases y los ciclos con los tiempos de duración de verde y ámbar, a través del llamado Plan de Control.

Los modelos de simulación elegidos para ser considerados en el simulador AIMSUN, son los tres Casos de estudio detallados en el Capítulo 4.

Las mediciones de campo, en forma manual, corresponden a los tres Casos de estudio. Mediciones de campo, en forma automática a través de 2 cámaras de video, corresponden al Caso de estudio 1.

Se cuenta con datos de algunas Zonas de la ciudad de Quito proporcionados por la EMSAT, en lo relativo al flujo vehicular, de acuerdo a un Convenio con la EPN, los mismos que son considerados únicamente como referentes de partida en la corrida del modelo de simulación y para una comparación parcial con los datos de simulación. Específicamente en el Caso de estudio 3, los datos de la EMSAT sirven para comparar con los obtenidos en la medición de campo y en los resultados de simulación.

5.1 COMPONENTES DE ANÁLISIS DEL TRÁFICO VEHICULAR

Es necesario ahondar en las componentes del análisis, aunque parezca redundante, para dar una idea clara del proceso de validación del modelo de simulación, señalando todos los aspectos importantes involucrados con el Tráfico Vehicular.

Puesto que el modelo de simulación del AIMSUN requiere de datos, a nivel micro y macro, es necesario introducir las variables y parámetros más significativos,

como son los flujos en las vías y los porcentajes de giro, así como longitudes de vehículos, tipo, capacidad y velocidad en las vías, etc. La mayoría de datos internos en el simulador, son asumidos por defecto, a no ser que se requiera un cambio para el análisis del efecto de dicho cambio. El AIMSUN permite un adecuado control sobre los aspectos erróneos referentes a la construcción y manejo de parámetros y variables del modelo.

Como aspecto preliminar, es necesario considerar que el modelo de simulación debe ser sometido a un proceso de Calibración para posteriormente realizar la Validación. La Calibración se relaciona fundamentalmente con variantes en la geometría, en variables y parámetros del modelo de estudio.

Al correr la simulación es posible tener una visualización en 2D o 3D, lo que permite una Calibración visual del modelo, hasta que refleje o se aproxime a la realidad. Una vez alcanzado el modelo adecuado de simulación, se procede a corridas adicionales con datos de campo, lo que permite tener una certeza de la validez del modelo y la confianza en cuanto a su robustez.

Con los antecedentes señalados, el análisis de Tráfico Vehicular, con el simulador AIMSUN, comprende las siguientes fases: Validación de modelos de simulación, Comportamiento Dinámico del flujo vehicular, Nivel de Servicio y condiciones de circulación, las mismas que consideran diferentes escenarios y perturbaciones que pueden ser provocadas en las vías.

5.1.1 VALIDACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN

La Validación de los modelos de simulación se realiza utilizando la visualización 2D o 3D, el uso de flujos y la estadística inferencial con prueba de hipótesis, lo que implica que el modelo está reproduciendo el comportamiento del sistema en forma adecuada.

La Validación Estadística a través de la prueba de hipótesis, requiere de datos de

campo suficientes en la zona de estudio, así como datos de simulación. Esto a su vez corresponde a una verdadera Validación del modelo, ya que utiliza información aleatoria y sus estadísticas. También es necesario proceder con una Verificación del modelo, a través de mediciones adicionales, con lo que se genera una nueva realización para la confirmación de la hipótesis, y de esa manera llegar a una mayor certeza de validez del modelo de simulación.

5.1.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL FLUJO VEHICULAR

Esta parte corresponde al análisis del Comportamiento Dinámico del flujo vehicular en la zona de estudio, ya que el simulador provee información a través de Series de Tiempo, con lo que se procede al estudio del estado transitorio provocado por un incidente en la vía, que perturba el funcionamiento normal del sistema.

El análisis dinámico se realiza en cualquiera de las variables, que comprende el análisis de estadísticas de valores medios, tales como:

- Flujos
- Velocidades
- Longitudes de cola
- Tiempos de viaje
- Ocupación

El estudio de la dinámica del Tráfico Vehicular está corroborado con la visualización 2D o 3D, por medio de lo cual se analizan:

- A nivel macroscópico las secciones, las intersecciones y grupos de secciones.
- El comportamiento semafórico a través de las fases, las señales (movimientos) y los tiempos de verde, ámbar y rojo.

- A nivel microscópico, relativo al vehículo, las características dinámicas o el seguimiento de un vehículo en particular.

El análisis dinámico del flujo vehicular, también puede ser complementado bajo diferentes estrategias de control, tales como:

- Semáforos sincronizados.
- Semáforos retardados.
- Cambio de tiempo de fases o cambio de duración del ciclo semafórico.
- Cambios en la señalización de pare y ceda el paso.

Además la simulación permite plantear alternativas y estrategias para dar un mejor servicio, aumentar la seguridad, mejorar las condiciones del medio ambiente, lo que implica un mejoramiento en la calidad de servicio [29].

5.1.3 NIVEL DE SERVICIO

El análisis del Tráfico Vehicular, básicamente tiene que ver con el Nivel de Servicio, es decir con la calidad de servicio que se ofrece al usuario, característica que se refleja en la fluidez del Tráfico Vehicular (flujo sin saturación y con saturación), que incide en la seguridad (el conductor debe responder con acciones de paradas, aceleraciones), en los tiempos de espera y de viaje (gasto de tiempo, de combustible y contaminación) y en las colas (ocupación de vías).

En el AIMSUN, el Nivel de Servicio se obtiene en los nodos o intersecciones semaforizadas o no, y es descrito a través de las siguientes variables:

- Flujo
- Velocidad
- Tiempo de espera
- Longitud de cola
- Función de Retardo de Volumen (*Volume Delay Function* VDF)

5.1.4 CONDICIONES DE CIRCULACIÓN

El modelo de simulación puede ser sometido a pruebas bajo diferentes escenarios y condiciones de circulación, tales como día de la semana, meteorología (sol, lluvia), estación del año (verano, invierno), evento (deportes, feriado, festivo); así como condiciones de perturbaciones (cierre de vía, accidente, etc.). Éste es el aspecto más importante desde el punto de vista de las aplicaciones; permite conocer que sucedería si cambian ciertas condiciones, tales como en la geometría de la red, el incremento del flujo vehicular, el efecto de diferentes condiciones e incidentes; lo que da un criterio para la toma de decisiones en la Planificación, Administración y Control del Tráfico Vehicular.

Entonces, el análisis dinámico es realizado bajo diferentes condiciones de:

- Circulación (parámetros de estado de tráfico)
- Perturbación (incidentes).

5.2 MEDIDAS DE EFECTIVIDAD DEL COMPORTAMIENTO DE TRÁFICO VEHICULAR

Con el propósito de parametrizar o cuantificar el Comportamiento Dinámico del flujo vehicular a través del Nivel de Servicio, es necesario establecer ciertos Indicadores, por medio de los cuales se puede medir la efectividad de la dinámica del Tráfico Vehicular en la Zona de estudio, y analizar la conveniencia o no de mantener las condiciones del modelo de simulación.

De acuerdo al AIMSUN, para el análisis del Comportamiento Dinámico pueden cuantificarse algunas variables, tales como: flujo, velocidad, longitud de cola, tiempo de demora, entre otras; obtenidas a través de las Series de Tiempo en vías, detectores y nodos, sin perder de vista la visualización en 2D o 3D que provee una visión casi realista del modelo.

5.2.1 INDICADORES DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Como ya ha sido mencionado, el Análisis del Comportamiento Dinámico del Tráfico Vehicular tiene una relación directa con el Nivel de Servicio de la red vial, éste considera diferentes variables, tales como el promedio de la velocidad de viaje de los vehículos que realizan el recorrido dentro del segmento de vía analizado.

Puede decirse que la velocidad de viaje es la medida básica para medir el Nivel de Servicio, sin perder de vista otras variables de análisis que provee el AIMSUN. Además el promedio de velocidad de viaje es calculado a partir de los tiempos de recorrido y de las demoras ocasionadas por los dispositivos de control (semáforos).

En la tabla 5.1 aparecen los enunciados generales de los Niveles de Servicio, los mismos que son equivalentes a los presentados en el capítulo 2 de esta Tesis, en este caso se añaden valores típicos de porcentajes de flujo libre. Estos Niveles de Servicio aparecen clasificados en un rango de excelente a regular, pasando por etapas intermedias.

Tabla 5.1 Características de Nivel de Servicio en una Red Urbana [29]

Nivel de Servicio	Características	% de flujo libre
A Excelente	Operaciones de flujo libre a velocidades medias de recorrido. Los vehículos son prácticamente libres para realizar maniobras dentro de la corriente de tráfico. La demora de control no es significativa.	90
B Muy bueno	Operaciones a velocidad media de recorrido con leves dificultades para realizar maniobras. La demora de control en las intersecciones es mínima.	70

C Bueno	Operaciones estables, sin embargo, la capacidad de maniobrar y cambiar de carril en ubicaciones entre intersecciones, pueden tener un poco más de restricciones. La presencia de largas colas y/o la descoordinación de semáforos, pueden contribuir a una menor velocidad media de recorrido	50
D Regular	Bordea un rango en donde pequeños incrementos en el volumen vehicular puede causar un aumento sustancial en la demora y una disminución de la velocidad de recorrido. Puede deberse a la mala coordinación entre semáforos, ciclos semafóricos inapropiados, altos volúmenes de tráfico o una combinación de todos estos factores.	40
E Malo	Caracterizado por la ocurrencia de demoras importantes y una velocidad media de recorrido baja, causadas por una mala coordinación semafórica, alta densidad de intersecciones semaforizadas, altos volúmenes, extensas demoras en intersecciones críticas y ciclos semafóricos inapropiados.	33
F Pésimo	Caracterizado por flujo vehicular operando a velocidades extremadamente bajas. La congestión probablemente es debida a una intersección semaforizada crítica, con grandes demoras, altos volúmenes y largas colas.	< 33

En la tabla 5.2 se detallan algunos valores típicos de flujos horarios por carril, tanto de vehículos livianos así como de transporte público (buses), y el tiempo promedio de demora por vehículo en las intersecciones semaforizadas, en función de los Niveles de Servicio descritos en la tabla 5.1 [30].

Tabla 5.2 Niveles de Servicio para intersecciones semaforizadas

Nivel de Servicio	[veh/h/carril]	[buses/h/carril]	Demora promedio [s/veh]
A	700	467	≤ 10
B	1100	733	> 10 hasta 20
C	1550	1033	> 20 hasta 35
D	1850	1233	> 35 hasta 55
E	2000	1333	> 55 hasta 80

En la tabla 5.3 se describe el Nivel de Servicio para rangos de valores típicos de velocidades a flujo libre en vías urbanas, tanto principales como secundarias [29].

Tabla 5.3 Nivel de Servicio de acuerdo a la clasificación de vía urbana

Tipo de vía		Principal	Secundaria
Rango de velocidad a flujo libre		55 – 50 [Km/h]	55 – 40 [Km/h]
Velocidad típica		55 [Km/h]	45 [Km/h]
Nivel de Servicio	A	> 50	> 41
	B	> 39 - 50	> 31 – 41
	C	> 28 - 39	> 23 – 32
	D	> 22 - 28	> 18 – 23
	E	> 17 – 22	> 14 – 18
	F	≤ 17	≤ 14

La tabla 5.4 presenta valores referenciales de variables macroscópicas en el rango de aceptables a críticos, que pueden ser útiles para obtener índices de Nivel de Servicio en las zonas urbanas. Los valores de esta tabla son útiles para analizar la eficacia del sistema de Tráfico vehicular en una zona urbana.

Tabla 5.4 Valores de variables para definición de índices de Nivel de Servicio

Variable \ Nivel de Servicio	Aceptable	Crítico
Velocidad [Km/h]	> 70	< 30
Densidad [veh/Km/carril]	7	28
Tiempo de demora [seg/veh]	< 10	> 60
Flujo [veh/h/carril]	500	2000

5.3 MEDICIONES DE TRÁFICO VEHICULAR

Para realizar la simulación se requiere tener, a más del modelo de simulación, mediciones de campo de flujo vehicular en las zonas de estudio y análisis.

Las mediciones de Tráfico Vehicular se realizan utilizando diferentes dispositivos, tales como sensores invasivos o no invasivos. A continuación se describe en forma simplificada las características de algunos sensores [11].

- Mangueras neumáticas, son sensores longitudinales que detectan el paso del vehículo en base al impulso de presión que se genera cuando la manguera es presionada por las llantas del vehículo. Sirven básicamente para el conteo de vehículos.
- Lazos inductivos, corresponden a bucles de hilo conductor por el que circula una corriente alterna. Estos elementos son colocados sobre el asfalto y al paso de vehículos se produce un cambio en la inductancia del bucle, con lo que se detecta el paso del vehículo.
- Detectores magnéticos, son sensores que detectan el cambio del flujo magnético en el momento que pasan los vehículos sobre dichos sensores.

- Piezoeléctricos, sensores que detectan el paso del vehículo en base a la carga eléctrica que se genera en el material piezoeléctrico cuando es presionado por la llanta del vehículo. Sirven a más del conteo, para la medición de la velocidad del vehículo.
- Cámaras de video, son sensores no invasivos de gran flexibilidad y de fácil instalación. Sirven para medir el número de vehículos y la velocidad, con la posibilidad de cubrir varios carriles a la vez.

Para este trabajo de Tesis se utiliza tecnología de punta para la medición de flujo vehicular, mediante cámaras de video marca TRAFICAM (Video detección en línea de parada y avance, con 4 salidas MOSFET opto aisladas y funciones lógicas AND y OR, resolución 640 x 480 píxeles, lente gran angular de 3,0 mm y ángulo estrecho de 8,00 mm, liviana, interface RS485 y RS232 para comunicaciones, cables blindados) y un software desarrollado en LabView.

5.3.1 MEDICIONES UTILIZANDO CÁMARAS DE VIDEO

En el primer Caso de estudio, correspondiente a la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca de la ZC EPN-PUCE, se utilizan dos Cámaras de Video Traficam, una Laptop, una tarjeta de adquisición de datos USB-6009 NI, una batería de 12 voltios y un programa elaborado en LabView para el procesado de la información capturada por dichas cámaras.

Estas medidas de campo fueron obtenidas con la ayuda de personal de la EPN el día jueves 26 de Octubre del 2006 de 12h00 a 13h00, quienes supervisaron el correcto funcionamiento del sistema de cámaras.

La figura 5.1 muestra la disposición de las áreas definidas para cada una de las cámaras, a través de las cuales se captura la información relacionada con el número de vehículos que cruzan por dichas áreas.

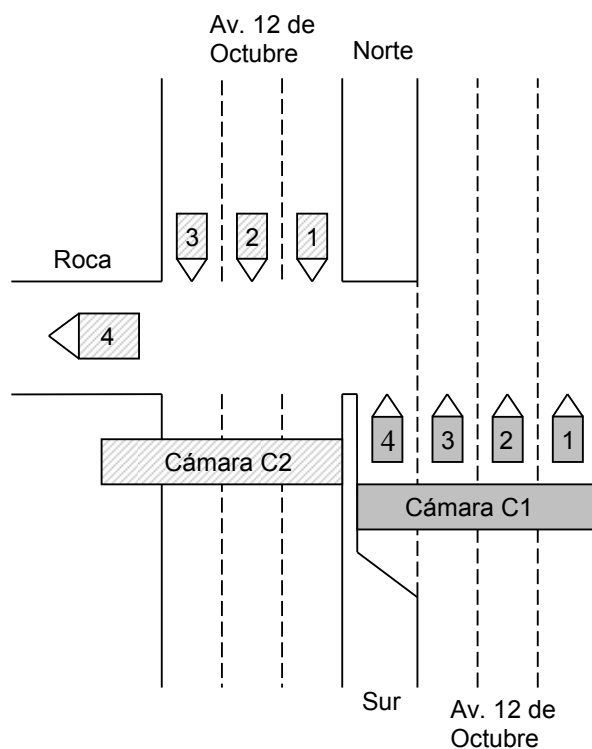


Figura 5.1 Disposición de áreas de detección de cámaras de video C1 y C2

En la tabla 5.5 se presenta el resumen de los datos obtenidos en cada una de las áreas de la cámara C2, correspondientes al flujo vehicular en el sentido Norte - Sur (áreas 1, 2 y 3) y el giro a la calle Roca (área 4).

Tabla 5.5 Datos de aforo automático con la cámara de video C2

Rango	área 1	área 2	área 3	Total	Área 4
12:10 - 12:14	0	24	15	39	20
12:15 - 12:19	18	21	5	44	34
12:20 - 12:24	23	21	0	44	27
12:25 - 12:29	43	27	7	77	45
12:30 - 12:34	42	42	14	98	31
12:35 - 12:39	28	21	17	66	21
12:40 - 12:44	28	30	16	74	29
12:45 - 12:49	41	25	11	77	27
12:50 - 12:54	37	37	13	87	33
12:55 - 12:59	34	33	13	80	35
Total Veh.	294	281	111	686	302
Promedios	29.4	28.1	11.1	68.6	30.2

En la tabla 5.6 se presenta el resumen de los datos obtenidos en cada una de las áreas de la cámara C1, que corresponde al flujo vehicular en el sentido Sur - Norte (áreas 1, 2 y 3) y el giro a la calle Roca o el giro en U (área 4).

Tabla 5.6 Datos de aforo automático con la cámara de video C1

Rango	área 1	área 2	área 3	Total	área 4
12:10 - 12:14	22	35	24	81	15
12:15 - 12:19	21	23	25	69	19
12:20 - 12:24	16	28	27	71	10
12:25 - 12:29	9	27	27	63	21
12:30 - 12:34	14	34	28	76	15
12:35 - 12:39	6	21	21	48	10
12:40 - 12:44	19	30	23	72	16
12:45 - 12:49	16	24	26	66	25
12:50 - 12:54	17	27	30	74	20
12:55 - 12:59	14	26	21	61	21
Total Veh.	154	275	252	681	172
Promedios	15.4	27.5	25.2	68.1	17.2

5.3.2 DATOS DE FLUJO PROVISTOS POR LA EMSAT

A través de un Convenio de la EPN con la EMSAT, se tuvo acceso a datos de flujo vehicular en algunos nodos de la ciudad de Quito. Los datos de la EMSAT resultaron incompletos, puesto que no se dispuso de información de los flujos que permitan calcular los porcentajes de giro, razón por la cual se realizaron conteos manuales, en colaboración con personal de la EPN, ya que no se pudo disponer de una cuadrilla prevista por la EMSAT. Dichos datos sirvieron como un referente, lo que permitió contrastar los conteos manuales. Parte de dichos datos fueron utilizados en el Caso de estudio 3.

La tabla 5.7 resume los datos de flujo según conteo manual (martes 3 de Julio de 2007) y según la EMSAT (martes 17 de Octubre de 2006), correspondientes al

Caso de estudio 3. En esta tabla únicamente aparecen datos de entrada en los nodos de la Av. Colón y Av. 6 de Diciembre, y de la Av. Colón y Av. 10 de Agosto, puesto que son los únicos datos provistos por la EMSAT, correspondientes al día y hora en que se hizo el conteo manual.

De acuerdo a la información presentada en la tabla 5.7, los conteos manuales son bastante cercanos a los proporcionados por la EMSAT, lo que permite decir que el trabajo de campo está bien realizado y que estos datos pueden servir para enriquecer el modelo de simulación construido en el AIMSUN.

Los datos manuales que aparecen en la tabla 5.7 se encuentran en la figura 4.16. Estos datos, con mayor detalle, se presentan en la figura 4.16

Tabla 5.7 Datos de flujo horario según la EMSAT y conteo manual

Intersección con la Av. Colón	Sentido de flujo vehicular							
	Norte - Sur		Sur - Norte		Este - Oeste		Oeste - Este	
	EMSAT	Manual	EMSAT	Manual	EMSAT	Manual	EMSAT	Manual
Av. 6 de Diciembre	1266	1332	886	711	786	774	924	855
Av. 10 de Agosto	1550	1701	1500	1683	816	702	No se dispone	783

Para el caso de la ZC EPN – PUCE, tanto de la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca (Caso de estudio 1), así como de toda la Zona (Caso de estudio 2), no es posible presentar datos comparativos por no contar con la información de la EMSAT. Los datos manuales del Caso de estudio 2 aparecen en la figura 4.6.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en la simulación de las Zonas Críticas EPN-PUCE, correspondiente a la intersección de la Av. 12 de Octubre y Roca (Caso de estudio 1), Av. 12 de Octubre entre Veintimilla y Roca (sección del Caso de estudio 2); y la Zona Crítica de la Av. Colón (Caso de estudio 3).

Primero se utiliza el toolbox de Redes Petri del Matlab y luego se implementan los modelos de simulación de Zonas Críticas mencionadas, mediante el simulador profesional AIMSUN.

Con el simulador se realiza Calibración, Validación y Verificación, luego se hace el análisis de las Zonas Críticas, del Comportamiento Dinámico y del Nivel de Servicio. También se consideran y analizan modelos de simulación con diferentes condiciones de circulación.

6.1 SIMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO 1 USANDO REDES PETRI

La figura 6.1 presenta el modelo de simulación mediante Redes Petri temporalizadas en los lugares (*P-timed* PN). Los lugares de salida pt2-N, pt3-N, pt3-S, pt4-S, pt2-O, pt3-O y pt4-O mantienen valores constantes y los lugares de entrada pt1-N, pt1-S y giros pt1-O y pt5-O consideran valores exponenciales. Los lugares y transiciones internas contienen valores constantes, al igual que los

componentes del semáforo. Esta Red representada en la figura 3.6, corresponde a la intersección del Caso de estudio 1 [36].

La intersección se divide en cuatro secciones, una para el semáforo y tres repartidas de la siguiente forma: dos entradas por la Av. 12 de Octubre, una por el Norte y otra por el Sur, y una salida debida a los cruces desde la Av. 12 de Octubre Norte y Sur a la calle Roca.

En cada sección de entrada, se añade un lugar para el porcentaje de giro, un lazo de realimentación para el control del flujo individual de vehículos, en el que se asigna el número de vehículos que van a circular; y, un rectángulo para temporalizar la transición de manera de obtener el flujo vehicular, considerando una velocidad media constante en la sección.

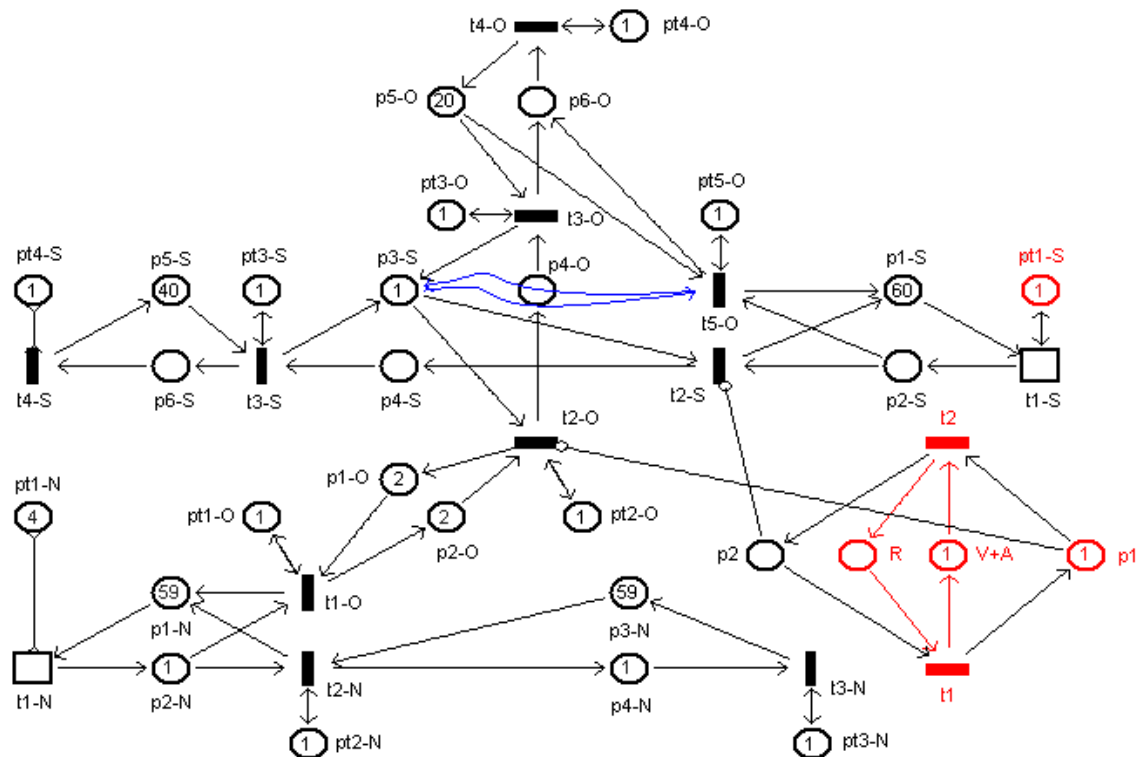


Figura 6.1 Reporte de simulación del Caso de estudio 1

Además en este Caso de estudio se requiere añadir restricciones en las transiciones t2-S y t2-O, para evitar conflictos en el cruce de los vehículos.

La tabla 6.1 muestra la estadística global en los lugares en estado estable. La tabla 6.2 muestra la estadística global en las transiciones en estado estable.

Los datos de las tablas 6.1 y 6.2 se generan con 10000 eventos y un tiempo de simulación de 951 segundos.

Tabla 6.1 Estadística global en lugares relativos al Caso de estudio 1

Nombre lugar	Total de Arribos	Tasa de Arribos	Distancia entre Arribos	Tiempo de espera	Longitud de cola
p1-N	1942	2.0421	0.48968	29.166	59.5916
p2-N	1943	2.0432	0.48943	0.2	0.40843
p6-S	482	0.50685	1.973	0.2	0.10137
p5-S	482	0.50685	1.973	78.7183	39.8986
p2-S	966	1.0158	0.98444	0.42309	0.42978
p1-S	966	1.0158	0.98444	58.6431	59.5702
p3-N	1571	1.652	0.60532	36.0195	59.5044
p4-N	1571	1.652	0.60532	0.3	0.4956
p6-O	850	0.89383	1.1188	0.2	0.17877
p5-O	850	0.89383	1.1188	22.1757	19.8212
p4-O	367	0.38592	2.5912	0.1	0.038592
p4-S	483	0.5079	1.9689	0.1002	0.050785
p2-O	371	0.39013	2.5632	6.8858	2.6574
p3-S	1332	1.4007	0.71394	0.64964	0.91062
p1-O	367	0.38592	2.5912	3.4415	1.3426
pt1-S	966	1.0158	0.98444	0.98444	1
pt1-N	1943	2.0432	0.48943	1.9577	4
R	32	0.03365	29.7177	10	0.3365
V+A	32	0.03365	29.7177	19.7177	0.6635
p2	32	0.03365	29.7177	10	0.3365
p1	32	0.03365	29.7177	19.7177	0.6635
pt5-O	483	0.5079	1.9689	1.9689	1
pt1-O	371	0.39013	2.5632	2.5632	1
pt2-N	1571	1.652	0.60532	0.60532	1
pt4-S	482	0.50685	1.973	1.973	1
pt3-S	482	0.50685	1.973	1.973	1
pt2-O	367	0.38592	2.5912	2.5912	1
pt3-N	1571	1.652	0.60532	0.60532	1
pt3-O	367	0.38592	2.5912	2.5912	1
pt4-O	850	0.89383	1.1188	1.1188	1

Tabla 6.2 Estadística global en transiciones correspondiente al Caso de estudio 1

Nombre de Transición	Servicio acumulado	Tasa de Servicio
t4-O	850	0.89383
t3-N	1571	1.652
t1-N	1943	2.0432
t1-S	966	1.0158
t4-S	482	0.50685
t2-S	483	0.5079
t5-O	483	0.5079
t3-S	482	0.50685
t1-O	371	0.39013
t2-O	367	0.38592
t3-O	367	0.38592
t2-N	1571	1.652
t1	32	0.03365
t2	32	0.03365

La figura 6.2 muestra una superficie de control correspondiente a la longitud de cola del lugar p2-O, donde el parámetro x representa la variación del flujo de entrada (lugar pt1-N) y el parámetro y representa la variación de la fase del semáforo en verde más ámbar (lugar V+A).

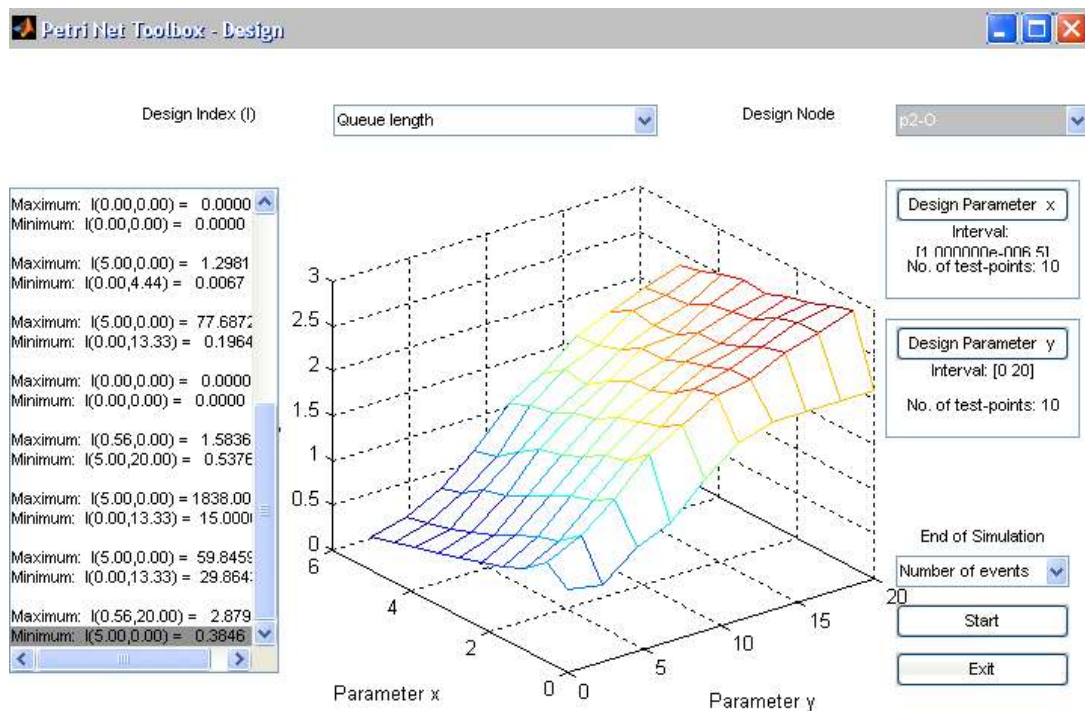


Figura 6.2 Superficie de control correspondiente a la longitud de cola del lugar p2-O

La superficie de control se genera con 10 puntos de prueba en x y 10 puntos de prueba en y , esta superficie 3D (solo en Redes Petri Temporalizadas), corresponde a un valor o índice en función de dos variables del modelo y se obtiene considerando variables en los elementos con retardos o con recursos (tokens), en este caso los lugares.

Por otro lado, cabe señalar que no se construye un modelo de simulación de una ZC completa, debido a gran cantidad de elementos que contendría el modelo, y además no se cuenta con una herramienta el análisis adecuado del Tráfico Vehicular.

6.2 SIMULACIÓN USANDO EL SIMULADOR AIMSUN

En razón de que la licencia adquirida del AIMSUN, no contempla la transportación pública, así como tampoco las características para el análisis de varios escenarios, no es posible aplicar el modelo de simulación para estos casos.

Debe indicarse que el alcance de esta Tesis tampoco es el de desarrollar toda la problemática del Tráfico Vehicular, sino más bien se trata de obtener un modelo de simulación confiable que permita hacer análisis de características de comportamiento del sistema de Tráfico Vehicular, con lo que se podría hacer proyecciones y dar soluciones específicas en segmentos o zonas completas.

El proceso que se sigue para la Calibración del modelo de simulación está descrito en el Capítulo 5, sin embargo la geometría de cada modelo se lo implementa con el número de carriles, el ancho y largo de las vías acordes a la realidad. También para la calibración se usan datos típicos de capacidad de vía, característica de vía, tipo de vehículo y dimensiones, características de intersecciones relacionadas con la señalización establecida (ceda el paso, pare), las fases y ciclos de nodos semaforizados, como lo más relevante.

Una vez tomados en cuenta los aspectos geométricos y operativos, se procede a

complementar el modelo con información de flujos y porcentajes de giro. Los datos usados en el Caso de estudio 1 son los obtenidos en mediciones de campo por medio de cámaras de video TRAFICAM y en forma manual; y en los Casos de estudio 2 y 3 los datos de campo obtenidos manualmente.

Es necesario previamente realizar una rutina de organización de los aspectos que exige el simulador para que la simulación se ponga en marcha, aspectos tales como la definición del Plan de control, Estado de tráfico, Demanda de tráfico, Escenario, Experimento, Estrategias y condiciones de control.

Luego de la corrida de la simulación, las Series de Tiempo reportadas por el simulador, sirven para la Calibración y Validación del modelo de simulación. En este caso se valida el modelo AIMSUN con la prueba de Hipótesis Nula, lo que permite trabajar en la Zona elegida con variantes y realizar el análisis comparativo del efecto de dichas variantes, en relación al sistema original.

Es necesario recalcar que la Validación del modelo de simulación debe reflejar fielmente la realidad del sistema, para lo cual el AIMSUN cuenta con la realización de varias réplicas de un experimento específico, además permite la visualización en 2D y 3D. Dicha validación se hace en forma estadística, con datos medidos en la Zona de estudio.

También hay que relevar la característica del AIMSUN, en el sentido de que es un simulador profesional altamente probado y confiable, por lo que en este trabajo de Tesis no se valida una Zona completa sino una sección de la misma, en razón de que con este procedimiento se tiene la aceptación del modelo de simulación; pero si se quiere ser más riguroso, se puede realizar validaciones de más secciones, lo que permitirá comprobar la robustez de dicho simulador.

Por lo tanto, dada la validez del modelo de simulación del AIMSUN, se pasa a la simulación de otras Zonas de estudio para la obtención de datos para el análisis correspondiente, considerando otras condiciones de circulación. Para el análisis del Comportamiento Dinámico, se establecen perturbaciones y aumentos de flujos, y se demuestra que el modelo de simulación es autorregulado.

Finalmente se toman datos de simulación de variables tales como: velocidad, flujo, densidad, longitud de cola, tiempo de demora, para el análisis del Nivel de Servicio, considerando también condiciones de circulación. Los datos de simulación son obtenidos directamente de las vías, detectores y nodos.

6.2.1 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO 1

La figura 6.3 muestra una visualización del AIMSUN en 2D, con la geometría de la intersección, correspondiente al Caso de estudio 1, así como los datos de flujos y porcentajes de giro, obtenidos de las mediciones de cámaras de video TRAFICAM (figura 5.1, tablas 5.5 y 5.6) durante 50 minutos y proyectados a una hora, así como los detectores para la obtención de Series de Tiempo.

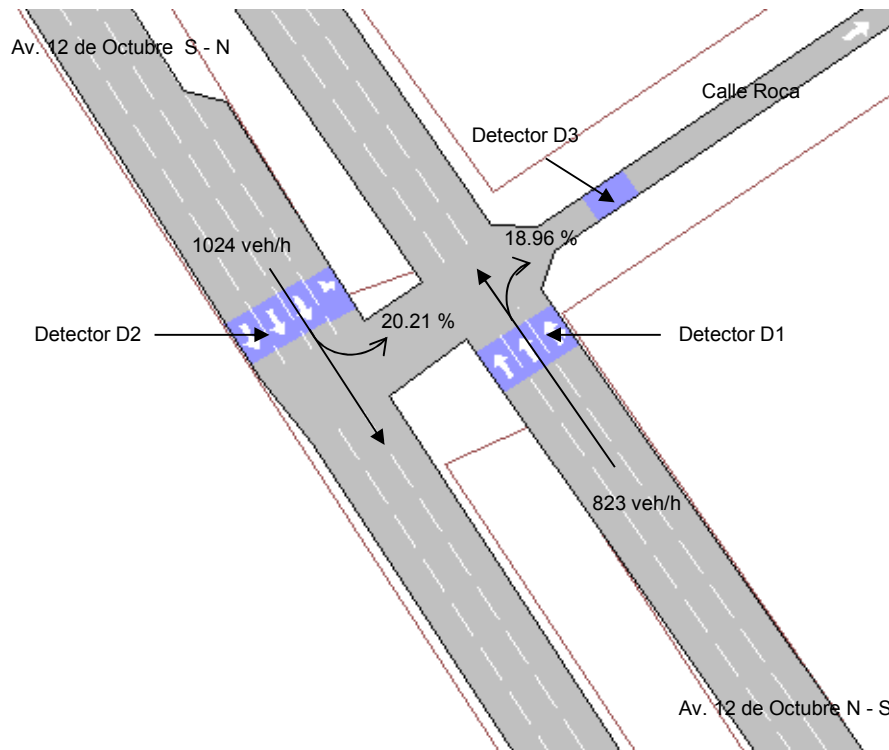


Figura 6.3 Visualización de características de calibración del Caso de estudio 1

La figura 6.4 muestra el aspecto del modelo de simulación calibrado de la intersección, destacando el proceso de fases de semaforización (mostrado en el nodo o intersección) y las ventanas de opciones del modelo y capas del plano de Quito (presentadas en la parte superior e inferior derecha).

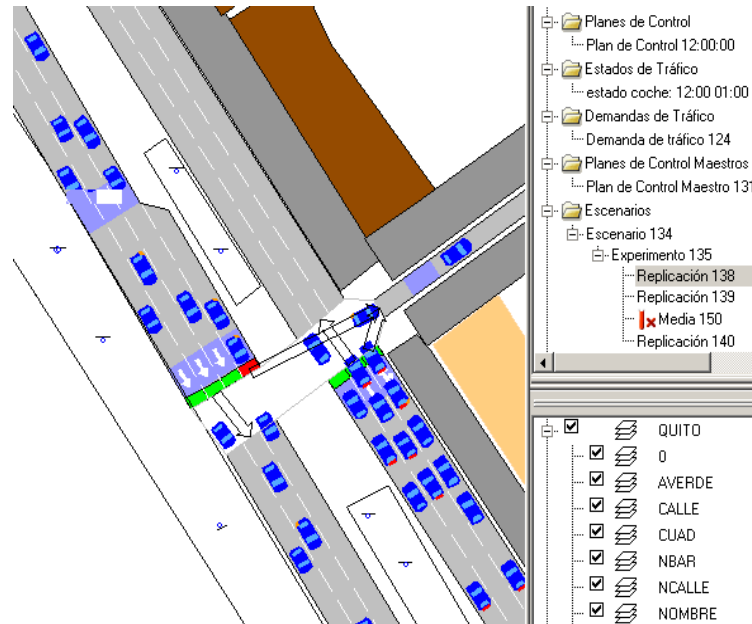


Figura 6.4 Visualización del modelo de simulación calibrado del Caso de estudio 1

Los resultados para la Validación del modelo de simulación, correspondientes al Caso de estudio 1, se presentan en la Tabla 6.3. Estos datos corresponden a los flujos horarios, tanto de simulación con varias réplicas cuanto a los obtenidos por las cámaras de video TRAFICAM cada 5 minutos durante 50 minutos. Los datos se extraen de cada uno de los detectores establecidos para tal efecto.

Los resultados de la prueba de la Hipótesis Nula se calculan con las ecuaciones Ec. 4.1, 4.2 y 4.3 y se comparan con la distribución *t-Student*, considerando un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (95 % de confiabilidad) y 10 grados de libertad (*m*).

De acuerdo a los valores calculados se rechaza la Hipótesis Nula y se acepta la hipótesis alternativa de que el modelo está reproduciendo adecuadamente la realidad del Tráfico Vehicular. En consecuencia se acepta el modelo de simulación.

Tabla 6.3 Datos de flujo para validación del modelo de simulación

Detector 1

Hora	Simulación	Cámaras	error		
12:15:00	83	39	44		
12:20:00	53	44	9		
12:25:00	60	44	16		
12:30:00	64	77	-13		
12:35:00	90	98	-8		
12:40:00	74	66	8		
12:45:00	81	74	7		
12:50:00	63	77	-14		
12:55:00	65	87	-22		
13:00:00	56	80	-24		
		error medio	0,3	hipótesis	0,04572536
		desviación	20,7474229	t-Student	1.812

Detector 2

Hora	Simulación	Cámaras	error		
12:15:00	99	96	3		
12:20:00	65	88	-23		
12:25:00	70	84	-14		
12:30:00	68	84	-16		
12:35:00	85	91	-6		
12:40:00	89	58	31		
12:45:00	88	88	0		
12:50:00	92	91	1		
12:55:00	82	94	-12		
13:00:00	80	82	-2		
		error medio	-3,8	hipótesis	0,8077999
		desviación	14,875782	t-Student	1.812

Detector 3

Hora	Simulación	Cámaras	error		
12:15:00	31	20	11		
12:20:00	17	34	-17		
12:25:00	20	27	-7		
12:30:00	25	45	-20		
12:35:00	29	31	-2		
12:40:00	38	21	17		
12:45:00	32	29	3		
12:50:00	32	27	5		
12:55:00	35	33	2		
13:00:00	26	35	-9		
		error medio	-1,7	hipótesis	0,45760619
		desviación	11,747813	t-Student	1.812

La Tabla 6.4 muestra los resultados para la Verificación del modelo de simulación, correspondientes a las colas máximas, tanto de simulación con varias réplicas cuanto a los obtenidos manualmente en cada ciclo semafórico (75 seg.) durante una hora, aplicando la Hipótesis Nula con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (95 % de confiabilidad) y 12 grados de libertad (m).

Los valores promedio de las colas se obtienen dividiendo, el número promedio de vehículos en cola, para el tiempo de duración del rojo de cada ciclo donde se genera la cola.

Tabla 6.4 Datos de longitud máxima de cola para validación del modelo

Detector 1

hora	simulación	manual	error		
12:05:00	2,33333	2,3125	0,02083		
12:10:00	2	3,4375	-1,4375		
12:15:00	2,66667	1,8125	0,85417		
12:20:00	1,66667	2,5	-0,83333		
12:25:00	1,66667	3	-1,33333		
12:30:00	2	2,6875	-0,6875		
12:35:00	3,66667	2,5	1,16667		
12:40:00	2,66667	3,1875	-0,52083		
12:45:00	2,66667	2,8125	-0,14583		
12:50:00	3	2,4375	0,5625		
12:55:00	2,66667	2,75	-0,08333		
13:00:00	2,33333	2,125	0,20833		
		error medio	-0,1857625	hipótesis	0,78735702
		desviación	0,81729147	t-Student	1.782

Detector 2

hora	simulación	manual	error		
12:05:00	2,33333	3,25	-0,91667		
12:10:00	2	1,5	0,5		
12:15:00	2,66667	2	0,66667		
12:20:00	1,66667	1,5	0,16667		
12:25:00	2	1,75	0,25		
12:30:00	2	4,25	-2,25		
12:35:00	5,33333	0,5	4,83333		
12:40:00	3	2	1		
12:45:00	3	2,25	0,75		
12:50:00	3	0,5	2,5		
12:55:00	2,66667	2,5	0,16667		
13:00:00	2,33333	4,5	-2,16667		
		error medio	0,45833333	hipótesis	0,83195419
		desviación	1,90841426	t-Student	1.782

Se puede concluir, de acuerdo a los valores obtenidos en las tablas 6.3 y 6.4, así como la visualización de la simulación, que el modelo refleja fielmente la realidad y es válido, lo que permite hacer corridas con varias condiciones, tales como el aumento de flujos de entrada, el retiro de la semaforización y el reemplazo con señales de circulación (ceda el paso, pare), y hacer el análisis de los efectos de dichos cambios.

6.3 RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Puesto que el modelo de simulación del AIMSUN es válido, entonces se pueden realizar simulaciones con y sin incidente, para analizar la característica dinámica del comportamiento vehicular en las Zonas correspondientes a los 3 Casos de estudio.

6.3.1 CASO DE ESTUDIO 1

La figura 6.5 muestra la gráfica de simulación, correspondiente al Caso de estudio 1, en lo relativo a la Longitud Máxima de Cola en la vía de la Av. 12 de Octubre sentido Norte – Sur, entre la Carrión y Roca. En esta gráfica se presenta los resultados de simulación con y sin incidente, durante 2 horas y presentados cada 5 minutos.

El inicio del incidente es a los 40 minutos de iniciada la simulación con una duración de 40 minutos. El incidente provocado en la vía en mención puede ser observado en la visualización de simulación del AIMSUN, dado por la figura 6.6.

De acuerdo a la gráfica de la figura 6.5, puede advertirse que durante los primeros 10 minutos de haber iniciado el incidente se provoca un sobre impulso. A partir de los 10 minutos del sobre impulso se tiene aproximadamente 10 minutos

adicionales para establecerse en la nueva condición, por lo que se puede concluir que el modelo de simulación es autorregulable.

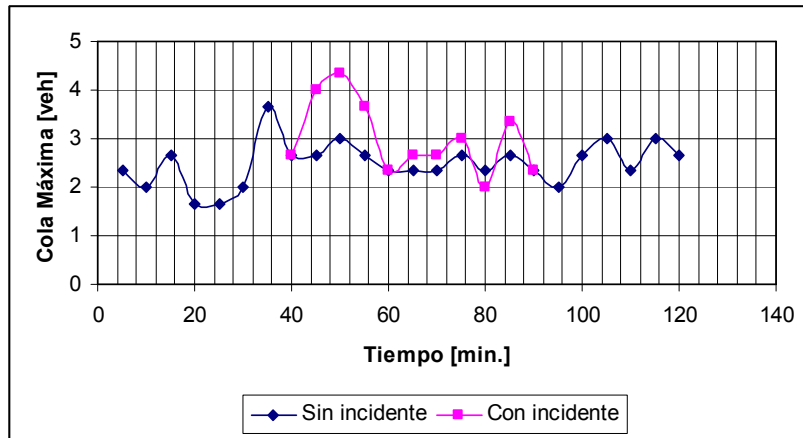


Figura 6.5 Comportamiento dinámico sin y con incidente (Av. 12 de Octubre N-S)

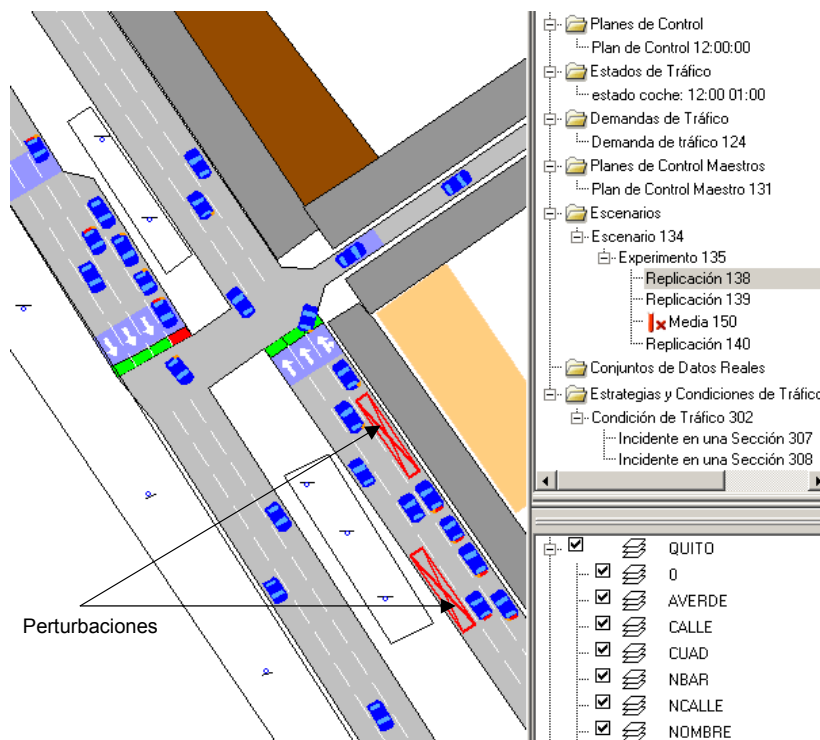


Figura 6.6 Visualización de simulación con incidente en la Av. 12 de Octubre

Se aprecia y se confirma con las siguientes pruebas, que el sistema de Tráfico Vehicular tiende a estabilizarse (alcanza el valor medio) en un tiempo mínimo de alrededor de 15 minutos.

En las siguientes figuras se presenta el Comportamiento Dinámico de las variables, tales como tiempo de demora, densidad y flujo.

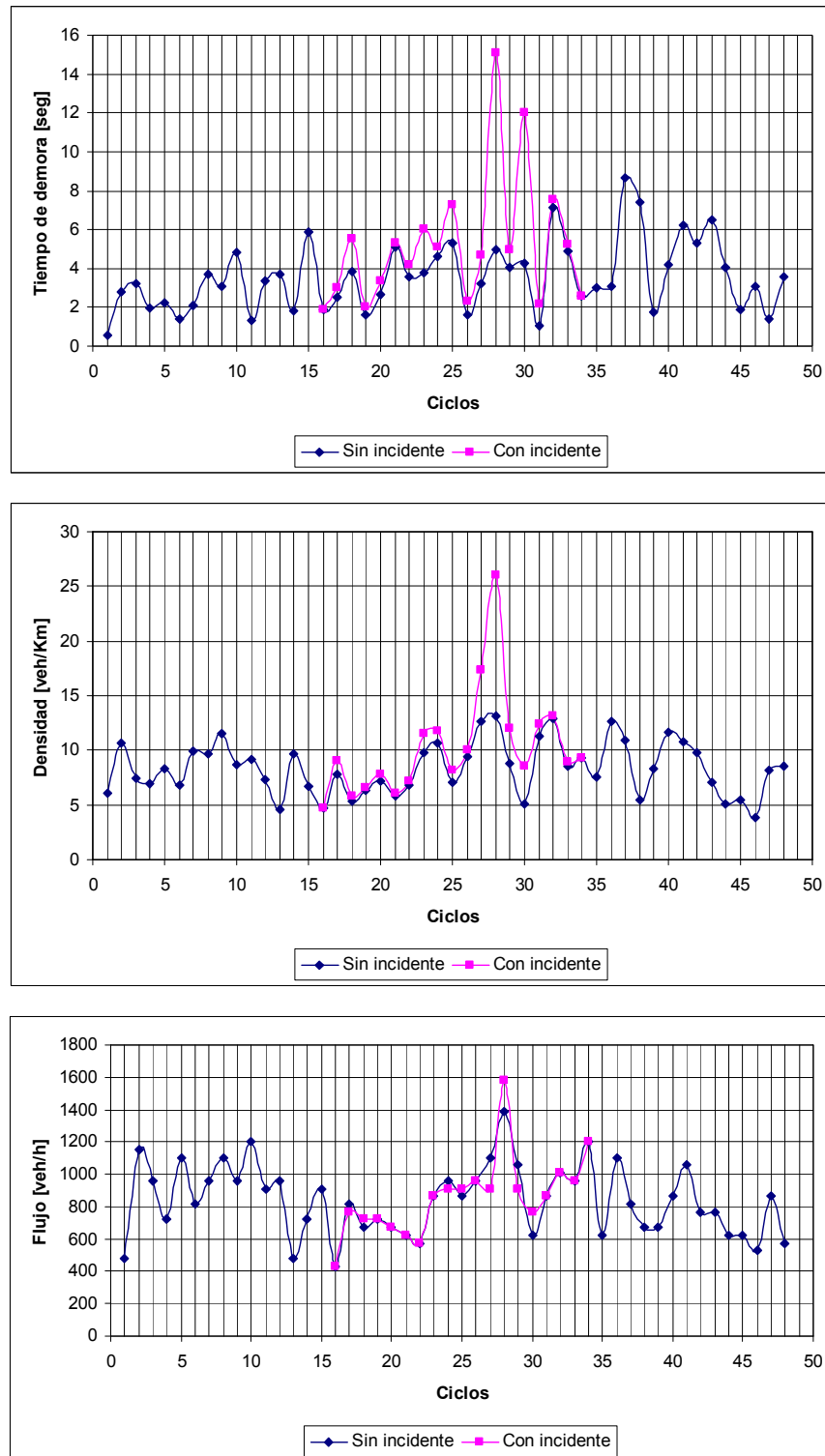


Figura 6.7 Comportamiento Dinámico en la Av. 12 de Octubre N-S

De acuerdo a los resultados de simulación, durante dos horas y con el detalle de datos cada ciclo semafórico (1 ciclo = 75 segundos), puede concluirse que las variables de densidad y tiempo de demora, son sensibles al efecto de la perturbación, mientras que el flujo no tiene una variación notoria ante la perturbación.

Se aprecia en las gráficas que durante el período de perturbación, a los 12 ciclos semafóricos (15 minutos) alcanza el máximo valor. Terminada la perturbación el modelo requiere de un par de ciclos semafóricos para volver al estado inicial.

Por consiguiente como variables de Control se pueden utilizar las longitudes de Cola, los Tiempos de demora y la Densidad. El Flujo no permite discriminar adecuadamente el efecto perturbador.

Este Caso de estudio, por ser el más simple en su construcción, permite algunos cambios tales como: reemplazo del semáforo por señales de pare y ceda el paso; aumento de flujos de entrada hasta la capacidad máxima con y sin semáforo; perturbación considerando el aumento de flujos de entrada con y sin semáforo. La conclusión a la que se llega es que para cualquier variante en el modelo, éste nunca alcanza un estado de saturación en su flujo vehicular.

6.3.2 CASO DE ESTUDIO 2

La Dinámica de Comportamiento del Caso de estudio 2 se analiza en una ruta estadística que corresponde a la Av. 12 de Octubre con sentido N – S y que contempla dos intersecciones, una con la Veintimilla y la otra con la Roca. Ese modelo de simulación es parte del modelo completo correspondiente a la Zona Crítica EPN-PUCE.

Se provoca una perturbación en la Av. 12 de Octubre entre la Veintimilla y Carrión. La perturbación se inicia a los 17 ciclos (1 ciclo = 75 seg.) de iniciada la simulación y tiene una duración de 17 ciclos. El período de simulación

corresponde a una hora y los resultados de simulación se presentan en cada ciclo.

La figura 6.8 muestra la visualización de la simulación en la ruta estadística de la Av. 12 de Octubre N – S.

La figura 6.9 presenta los resultados de simulación de la velocidad y el tiempo de viaje sin y con perturbación, correspondiente a la ruta estadística elegida.

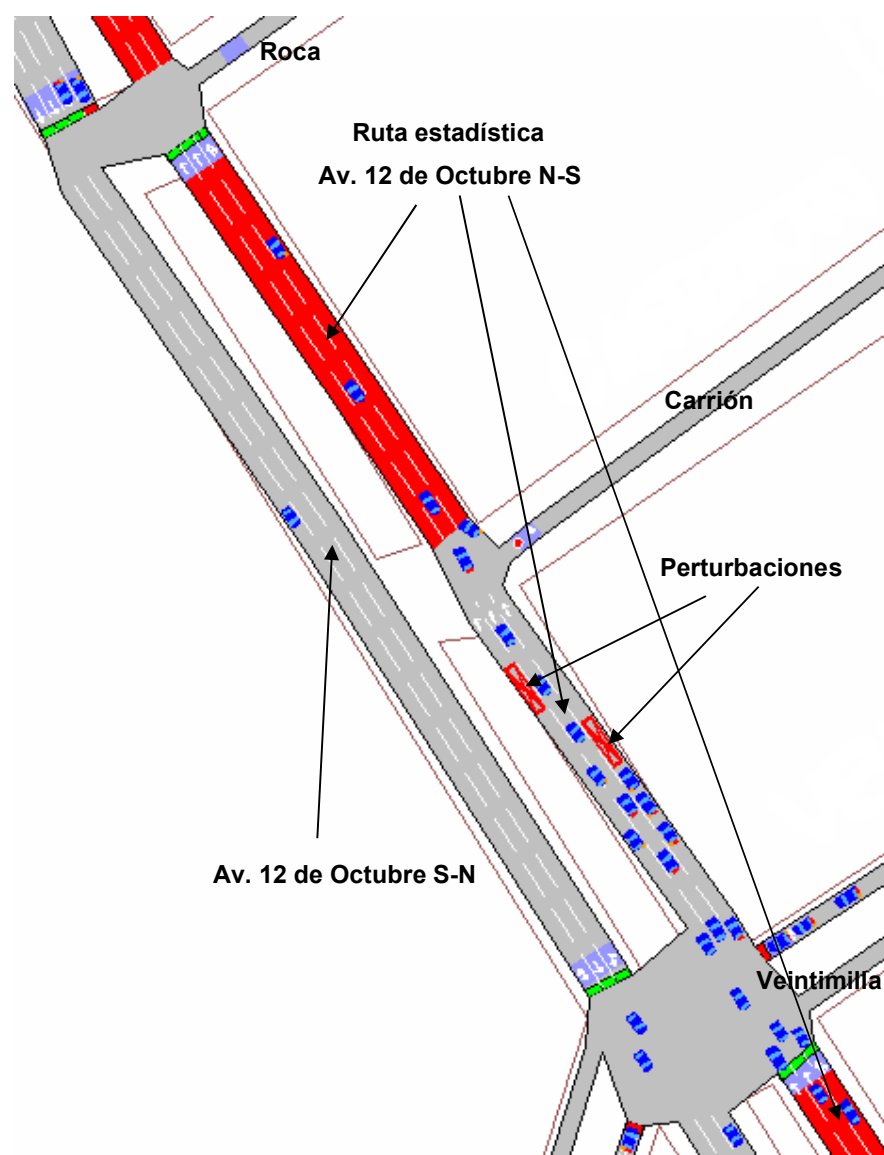


Figura 6.8 Visualización de la ruta estadística de la Av. 12 de Octubre N - S

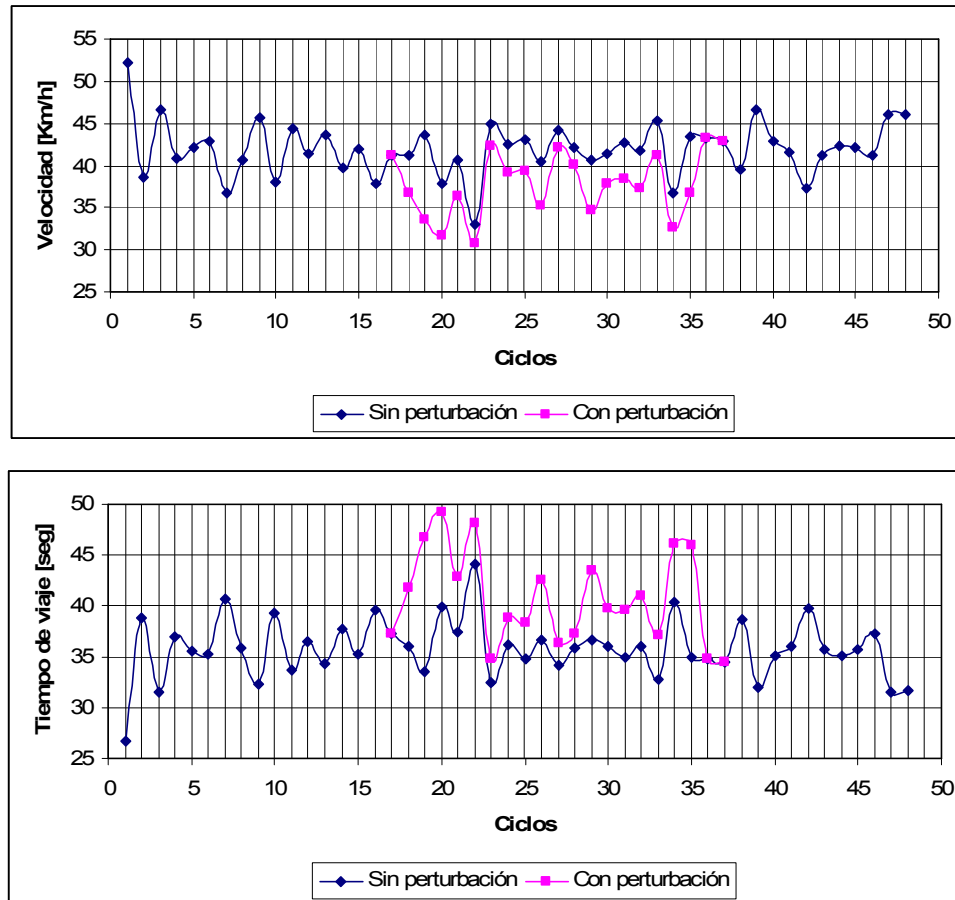


Figura 6.9 Resultados de simulación en la ruta estadística Av. 12 de Octubre N-S

Como puede apreciarse, el valor medio de la velocidad en la ruta elegida, disminuye y el valor medio del tiempo de viaje aumenta, lo que confirma la característica dinámica del modelo de simulación del sistema de Tráfico Vehicular.

En este Caso de estudio, al tratarse de una ruta estadística pequeña y someterse a variantes similares al Caso de estudio 1, sus resultados son similares en el sentido de que no se alcanza la saturación del flujo vehicular.

6.3.3 CASO DE ESTUDIO 3

El Comportamiento Dinámico en el Caso de estudio 3, se presenta a través de la

visualización de una de las secciones, donde se extrae la mayor cantidad de datos. Esta sección corresponde a la Av. Colón, entre la Av. Amazonas y 9 de Octubre. En las figuras 4.1 y 4.11 se observa la ZC de la Av. Colón completa y las secciones correspondientes, cuyos datos de campo medidos aparecen en la tabla 4.7 (ciclos semafóricos) y en la figura 4.16 (flujos de entrada y porcentajes de giro).

En la figura 6.10 se tiene la visualización de la simulación de la sección señalada con los elementos de perturbación.

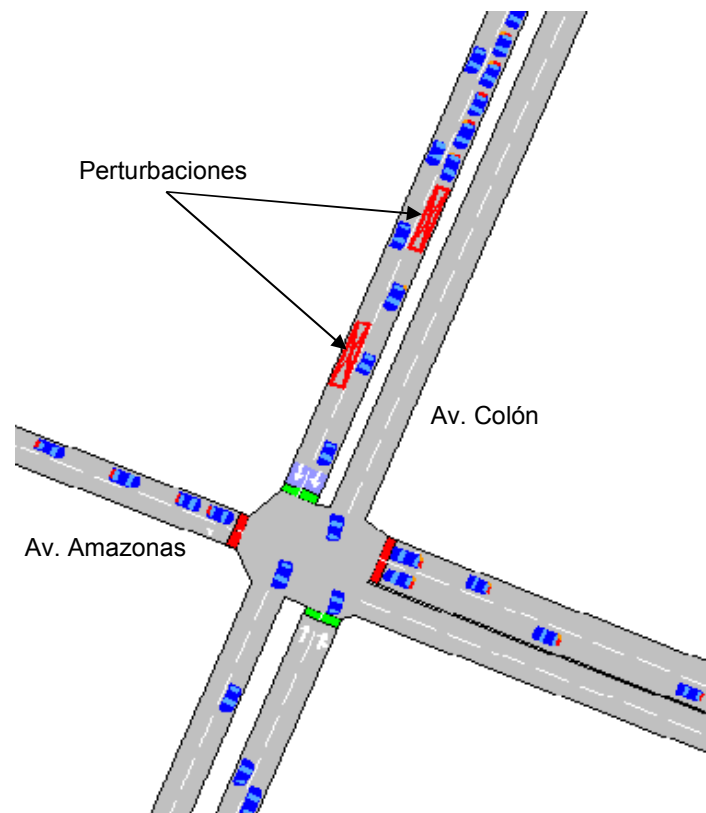


Figura 6.10 Visualización de simulación con perturbación en la Av. Colón O-E

Los resultados de simulación obtenidos en la vía de la Av. Colón Oeste - Este entre la 9 de Octubre y Av. Amazonas, sin y con perturbación se pueden apreciar en las gráficas de la figura 6.11. Los datos corresponden a cada ciclo semafórico (1 ciclo = 90 seg.) durante una hora, con incidente que inicia a los 20 minutos (13 ciclos aproximadamente) y dura 20 minutos (hasta los 27 ciclos aproximadamente).

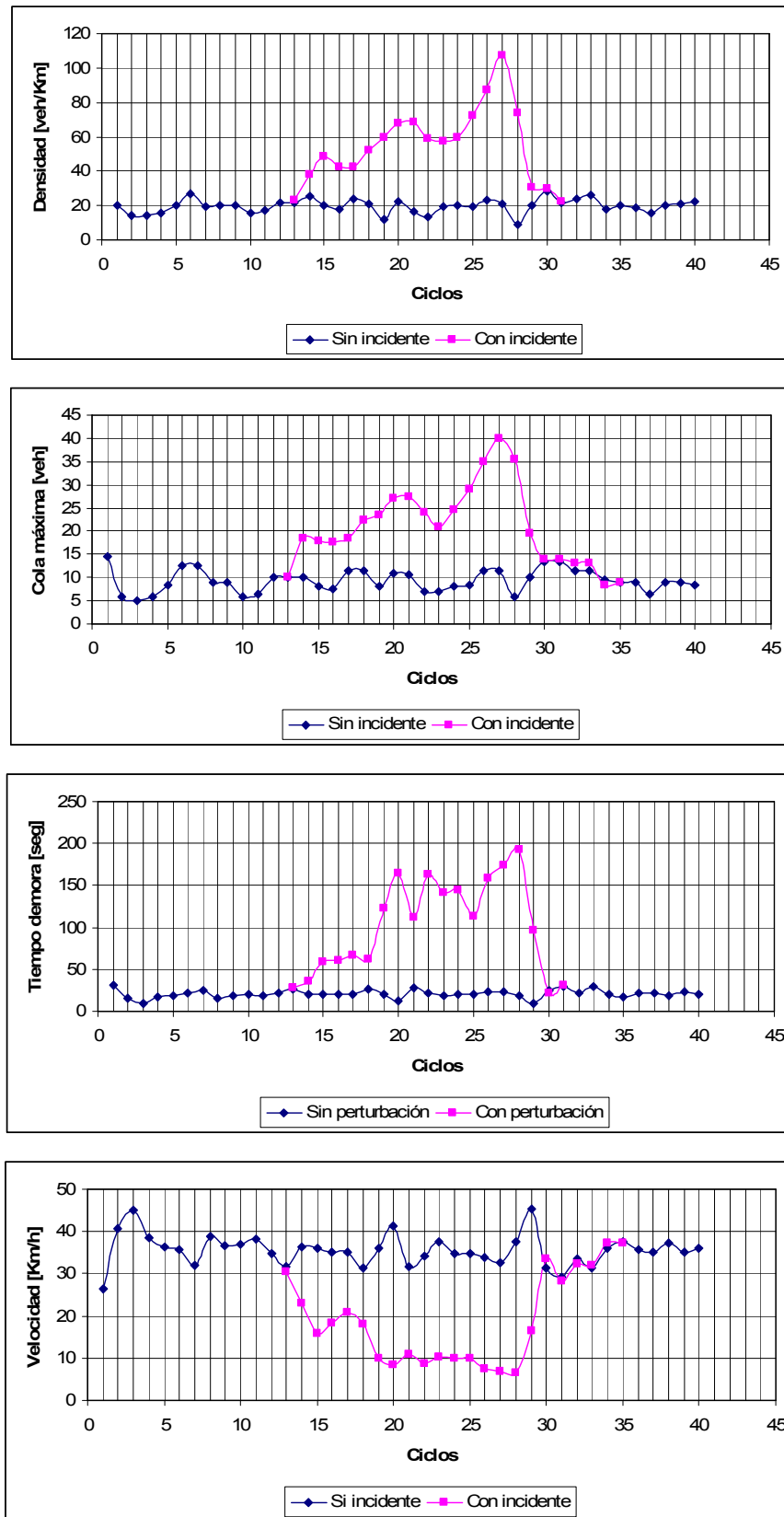


Figura 6.11 Comportamiento Dinámico de una sección del Caso de estudio 3

La figura 6.12 muestra una visualización del estado de simulación en la ZC completa de la Av. Colón, resaltándose la ruta estadística en el sentido Oeste - Este, en la cual se conserva el incidente con los tiempos de inicio y duración, y ubicación (figura 6.10).



Figura 6.12 Visualización de simulación de ruta estadística de la Av. Colón O–E

Los datos de simulación del Comportamiento Dinámico en la ruta estadística corresponden a cada ciclo semafórico (1 ciclo = 90 seg. en cada una de las intersecciones semaforizadas de la ruta). El tiempo de simulación corresponde a una hora y los datos se detallan en la figura 6.13.

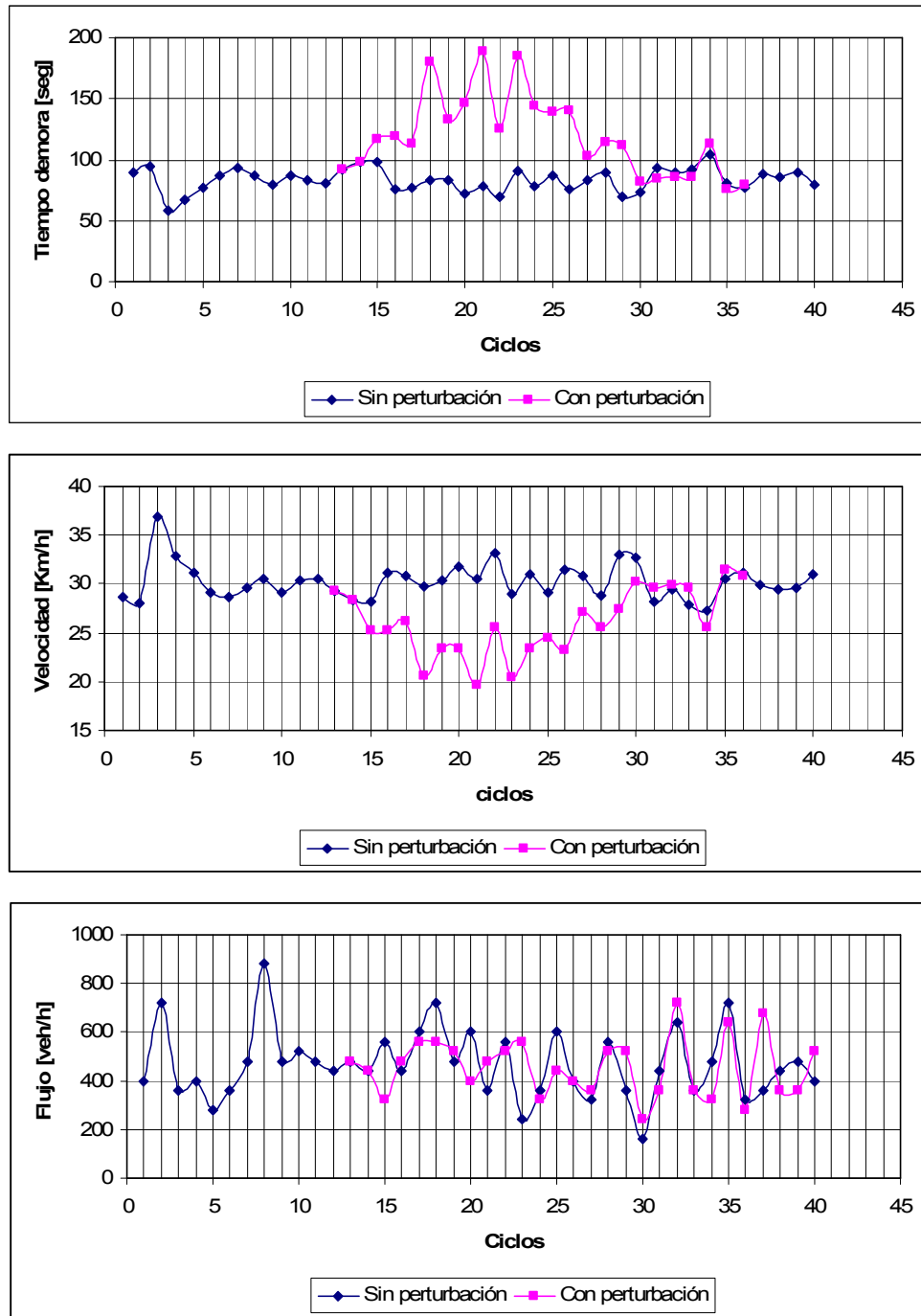


Fig. 6.13 Datos de simulación en la ruta estadística de la Av. Colón O - E

De acuerdo a los datos de simulación presentados en las figuras 6.11 y 6.13, se puede decir que el Comportamiento Dinámico es el esperado, puesto que existe el transitorio a partir de la aparición de la perturbación y el restablecimiento al estado estable a partir de algunos ciclos de terminada la perturbación, esto es 4 ciclos en las figuras 6.11 y 9 ciclos en las figuras 6.13 (excepto en el flujo).

Como puede observarse en la figura 6.13, el flujo es poco sensible a la perturbación, igual que sucedía en los Casos de estudio anteriores, por lo que esta variable no es muy útil para el proceso de control.

6.4 RESULTADOS DEL NIVEL DE SERVICIO EN LOS CASOS DE ESTUDIO 1, 2 Y 3

Los resultados de simulación que se presentan a continuación corresponden a los Niveles de Servicio de los Casos de estudio 1, 2 y 3. De acuerdo al AIMSUN estos datos son obtenidos únicamente en los nodos (intersecciones).

Los datos de simulación de los Casos de estudio se presentan en las figuras 6.14 (intersección Av. 12 de Octubre y Roca), 6.15 (intersecciones de la Av. 12 de Octubre con las calles Veintimilla y Roca) y 6.16 a) y b) (intersección de la Av. Colón y Av. Amazonas).

Las condiciones de simulación son las mismas que en los respectivos procesos anteriores.

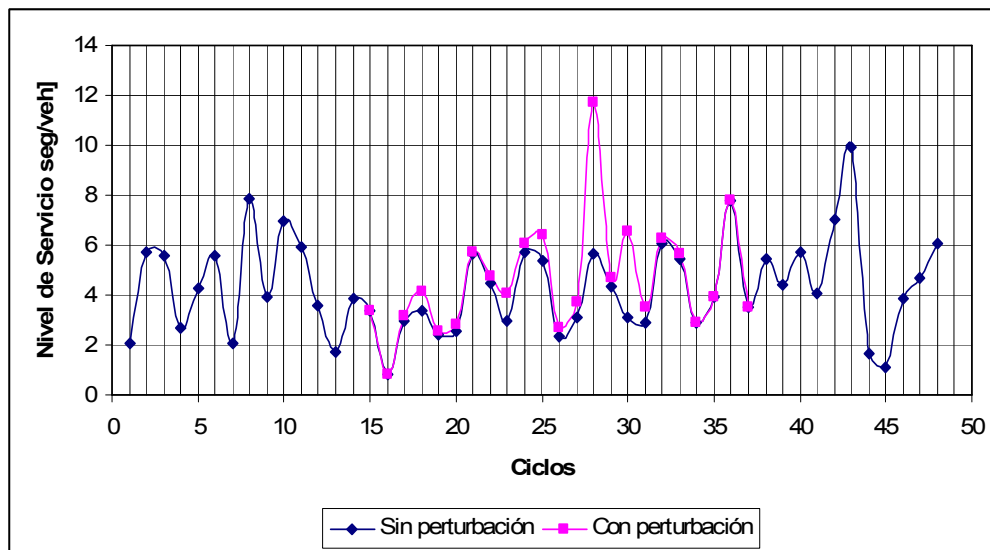


Figura 6.14 Nodo del Caso de estudio 1

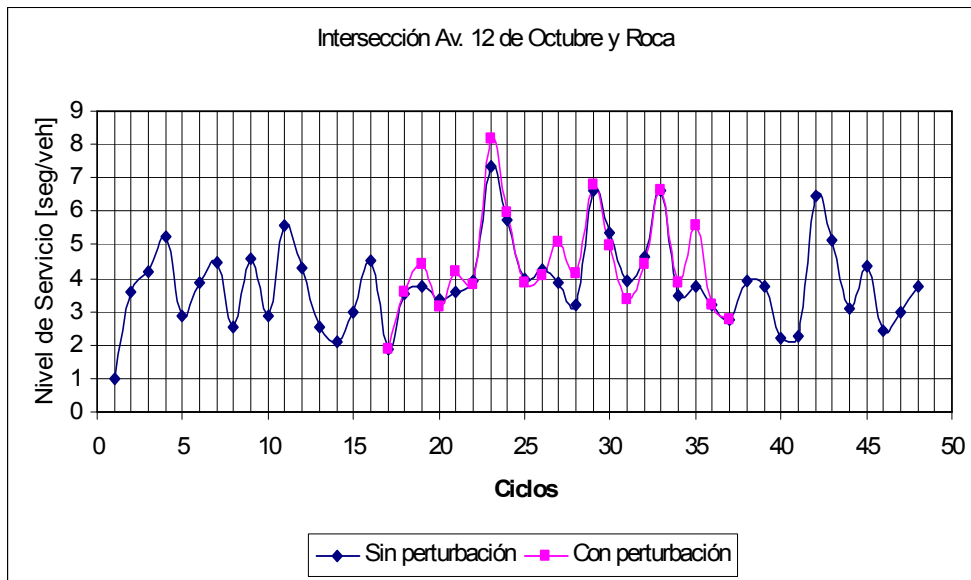
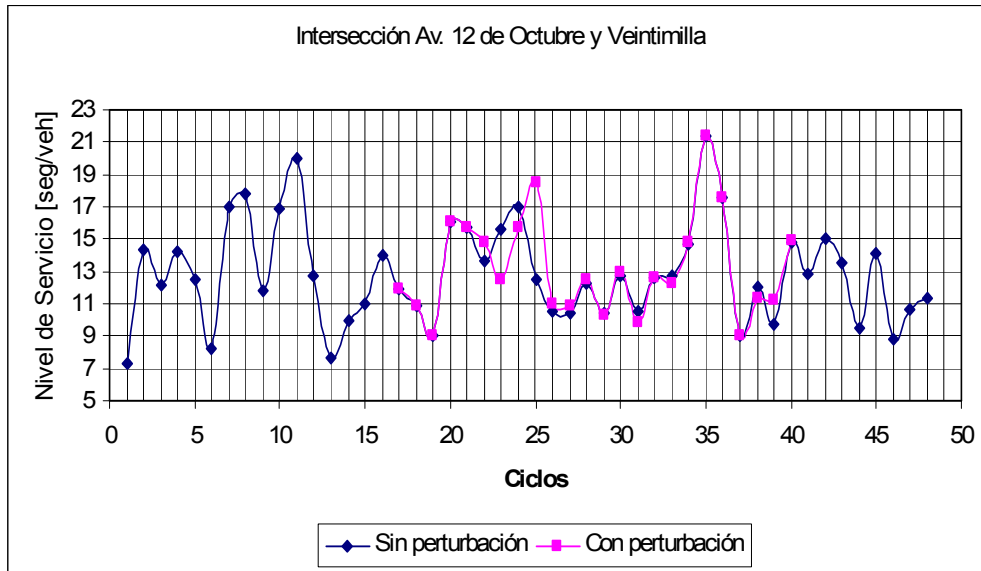
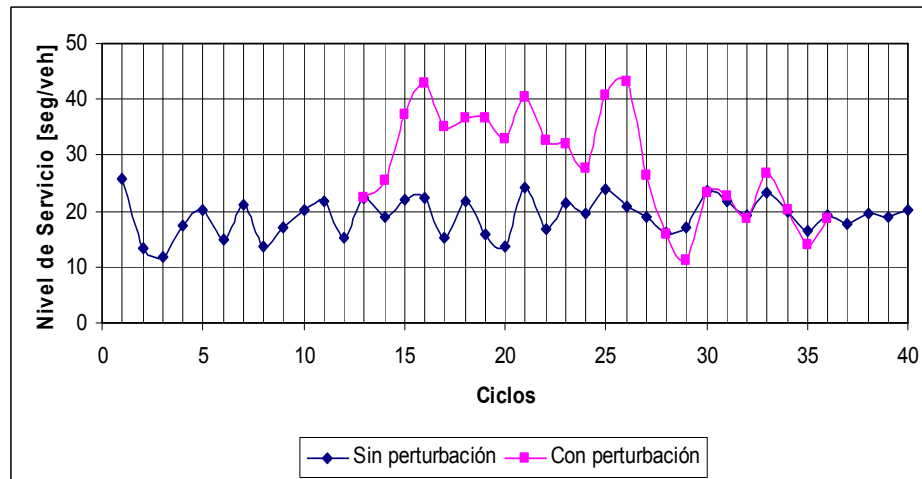
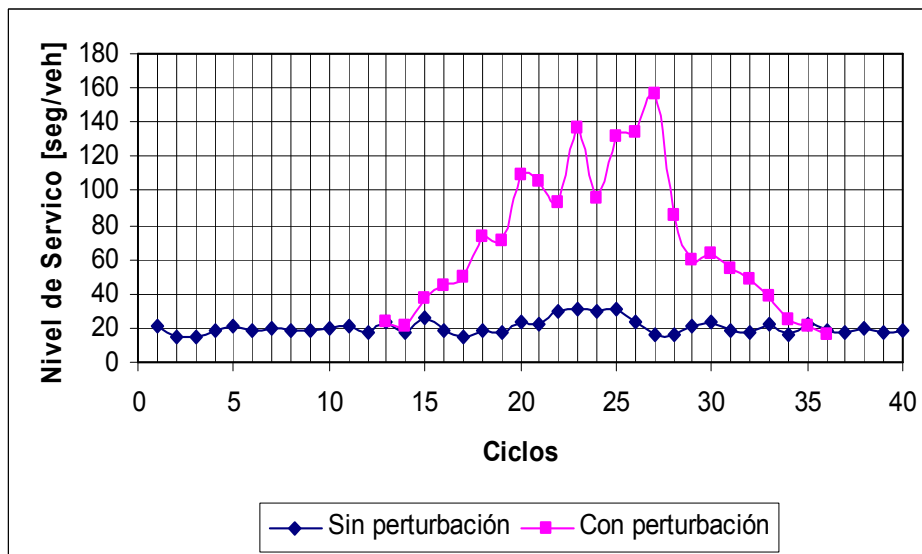


Figura 6.15 Nodos del Caso de estudio 2



a) con flujo normal



b) con aumento de flujo

Figura 6.16 Nodo: Intersección Av. Colón con Av. Amazonas

De acuerdo a los resultados de simulación, se puede decir en general que existe una elevación en el valor medio del Nivel de Servicio, y en forma particular que el efecto de la perturbación en cada intersección es diferente, debido a que se trata de zonas con configuraciones diferentes.

Además en la figura 6.16 se puede apreciar la influencia del aumento del flujo vehicular en los valores de Nivel de Servicio. Un resumen de los valores medios

de Nivel de Servicio con flujo normal y aumentado con y sin perturbación se aprecia en la tabla 6.5.

Tabla 6.5 Efecto de variación de flujo en el Nivel de Servicio

flujo	Nivel de Servicio	
	normal	aumentado
Sin perturbación	19.07	20.40
Con perturbación	24.14	50.31

Según el AIMSUN el índice del Nivel de Servicio (NS) en un nodo, está definido por la siguiente expresión:

$$NS = \frac{\sum Td * f}{\sum f}$$

De acuerdo a los resultados anteriores y al criterio del AIMSUN, el Tiempo de Demora Td tiene mayor influencia que el flujo f , por lo que el Nivel de Servicio siempre es mayor cuando existe una perturbación.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Se ha alcanzado el propósito de modelar y analizar el comportamiento de Tráfico Vehicular aplicado a Zonas Críticas representativas de la ciudad de Quito, mediante simulación, utilizando el simulador profesional AIMSUN,

De los modelos desarrollados a través de variables principales, Redes Petri y Simulación, estos dos últimos permiten reproducir el comportamiento dinámico y la realidad del Tráfico Vehicular, con flujos y topologías variadas y con un alto grado de confiabilidad.

Los modelos implementados en AIMSUN, a través de la Calibración y Validación propias del simulador, garantizan la robustez de las simulaciones, situación que se confirmó mediante Validación Estadística y Verificación utilizando información adicional.

Los modelos de AIMSUN permiten incluir diferentes condiciones de circulación, incidentes, cambios de parámetros y variables e inclusive cambios en la topología, que sirven para analizar alternativas en la operación del sistema de Tráfico Vehicular.

Los Niveles de Servicio en diferentes Zonas Críticas, bajo diferentes condiciones de operación, pueden ser determinados utilizando resultados a través de Series de Tiempo y promedios estadísticos de diferentes variables, relacionadas con la eficacia del sistema de Tráfico Vehicular.

Las mediciones realizadas, utilizando video cámaras, permiten la construcción de modelos adecuados, por disponer de información automatizada de variables de Tráfico Vehicular, con un nivel de precisión, facilidad y costo razonable.

En términos generales, el modelo de simulación sirve para analizar el Comportamiento Dinámico y Nivel de Servicio del Tráfico Vehicular bajo diferentes topologías y condiciones de circulación, utilizando mediciones en Zonas Críticas.

Como aspectos más específicos de interés, en esta Tesis sobre Tráfico Vehicular, pueden anotarse los siguientes:

Los modelos de simulación utilizando el simulador profesional AIMSUN, con demanda de flujo, reproducen cercanamente la realidad de Tráfico Vehicular, aún considerando el comportamiento aleatorio.

El Comportamiento Dinámico de los sistemas de Tráfico Vehicular, presentada una perturbación, se estabiliza en un lapso no menor a unos 15 minutos, por lo cual se puede trabajar con aforo o flujo horario.

La dinámica después de una perturbación es más rápida, dependiendo de la capacidad vial y los niveles de flujo existentes, y está en el orden de unos pocos ciclos de semáforo hasta unos 10 minutos, en todo caso es menor que la anterior.

Niveles de servicio tales como el A, B y C, en los cuales no existe congestión, las variables de velocidad, densidad, colas y tiempos de demora son aceptables, de acuerdo con el criterio de eficacia del sistema de Tráfico Vehicular. Valores típicos del índice de Nivel de Servicio no mayores a 30 [seg/veh] se presentan en estos niveles. Niveles de Servicio D, E y F se presentan con valores típicos de este índice mayores a 30 [seg/veh].

La velocidad, longitud de cola, tiempo de demora tienen una variación significativa, por lo cual pueden seleccionarse como variables de decisión o control.

7.2 RECOMENDACIONES

Utilizando el simulador profesional AIMSUN se debe explorar diferentes estrategias de control, sobre los Planes de Control de los semáforos.

Se debe realizar simulaciones en zonas de acción más extensas y conflictivas en la ciudad de Quito, que permitan la toma de decisiones para la Planificación y Operación del Transporte en general, por parte de las Instituciones responsables de la Administración de Transporte; puesto que se dispone en el Departamento de Automatización y Control, por un lado de personal capacitado, a través de la investigación realizada, y por otro de una infraestructura mínima en hardware con las cámaras de video y en software con el simulador AIMSUN.

La aplicación, a través de soluciones y estrategias, para la mejora de los Niveles de Servicio, requiere necesariamente de una participación decidida de las instituciones y autoridades responsables, para que utilicen estos recursos humanos y materiales y presten las facilidades para pruebas de campo.

De acuerdo con la información disponible a través de los medios de comunicación, se conoce de Planes Maestros para la mejora del Tráfico Vehicular en la ciudad de Quito. Sería de importancia establecer contacto con organismos responsables, para que ingenieros de Control puedan participar en dichos planes, con tecnología de avanzada para mejorar la Operación y Control del Tráfico Vehicular.

Se recomienda que los procesos de mediciones con cámaras de video, la automatización de la información del Tráfico Vehicular y la Operación a través de centros de Control sean mejorados, con proyectos concretos y con financiamiento, por ejemplo con organismos como el Consejo Nacional de Tránsito u organismos seccionales.

Definir una línea de investigación en Operación y Control de Tráfico Vehicular, ya que de la experiencia de esta Tesis existe el apoyo tanto académico como

financiero por parte de la Escuela Politécnica Nacional, la misma que no ha escatimado esfuerzos por el impulso a las Maestrías Individuales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Anand Rajagopal, S.L. Dhingra, Pranay Singhi (2002), “Comparative Evaluation of Traffic Management Strategies Using Simulation”, Civil Engineering Department, IIT – Bombay, India, pp. 1-8.
- [2] Armosini R., Giua A., Pilloni M., Seatzu C., “Simulation and Control of a Bottling Plant using First-Order Hybrid Petri nets”, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cagliari, Italy, 2003.
- [3] Becerra S., Lampón J., Otero G., Ramírez L., “Modelación del problema del tráfico”, pp. 1-4.
- [4] Bendat J., Pierol A., “Analysis and Measurement Procedures”, 1971, J. Wiley & Sons, Inc., EEUU, pp. 1-34.
- [5] Bohlin T., (2004), “Working Grey – Box Process Identification”, Suecia.
- [6] Bonzani I., Mussone L. (2002) “From Experiments to Hydrodynamic Traffic Flow Models: I-Modelling and Parameter Identification”, Transaction on Mathematical and Computer Modelling, pp. 1435-1442.
- [7] Bucher, Willis & Ratliff Corporation, “City of Fayetteville, Arkansas Traffic and Transportation Study”, Charper 3 – Traffic Analysis, 2002, pp. 21-29.
- [8] Burbano P., Cerón O., Editores (2006), Análisis y Modelación de Tráfico Vehicular, “Reporte N° 2 Recolección de datos, índices de calidad, modelos de simulación, zona crítica”, Escuela Politécnica Nacional, FUNDACYT.
- [9] Burbano P., Cerón O., Editores (2006), Simulación de Tráfico Vehicular, “Reporte N° 3 Mediciones, Modelación y Simulación de Tráfico Vehicular en una Zona Crítica de la Ciudad de Quito”, Escuela Politécnica Nacional, FUNDACYT.

- [10] Cal y Mayor R., Cárdenas J. (2006), "Ingeniería de Tránsito – Fundamentos y Aplicaciones", 7a. edición, Alfa omega, Capítulos 3, 7-11.
- [11] Cerón O. y Burbano P., Editores (2006), Estrategias de Modelación y Análisis de Tráfico Vehicular, "Reporte N° 1 Estado del Arte en Modelación, Análisis de Tráfico Vehicular y Herramientas", Escuela Politécnica Nacional, FUNDACYT.
- [12] Chen S., *et al* (2003), "Traffic Flow Forecasting Based on Grey Neural Network Model", Proceedings of the Second Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 1275-1278.
- [13] C. P. Burbano, O. E. Cerón, "Vehicular Traffic Flow Simulation", (2007), Departamento de Automatización y Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- [14] Dextre J., Carrasco L., (1998), "Modelo de Simulación de Tráfico Vehicular", XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil - Trujillo, Perú.
- [15] Di Febbraro A., Giglio D., y Sacco N. (2004), "Urban Traffic Control Structure based on Hybrid Petri Nets", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 5 (No. 4), pp. 224-237.
- [16] Dirección Nacional de Tránsito, (2006), Departamento de Ingeniería de Tránsito y Señalización, Ecuador.
- [17] Empresa Metropolitana de Servicios y Administración de Transporte (EMSAT), (2006), Unidad de Tráfico y Red Vial, Ecuador.
- [18] Flores C., Cerón O. (2006), "Análisis del Comportamiento de un Sistema de Eventos Discretos Mediante Redes de Petri", Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

- [19] FUNDACYT, Proyecto de Investigación “Modelación, Simulación y Control de Tráfico Vehicular (MSCTV)”, Ecuador 2005.
- [20] Galindo E., “Estadística - Métodos y Aplicaciones”, 2006, Pro ciencia Editores, Capítulos 4, 6 – 9. Ecuador.
- [21] Guo D., *et al*, (2003), “A Study on the Framework of Urban Traffic Control System”, IEEE, pp. 842 – 846.
- [22] Han C., Song S. (2003), “A review of some main models for traffic flow forecasting”, pp. 216-219.
- [23] Haverkort B. (1998), “Performance of Computer Communication Systems”, John Wiley & Sons Ltd., Chapters III- IV-V, XVI.
- [24] Hoogendoorn S., Bovy P. “State of-the-art-of Vehicular Traffic Flow Modelling”, Special Issue on Road Traffic Modelling and Control on the Journal of Systems and Control Engineering.
- [25] Hoogendoorn S., Bovy P. (2001), “Generic gas-kinetic traffic systems modelling with applications to vehicular traffic flow”, Transactions on Transportation research part B, pp. 317-336.
- [26] Júlvez, J., Boel R., (2005), “Modelling and Controlling Traffic Behaviour with Continuous Petri Nets”, University of Zaragoza, Spain.
- [27] Kleinrock L., (1975), “Queueing Systems”, Vol. 1, John Wiley & Sons, Canadá, Chapters 3, 4.
- [28] List, G., Cetin M., (2004), “Modelling Traffic Signal Control Using Petri Nets”, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 5 (No. 3), pp. 177–187.

- [29] Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para Carreteras, Cal & Mayor y Asociados (HCM-2000).
- [30] Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte, Cal y Mayor & Asociados, (2005),
- [31] Math Works Inc. (2002), "Toolbox Petri Nets of Matlab".
- [32] Martín del Brío B., Sanz A., (2002), "Redes Neuronales y Sistemas Difusos", Alfa omega, México.
- [33] Messai N., et al, (2004), "Feed-forward and RTRL, Neural Networks for the Macroscopic Traffic Flow Prediction and Monitoring: The Potential of each other", pp. 199–204.
- [34] Nakamiti G., Gomide F., (1996), "Fuzzy Sets in Distributed Traffic Control", IEEE.
- [35] National Instruments, (2005), LabVIEW User's Manual.
- [36] O. E. Cerón, C. P. Burbano, "Urban Traffic Hybrid Model", (2007), Departamento de Automatización y Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- [37] Papageorgiou M. (2003). Review of road traffic control strategies. Proceedings of the IEEE, 91(12), pp. 2043-2067.
- [38] Plano de la Ciudad de Quito en AutoCad, (2005), Ecuador.
- [39] TRAFICON, (2005), Detector de Presencia en Intersecciones, Bélgica.
- [40] TSS – Transport Simulation Systems, 2006, AIMSUN-NG Ver. 5.1 Microsimulator User's Manual.

[41] Seminario Taller: “TECNOLOGÍAS PARA EL CONTROL Y PLANIFICACIÓN DEL TRÁFICO VEHICULAR”, EPN – USFQ, Auspiciado por SENACYT, 2007.

[42] Zurawski R., Zhou M., “Petri Nets and Industrial Applications: Tutorial”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, pp. 567–583.

<http://www.aimsun.com>

<http://www.math.umd.edu/scholl/matlab/traffic.html>

<http://www.mesquite.com>

<http://www.ac.tuiasi.ro/pntool/download.php>

http://www.fortunecity.es/felices/lapaz/110/Petri_Index_Spa.html

<http://www.det.uvigo.es>

<http://www.tfhrc.gov/its/tft/charper8.pdf>

<http://www.cerritos.edu/advtransfechctr/onlinecourse/trafflowtheory>