# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

# FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS Y CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR EN ZONAS CRÍTICAS DE LA CIUDAD DE QUITO, MEDIANTE SIMULACIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL

YADIRA LUCIA BRAVO NARVAEZ

**DIRECTOR: Prof. Patricio Burbano MSc.** 

**Quito, Octubre 2007** 

### **DECLARACIÓN**

Yo Yadira Lucía Bravo Narváez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada 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.

Yadira L. Bravo Narváez

CERTIFICACIÓN  Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yadira Lucia Bravo Na bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano DIRECTOR DEL PROY			
Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yadira Lucia Bravo Na bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano			
Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yadira Lucia Bravo Na bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano			
Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yadira Lucia Bravo Na bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano			
Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yadira Lucia Bravo Na bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano			
Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yadira Lucia Bravo Na bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano			
Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yadira Lucia Bravo Na bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano			
bajo mi supervisión.  Prof. Patricio Burbano		CERTIFICAC	CIÓN
Prof. Patricio Burbano		e trabajo fue desarrolla	do por Yadira Lucia Bravo Na
	bajo mi supervisión.		
			Prof Patricio Rurhano
			DIRECTOR DEL PROY

### **DEDICATORIA**

Dedico es trabajo a Dios y a la Virgen por darme la vida y salud para culminarlo, a Ángel por su apoyo incondicional, paciencia y por su insistencia para finalizar la tesis, a mis padres por ser el ejemplo a seguir y demostrarme que siempre hay tiempo para superarse, a Marjorie, Javier y Patricia por siempre estar conmigo.

Yadira

### **AGRADECIMIENTO**

Primeramente quiero agradecer al Ing. Patricio Burbano y al Ing. Oscar Cerón, por su apoyo incondicional, por la guía y por ser unos excelentes compañeros de trabajo y no desmayar ante las adversidades.

Quiero agradecer a los compañeros del Proyecto de Modelación, Simulación y Control de Tráfico Vehicular en especial al Dr. Alberto Sánchez por permitirme participar en éste y desarrollar parte de esta investiagión.

Un agradecimiento al los miembros del Comité Supervisor Dr. Robín Álvarez y Dr. Hugo Banda, por su acertada dirección, sus consejos y opiniones que permitieron finalizar este trabajo.

También un agradecimiento especial al Departamento de Automatización y Control Industrial, representado por el Ing. Pablo Angulo y a la Escuela Politécnica Nacional por permitirme realizar esta maestría brindándome el apoyo necesario para su culminación.

Yadira

# **INDICE**

DECLARACIÓN	j
CERTIFICACIÓN	ii
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE	V
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE TABLAS	х
RESUMEN	xi
PRESENTACIÓN	
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	
1.1. PROBLEMA DEL TRÁFICO VEHICULAR.	1
1.2. SIMULACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS	3
1.3. PROBLEMA DE CONTROL	5
1.4. OBJETIVOS DE LA TESIS	
1.5. MODELOS DE TRÁFICO VEHICULAR [3].  1.5.1. INTERPRETACIÓN FÍSICA  1.5.2. DETERMINISTICOS VERSUS ESTOCÁSTICOS [ 1.5.3. DISCRETO VERSUS CONTINUO  1.5.4. NIVEL DE DETALLE  1.5.4.1. Modelo macroscópico [3,4]	[3,4] 10 [3,4] 11 [11] 11 [12] 13 [13] 14 [18] 21
CAPÍTULO 2	24
TRÁFICO VEHICULAR	24
2.1. TRÁFICO VEHICULAR	24 24 25 25 27 28 29 30 30
2.2. SEMAFORIZACIÓN [3]	
CAPÍTULO 3	
MEDICIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR	
3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TRÁFICO V	TEHICULAR 35

	3.1. SENSORES INVASIVOS	35
	3.1.1. BUCLES INDUCTIVOS	36
	3.1.2. SENSORES MAGNETICOS	3 /
	3.1.3. TUBOS NEUMÁTICOS	37
	3.1.4. SENSORES PIEZOELÉCTRICOS 3.1.5. SENSORES EN BASE A CABLES DE FIBRA ÓPTICA. 3.2. SENSORES NO INVASIVOS	37
	3.1.5. SENSORES EN BASE A CABLES DE FIBRA ÓPTICA.	38
	3.2. SENSORES NO INVASIVOS	39
	3.2.1. SENSOR INFRARROJO	40
	3.2.2. ULTRASONIDO	40
	3.2.3 MICROONDAS	41
	3.2.4. CÁMARAS [2,3]	41
	3.2.4. CÁMARAS [2,3] 3.3. SISTEMA TRAFICAM [4]	42
	3.3.1. CARACTERÍSTICAS  3.4. PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN  3.4. DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LA RIVIEW	43
	3.4. PRUEBAS DE CALIBRACION DEL EQUIPO DE MEDICION	44
	5.4.1. DESARROLLO DEL I ROGRAMA EN LADVIEW	+.
	3.4.2. ANÁLISIS DE LA PRUEBAS REALIZADAS  3.4.3. MODIFICACIONES AL PROGRAMA EN LABVIEW	47
	3.4.3. MODIFICACIONES AL PROGRAMA EN LABVIEW	48
	3.4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	
	3.5. MEDICIONES  3.5.1. MEDICIONES MANUALES	51
	3.5.1. MEDICIONES MANUALES	$-^{52}$
	3.5.2. COLAS DE VEHICULOS	52
	3.5.2. COLAS DE VEHÍCULOS 3.5.3. CONTEO MANUAL DE VEHÍCULOS 3.5.3.1. Conteo de Buses	$-\frac{54}{2}$
	<ul><li>3.5.3.1. Conteo de Buses</li><li>3.5.3.2. Conteo de vehículos que giran a la Calle Roca o en U desde la Av. 12 de Octubre _</li></ul>	54
	3.5.3.2. Conteo de vehículos que giran a la Calle Roca o en U desde la Av. 12 de Octubre	55
	3.5.3.3. Conteo de Vehículos que ingresan a la calle Roca	$-\frac{56}{2}$
	3.6. MEDICIONES AUTOMÁTICAS	$-\frac{56}{55}$
	3.6.1. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO 3.6.2. CONTEO AUTOMÁTICO DE VEHÍCULOS	$-\frac{57}{50}$
	3.6.2. CONTEO AUTOMATICO DE VEHICULOS	$-\frac{58}{50}$
	3.6.2.1. Av. 12 de Octubre sentido norte – sur	58
	3.6.2.2. Ingreso a la calle Roca	35
	3.6.2.4. Giro en U o a la calle Roca desde la Av. 12 de Octubre (sur - norte)	60
	3.6.3. MEDICIONES OBTENIDAS DE EMSAT [ 8]	
CAPÍ	TULO 4	69
SIMU	JLACIÓN, ANÁLISIS Y CONTROL	69
4.	SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR USANDO AIMSUN	
	4.1. CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR AIMSUN [2]	$-\frac{70}{21}$
	4.2. DATOS QUE REQUIERE EL SIMULADOR AIMSUN	$-\frac{71}{21}$
	4.2.1. DISPOSICIÓN DE LA RED	$-\frac{71}{21}$
	4.2.2. DATOS DE LA DEMANDA DE TRÁFICO	$-\frac{71}{72}$
	4.2.3. CONTROL DE TRÁFICO.	-72
	4.2.4. DETECTORES	$-\frac{12}{2}$
	4.2.5. TRANSPORTE PUBLICO	/3
	4.3. RESULTADOS DISPONIBLES	73
	12 DE OCTUBRE Y CALLE ROCA	74
	4.4.1. EDICIÓN. 4.4.2. PLAN DE CONTROL.	-74
	4.4.2. PLAN DE CONTROL.  4.4.3. ESTADO DEL TRÁFICO Y DEMANDA DE TRÁFICO	$-\frac{76}{77}$
	4.4.5. ESTADO DEL TRAFICO T DEMANDA DE TRAFICO	— //
	4.4.4 PLAN DE CONTROL MAESTRO	
		$-\frac{78}{78}$
	4.5. ANALSIS DE TRÁFICO VEHICULAR  4.6. VALIDACIÓN DEL SIMULADO USANDO ANÁLISIS ESTADISTICO  4.7. INDICES	$-\frac{78}{01}$
	4.0. VALIDACION DEL SINIULADO USANDO ANALISIS ESTADISTICO	ره ده
	4.7.1.1. Nivel de Servicio en tramos de carretera	
	4.7.1.2. Nivel de Servicio en tramos de carretera	
	4.7.1.2. INIVELUE SELVICIO ELI INICISECCIONES CONTIDIADAS DOI SEMATOLOS	00

	4.7.1.3.	Nivel de Servicio en intersecciones no señalizadas.	87
	4.7.1.4.	Nivel de Servicio en AIMSUN	90
4.8.	CON	TROL DE TRÁFICO VEHICULAR	90
	4.8.1.1.	Sistemas sin semaforización (pare y ceda el paso)	91
	4.8.1.2.	bisternus de cicio y luses de duración prefijada [2]	) =
	4.8.1.3.	Sistemas coordinados en "ondas verdes"	
	4.8.1.4.	Sistemas adaptables automáticamente a la demanda ("Actuated Control") [6]	
	4.8.1.5.	Sistemas semafóricos utilizando API.	
	4.8.2. DIR	ECCIÓN DE LOS CARRILES	100
	4.8.3. VEL	OCIDAD LÍMITE	100
САРІ́Т			
RESU	LTADOS	DE SIMULACIÓN	102
5.1.	PRI	EBAS Y RESULTADOS DE LAS ZONAS DE ESTUDIO	102
0.11	5.1.1. VAL	JDACIÓN	102
	5.1.2. ANÁ	LIDACIÓN	105
	5.1.2.1.	Determinación de las variables de control y de salida	105
	5.1.2.2.	Tiempo de Establecimiento	109
	5.1.3. Anál		
	5.1.3.1.	isis de Nivel de Servicio  Pruebas de Control utilizando el módulo API del AIMSUN  Pruebas de Control utilizando sistemas adantables a la demanda	112
	5.1.3.2.	Pruebas de Control utilizando sistemas adaptables a la demanda	115
	5.1.3.3.	Pruebas de Control utilizando sistemas adaptables a la demandaPruebas de Control utilizando sistemas coordinados "ondas verdes"	118
	5.1.3.4.	Pruebas de Control utilizando sistemas fases prefijadas.	122
САРІ́Т	TULO 6		124
CONC	CLUSION	ES Y RECOMENDACIONES	124
6.1.	CON	CLUSIONES	124
0.11		ÓTESIS	
	6.1.2. OBJ	ETIVO GENERAL	124
	6.1.3. OBJ	ETIVO ESPECIFICOS	125
	6.1.4. CON	ETIVO ESPECIFICOS	126
6.2.		OMENDACIONES	
REFE	RENCIAS	BIBLIOGRAFICAS	130
ו ומום	OGD A FÍ.	۸	122

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1. Descripción de los modelos	2
Figura 1.2. Sistema de Control de Tráfico Vehicular	
Figura 1.3. Flujo de Información para Control Realimentado	
Figura 1.4 Diagrama de bloque, del modelo de Car-following [9]	16
Figura 1.5 Modelo del Cambio de Carril o Lane Change [7]	
Figura 1.6 Zonas para el Cambio de Carril	19
Figura 1.7 Lógica del Modelo de Cambio de Carril en AIMSUN	21
Figura 2.1 Corrientes vehiculares en una vía de dos carriles	27
Figura 3.1. Bucle inductivo en utilización temporal y permanente	36
Figura 3.2. Tubos Neumáticos	
Figura 3.3 Sensores piezoeléctricos en ubicación temporal y fija	38
Figura 3.4. Esquema del sistema de clasificación desde 0 Km/h en función del número	
ejes	
Figura 3.5 Funcionamiento del sensor infrarrojo	
Figura 3.6. Sensor de ultrasonido y posibles ubicaciones del sensor en la vía	
Figura 3.7 Sensor a Microondas	41
Figura 3.8. Cámara para la detección de vehículos	
Figura 3.9 Cámara TrafiCam	
Figura 3.10. Componentes del Sistema TrafiCam	
Figura 3.11. Configuración de Zonas en el parqueadero de EPN	
Figura 3.12. DAQ NI USB-6008	
Figura 3.13. Interfaz de Labview	
Figura 3.14. Configuración de las zonas en la Av. 12 de Octubre y calle Roca	
Figura 3.15. Pruebas de laboratorio con el programa modificado	
Figura 3.16. Configuración carril sur-norte Av. 12 de Octubre	
Figura 3.17. Configuración carril norte-sur Av. 12 de Octubre	
Figura 3.18. Zona de Estudio	
Figura 3.19. Hardware para la adquisición de los datos de las cámaras	
Figura 3.20. Ubicación de las cámaras sobre el puente peatonal	
Figura 3.21. Configuración de las zonas utilizadas por las cámaras	
Figura 3.22 Porcentajes de Giro y Flujos en la zona EPN-PUCEFigura 3.23 Porcentajes de Giro y Flujos en la Av. Colón	
Figura 3.24 Porcentajes de Giro y Flujos en el redondel de las NNUU y Av. 10 de Ago	
rigura 3.24 Forcentajes de Giro y Frajos en erredonder de las NNOO y AV. To de Ago	
Figura 4.1 Mapa de Quito	
Figura 4.2 Secciones de la zona de estudio	
Figura 4.3 Creación de la Intersección	
Figura 4.4 Grupos Semafóricos de la intersección 12 de Octubre y Roca	
Figura 4.5 Estado del Tráfico	
Figura 4.6 Zona 1 Av. 12 de Octubre y Roca	
Figura 4.7 Zona 2 EPN – PUCE	
Figura 4.8 Zona 3. Av. Colón	
Figura 4.9 Zona 4 Redondel NNUU	
Figura 4.10 Nivel de Servicio para una vía de dos carriles	
Figura 4.11 Nivel de Servicio para vías multicarriles	
Figura 4.12 Nivel de Servicio para Autopistas	
Figura 4.13. Señal de "Pare" y "Ceda el Paso" en AlMSUN	
Figura 4.14 Semáforos en 2D y 3D	
Figura 4.15 Parámetros del Control Actuado	
Figura 4.16 Interacción entre AIMSUN y el modulo API de AIMSUN	
Figura 5.2 Zona 1 con el incidente generado	105

Figura 5.2 Máxima Longitud de Cola	106
Figura 5.4 Velocidad en la sección del incidente	106
Figura 5.5. Flujo Vehicular	107
Figura 5.6 Ocupación	107
Figura 5.7. Máxima Longitud de Cola con el doble de Flujo Vehicular	108
Figura 5.8. Tiempo de Demora	108
Figura 5.9 Máxima Longitud de Cola en la Zona 1	109
Figura 5.10 Velocidad en la Zona 1	109
Figura 5.11 Tiempo de Demora en la Zona 1	110
Figura 5.12 Incidente en la Zona 3 Intersección Av. Colón Y 9 de Octubre	110
Figura 5.13 Máxima Longitud de Cola en sección del incidente en la Zona 3	
Figura 5.14 Velocidad en la sección del incidente en la Zona 3	111
Figura 5.15 Tiempo de Demora en la sección del incidente en la Zona 3	112
Figura 5.16 Carga del archivo Caso3.dll en el Escenario de la Zona 3	
Figura 5.17 Máxima Longitud de Cola con Control Externo	
Figura 5.18 Tiempo de Demora con Control Externo	114
Figura 5.19 Nivel de Servicio con Control Externo	114
Figura 5.20 Máxima Longitud de Cola sentido E - O en la Av. Veintimilla	116
Figura 5.21 Máxima Longitud de Cola sentido O - E en la Av. Veintimilla	
Figura 5.22 Nivel de Servicio en la intersección	116
Figura 5.23 Diferentes alternativas de Control para mejorar el nivel de seguridad	117
Figura 5.24 Rutas creadas en la Zona 3 Av. Colón	119
Figura 5.25 Tiempo de Demora sentido O – E	119
Figura 5.26 Tiempo de Viaje sentido O – E	
Figura 5.27 Velocidad sentido O – E	120
Figura 5.28Tiempo de Demora sentido E – O	121
Figura 5.29 Tiempo de Viaje sentido E – O	121
Figura 5.30 Velocidad sentido E – O	
Figura 5.31 Zona 4 Con Incidente y fases originales (5)	
Figura 5.32 Zona 4 Con Incidente con modificaciones en las fases (6)	

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 3.1 Cola de vehículos formada en la Av. 12 de Octubre sentido norte-sur	53
<b>Tabla 3.2.</b> Cola de Vehículos Livianos y Buses en la Av. 12 de Octubre norte – sur	53
Tabla 3.3. Cola de vehículos en la Av. 12 de Octubre sur - norte que giran a la calle Roca o en	U54
Tabla 3.4. Número de Buses que circulan por la Av. 12 de Octubre	54
<b>Tabla 3.5.</b> Vehículos que giran a la calle Roca o en U desde la Av. 12 de Octubre carril sur – 1	
Tabla 3.6. Vehículos que ingresan a la Calle Roca	56
Tabla 3.7. Vehículos que circulan por la Av. 12 de Octubre en sentido norte-sur	59
Tabla 3.8. Vehículos que ingresan a la calle Roca.	59
<b>Tabla 3.9.</b> Vehículos que circulan por la Av. 12 de Octubre en sentido sur – norte	60
Tabla 3.10. Vehículos que giran en U o hacia la calle Roca desde la Av. 12 de Octubre (S-N)	61
Tabla 3.11 Datos de flujo vehicular en la intersección Av. 10 de Agosto y Naciones Unidas	62
Tabla 3.12 Datos de flujo vehicular en la intersección Av. 10 de Agosto y Colón	62
Tabla 3.13 Datos de flujo vehicular en la intersección Av. 10 de Agosto y Av. 6 de Diciembre	62
Tabla 3.14 Intersección: Av. Colón y Av. 6 de Diciembre	63
Tabla 3.15 Intersección: Av. Colón - Yánez Pinzón y Av. Colón - Urbina	63
Tabla 3.16 Intersección: Av. Colón y Diego de Almagro	63
Tabla 3.17 Intersección: Av. Colón y Reina Victoria.	63
Tabla 3.18 Intersección: Av. Colón y Rábida	64
Tabla 3.20 Intersección: Av. Colón y Amazonas	64
Tabla 3.21 Intersección: Av. Colón y 9 de Octubre	64
Tabla 3.22 Intersección: Av. Colón y Av. 10 de Agosto	65
Tabla 3.23 Esquina: Av. 10 de Agosto (Sur) y Naciones Unidas (Este)	65
Tabla 3.24 Esquina: Naciones Unidas (Este) y Av. 10 de Agosto (Norte)	65
Tabla 3.25 Esquina: Av. 10 de Agosto (Norte) y Naciones Unidas (Oeste)	65
Tabla 3.26 Esquina: Av. 10 de Agosto (Sur) y Naciones Unidas (Oeste)	66
Tabla 4.1 Duración de las fases	77
Tabla 4.2 Parámetros que determinan los niveles de servicios en HCM-2000	83
Tabla 4.3 Descripción de los niveles de servicio para intersecciones controladas con semáforo	89
Tabla 4.4 Descripción de los niveles de servicio para intersecciones con prioridad de "pare"	89
Tabla 4.5 Valores de variables para definición de indicadores de Nivel de Servicio	90
Tabla 5.1 Resultados de Validación de la Zona 1	104
Tabla 5.2 Valores Promedios	115

Tabla 5.3 Valores Promedios	115
Tabla 5.4 Tiempos de Viaje y Distancias en la Zona 3	118
Tabla 5.5 Valores promedios de la Ruta O – E	120
Tabla 5.6 Valores promedios de la Ruta E – O	121

### RESUMEN

En esta tesis se realizar el análisis dinámico y de nivel de servicio de tráfico vehicular, mediante simulación, también se plantean estrategias de control bajo diferentes condiciones de circulación en zonas suficientemente representativas, conflictivas de la ciudad de Quito, que permitan realizar un estudio didáctico.

Para realizar el análisis de las zonas críticas se recolecto datos de aforo en las diferentes zonas de estudio, la mediciones se realizaron utilizando tecnología de última generación, como cámaras con sensores de presencia (TrafiCam).

El Simulador de Tráfico Vehicular, también de última generación AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), se utiliza para generar la red vial de las zonas de estudio y crear el modelo de simulación, se alimenta con los datos medidos de aforo, señalización vertical (señal de pare) y la semaforización (número de fases, tiempos de ciclo).

Utilizando diferentes estrategias de control se aplican a las zonas de estudio para mejorar la calidad de nivel de servicio mejorando tiempos de demora, velocidad y reduciendo la longitud de cola, entre las alternativas probadas se tiene, sistemas de semaforización tipo ondas (control de lazo abierto), sistemas de semaforzación actuados (control de lazo cerrado) y sistemas de semaforización externo utilizando el modulo API (*Application Program Interface*) de AIMSUN, entre otros.

### **PRESENTACIÓN**

El trabajo desarrolla una metodología que permita realizar el análisis dinámico de tráfico vehicular y la calidad de nivel de servicio, mediante simulación para implementar estrategias de control en las zonas de estudio que permitan mejorar la calidad de nivel de servicio.

En consecuencia en el primer capítulo se analiza el problema de tráfico vehicular, la capacidad que tiene la simulación para reproducir el tráfico vehicular, el problema de control de este sistema también se aborda en este capítulo, también se establecen cuales son los objetivos de la tesis, por último se analiza el estado del arte en la línea de los modelos que se utilizan en el simulador.

En el capítulo dos se establecen los conceptos necesarios para desarrollar el análisis, simulación y control de tráfico vehicular.

Una vez que se han establecidos los conceptos necesarios se describe el proceso que se realizó para obtener mediciones de aforo para alimentar y validar el modelo, como también para establecer índices de calidad de servicio en el capítulo tres.

La simulación es la herramienta necesaria para realizar este trabajo porque no se puede trabajar directamente en el escenario real, de ahí que en el capítulo cuatro se analizan las potencialidades del simulador profesional utilizado AIMSUN, también se describe el análisis de trafico vehicular, y se establecen los conceptos de nivel de servicio y cuales son los parámetros adecuados para establecer este índice, por ultimo se describen las diferentes alternativas de control y algoritmos utilizados para realizar el control de tráfico vehicular.

En el capitulo cinco se presentan los resultados obtenidos en la validación, la determinación de las variables que se utilizan para el control, y por ultimo se observan los diferentes resultados obtenidos con las alternativas de control en las diferentes zonas.

Por ultimo en el capitulo seis están las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la tesis como las recomendaciones para realizar trabajos futuros.

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1.PROBLEMA DEL TRÁFICO VEHICULAR

Un sistema de tráfico es una mezcla de entes biológicos (conductores, peatones) y no biológicos (vehículos, vías). Su complejidad de éste dependerá esencialmente del tamaño del mismo, lo cual no significa, que una ciudad pequeña o una simple carretera representen una situación trivial. De hecho un solo vehículo moviéndose a través de una secuencia de semáforos genera un comportamiento caótico.

El comportamiento de los peatones y conductores es parte primordial del sistema de ahí que es necesario estudiarlo y analizarlo para poder controlarlos y guiarlos adecuadamente dentro del sistema de tráfico vehicular.

En casi todas las ciudades el mundo, se ha producido un incremento importante del parque automotor, por lo que este incremento se ha vuelto un elemento importante para el problema de tráfico vehicular, dentro de este crecimiento, es el automóvil es el que mayor incremento ha presentado, ya que ofrece la comodidad de movilizar personas de puerta a puerta, desafortunadamente esto contribuye a la congestión, contaminación y accidentes que se tienen hoy en día en el sistema de tráfico vehicular.

El último elemento primordial es la red vial debido a que la geometría de ésta interviene directamente en la calidad del sistema de tráfico vehicular, una red vial está compuesta por autopistas, calles e intersecciones. Estas últimas son puntos críticos donde se genera la congestión vehicular; de ahí que en ésta tesis se trabajará en intersecciones señalizadas y no señalizadas, en éstas últimas los conductores son los que deciden cuando es seguro ingresar a la intersección para evitar un accidente. Las intersecciones señalizadas permiten realizar acciones de

control de manera automática basada en la lectura de sensores que son colocados en las intersecciones.

Las estrategias de control que se realizan en esta tesis se implementan con la ayuda de un simulador de tráfico vehicular, por lo que es necesario estudiar los diferentes modelos que simulan el sistema de tráfico vehicular, tanto como el comportamiento de los conductores, como las interacciones que tiene cada vehículo en la carretera. Los modelos de tráfico creados hasta el momento cumplen con una serie de características que sirven para poder diferenciarlos unos de otros, que se han generalizado y son de uso común.

Un *modelo de tráfico microscópico* describe el comportamiento de conductores y vehículos de forma individual. Un *modelo submicroscópico* describe el mismo comportamiento de un modelo microscópico y añade al modelo mayor especificación, especialmente sobre el automóvil. En los *modelos mesoscópicos* se estudian los autos por grupos, se clasifican de acuerdo a sus velocidades y se obtienen tipos de autos que se pueden estudiar de manera individual. Un *modelo macroscópico* asume que el comportamiento de los conductores depende de las condiciones del tráfico y estudia el comportamiento de los autos a gran escala. El conjunto más grande es el macroscópico, en el se encuentran contenidos los demás modelos. El siguiente, es el modelo mesoscópico. Después, está el modelo microscópico donde se encuentra contenido el submicroscópico. En la Figura 1.1., se observa esta descripción planteada González J. et. All [1].

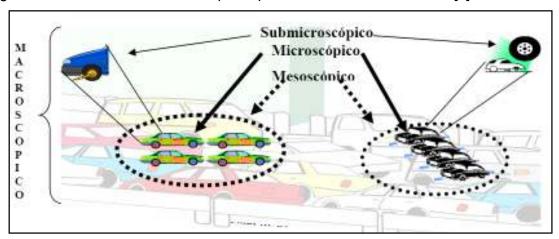


Figura 1.1. Descripción de los modelos

### 1.2.SIMULACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS

Los modelos microscópicos de simulación de tráfico o micro simuladores de tráfico, constituyen en la actualidad la herramienta más avanzada de representación de la circulación vehicular en una red de transporte. Basados en la Teoría de Seguimiento Vehicular desarrollada en la década de 1950, permiten, gracias a las actuales potencialidades computacionales, reproducir en detalle los comportamientos individuales de los vehículos.

Los micro simuladores de tráfico se utilizan en la actualidad en la planificación del tráfico, así como para evaluar sistemas de transporte inteligentes o ITS (*Intelligent Transportation Systems*). Prácticamente cada grupo de investigación de tráfico en el mundo ha desarrollado o adaptado su propio software, como lo manifiesta Fernández R. et all, 2006 [2]. Sin embargo, la mayoría de éstos están orientados a modelar el comportamiento de los automóviles. En ellos, los vehículos de transporte público son incorporados en forma complementaria, como una forma de hacer más realista la interacción entre automóviles y buses durante el uso compartido de vías, pero siempre considerando al automóvil como centro del análisis. Los pasajeros de transporte público no tienen identidad propia y, por ende, no pueden considerarse como parte de la evaluación de un proyecto estudiado con micro simulación.

El micro simulador de tráfico que se usará en este proyecto es **AIMSUN NG**, el cual reproduce el flujo de tráfico modelando la conducta de cada vehículo y las diferentes interacciones que se dan entre los vehículos en la red vial.

AIMSUN NG es una herramienta capaz de crear un modelo realista del sistema de tráfico vehicular, para ello es necesario generar la topología de la red con sus características y alimentar al modelo de simulación con toda la información requerida acerca de la demanda de tráfico, las señales de tránsito existente en la red. AIMSUN NG considera el comportamiento de cada vehículo con sus características individuales y todos los elementos de la red representada afecta al comportamiento de los vehículos: pendientes, semáforos, señales, paradas de

autobuses, etc. Esto crea una simulación virtual de la realidad usando animación similar a la de los videojuegos y permite realizar un completo análisis y percibir la situación de tráfico de una forma rápida.

La riqueza de parámetros disponibles para caracterizar los diferentes elementos y condiciones del tráfico, hace que la única limitación del modelo sea la cantidad y precisión de los datos recogidos.

Los resultados pueden ser observados por una serie de informes numéricos y gráficos que proporciona el software, este conjunto de salidas alfanuméricas y gráficas tras la ejecución de la simulación, son: flujos, velocidades, tiempo de viaje, colas máximas, colas medias, densidad por carril. Estas salidas diversas se pueden obtener dependiendo del elemento de la red de ahí que podemos tener salidas dependiendo si es en una sección, intersección, etc.

Con la ayuda del AIMSUN NG, se realizan simulaciones en diferentes zonas de la ciudad de Quito: Av. 12 de Octubre y Calle Roca, Av. Naciones Unidas y Av. 10 de Agosto y la Av. Colón entre la Av.6 de Diciembre y Av. 10 de Agosto, se escogieron estas zonas por ser suficientemente representativas y tienen complejidad tanto en la geometría de la red vial como en la congestión vehicular que permitirán enriquecer el estudio realizado.

Para alimentar los modelos de las diferentes zonas de estudio se utiliza mediciones que se realizaron con la ayudad de cámaras TRAFICAM que han sido desarrolladas especialmente para este propósito por la compañía Traficon y con un software desarrollado en Labview para la adquisición de los datos entregados por las cámaras, además de utilizar información entregada por la Empresa Metropolitana de Servicio y Administración del Trasporte EMSAT; y, mediciones manuales realizadas con personal de la Escuela Politécnica Nacional.

### 1.3.PROBLEMA DE CONTROL

La necesidad de transporte ha incrementado la congestión en las ciudades del mundo, durante las horas pico de la mañana o de la tarde se puede observar que en ciertos puntos de la red vial de la ciudad se tiene congestión, la cual produce costos a la sociedad en varios niveles (por ejemplo: retraso en el arribo de los empleados, incremento en el consumo de combustible el cual afecta al medio ambiente y a la economía de la sociedad) y una reducción de la productividad debido a que se producen retrasos en la entrega de servicios y equipos. También afecta a la vida diaria de muchas personas provocando en ellas estrés y forzando a las personas a cambiar su conducta de viaje.

Existen diferentes estrategias que se pueden utilizar para aliviar el problema del tráfico vehicular, como la construcción de nuevas carreteras o eliminar ciertos elementos de las vías que provocan congestión, como son los redondeles. La desventaja de esta estrategia es el alto costo que tiene, además de generar congestión en otros nodos.

Otra alternativa es estimular el uso del transporte público, para lo cual es necesario hacerlo eficiente y rápido, lo que implica un alto costo.

Por último una de las alternativas que han surgido gracias a las mejoras de la tecnología es el uso de sistemas inteligentes de tráfico vehicular (ITS), los cuales son una combinación de las telecomunicaciones, tecnologías computacionales y el control.

Debido a la existencia de esta última alternativa en este trabajo se estudia al Sistema de Tráfico Vehicular desde el punto de vista del Control Automático. En la figura 1.2., se observa el Sistema de Tráfico en lazo cerrado, que consta de una planta que sería el Sistema de Tráfico, de sensores (lazos inductivos, cámaras etc.) que reciben la información de parámetros del tráfico, de un controlador (planes de control, control actuado, control externo o en general un algoritmo) y de un actuador (semáforos) que permita o no circular a los vehículos.

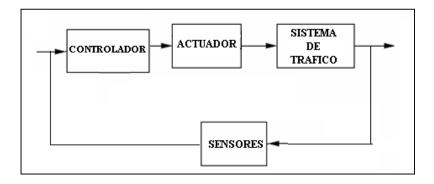


Figura 1.2. Sistema de Control de Tráfico Vehicular

En este trabajo se utiliza el sistema de control en lazo abierto el cual consta del controlador, actuador y el Sistema de Tráfico Vehicular, la estrategia de control que se utiliza en este sistema es los planes de control que establecen tiempos fijos en las fases de los semáforos sin considerar las condiciones del tráfico en la intersección.

Para el sistema en lazo cerrado se utiliza los sensores que existen en el micro simulador, estos permitirán realizar la realimentación del sistema para tomar las acciones de control considerando las situaciones de tráfico existente en la intersección. Las estrategias de control que se utilizan son, planes de control actuados los cuales están implementados en el micro simulador, además de acciones de control externas mediante la ayuda del API de AIMSUN que permite realizar una interacción del simulador con otros programas en los que se puede desarrollar las estrategias de control. En la figura 1.3 se observa el flujo de los datos que permite el API de AIMSUN, esta herramienta del simulador permite obtener datos internos en cada paso de simulación y proporciona el control de los elementos del simulador.

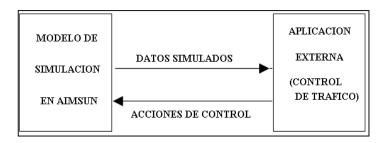


Figura 1.3. Flujo de Información para Control Realimentado

### 1.4.OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo general de esta tesis es el de realizar el análisis dinámico y de nivel de servicio de tráfico vehicular en zonas representativas y conflictivas de la ciudad de Quito (zonas críticas) y proponer estrategias de control para mejorar la calidad de servicio, mediante simulación.

En consecuencia lo primero que se hace es familiarizarse con el problema del comportamiento dinámico del tráfico vehicular, luego la utilización de un simulador profesional como lo es el AIMSUN para finalmente abordar el aspecto fundamental del problema del control de tráfico vehicular. Estos últimos aspectos corresponden a los objetivos específicos, junto con la selección de zonas críticas y la medición de flujo vehicular utilizando tecnologías de última generación.

Estos objetivos se formularon porque el Departamento de Automatización y Control Industrial, respondiendo a una necesidad del Distrito Metropolitano, de mejorar la calidad del servicio, planteó una línea de investigación, auspiciada por la SENACYT, de la cual es parte esta tesis, para afrontar los problemas de comportamiento dinámico, nivel de servicio y estrategias de control, que constituyen el aporte de esta tesis y que competen a la Escuela Politécnica Nacional a través de su Departamento de Automatización y Control Industrial.

Existen otras instituciones como la EMSAT que se dedica a la planificación de trasporte en base a la demanda, ejecutando planes maestros de señalización, administración y mejoramiento de la red vial, en particular de los corredores viales del Trolebús, Ecovia, Metrovia. La Dirección Nacional de Tránsito que se encarga de Planificar, organizar, dirigir, ejecutar, controlar y coordinar las actividades de tránsito y transporte terrestre en el Ecuador, mediante la ejecución campañas de operación y prevención.

Instituciones privadas, en particular universitarias, como el Postgrado de Transporte de la PUCE orientadas a la Arquitectura y a la Ingeniería Civil realizan

actividades en el área de planificación del transporte planificación de carreteras, considerando la geometría de la red vial y demanda de transporte.

En la Escuela Politécnica Nacional, en el Departamento de Matemática se realiza investigación a través de doctorados orientados al transporte público, ruteo y optimización, utilizando flujo vehicular para definir funciones de costo. El Centro de Transferencia Tecnológica para Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares se ocupa de realizar investigación y aplicaciones tecnológicas para contaminación ambiental debida al transporte vehicular, mediante el estudio del comportamiento de estratos poblacionales y la calidad de los vehículos.

Como se puede apreciar existe un vacío significativamente importante en modelación, simulación, análisis y control de trafico vehicular. Los sistemas de gerencia y operación avanzados de tráfico vehicular tienen que ver con los conceptos de lazo y estrategias de control que corresponden a la teoría de control automático.

Por ultimo las mejoras de la tecnología hacen uso de sistemas inteligentes de tráfico vehicular (ITS), los cuales son una combinación de las telecomunicaciones, tecnologías computacionales y el control.

Esta es la motivación fundamental de llenar el vacío existente en nuevas estrategias de control, como Departamento de Automatización y Control, como un paso intermedio para llegar a los Sistemas Inteligentes de Tráfico Vehicular.

# 1.5.MODELOS DE TRÁFICO VEHICULAR [3]

En la actualidad existe una gran cantidad de modelos, de ahí que existe una variedad de maneras de clasificarlos en base a sus propiedades. A continuación se presenta una clasificación de los modelos de tráfico vehicular desde el punto de vista de la ingeniería en control.

- Interpretación física
- Determinístico versus Estocástico
- Discreto versus Continuo
- Nivel de detalle

#### 1.5.1.INTERPRETACIÓN FÍSICA

De acuerdo con la teoría de Control existen tres maneras para modelar los sistemas, mediante caja blanca, caja negra y caja gris. Cada uno de los tipos de modelado orientado a tráfico vehicular se presenta a continuación:

### Modelo de Caja Banca o Método Deductivo

En el modelo de caja blanca o método deductivo las ecuaciones físicas describen las relaciones entre los diferentes estados del sistema de tráfico. Las relaciones entre los estados del sistema son descritas por las propiedades que pueden ser medidas.

### Modelo de Caja Negra o Método Inductivo[3]

Para el modelo de caja negra, los datos de entrada y de salida del sistema son registrados y se encuentra el modelo ajustando parámetros para cumplir con los datos de entrada y salida (identificación de sistemas); por ejemplo redes neuronales. Para un sistema de tráfico, los datos de entrada y de salida son típicamente los flujos de tráfico, la densidad de tráfico y las velocidades. Con el método de caja negra no hay en general ninguna relación directa física entre la situación de tráfico y la estructura modelada. Un ejemplo de modelado de tráfico de caja negra es el uso de redes neuronales entrenadas para imitar el comportamiento del sistema de tráfico, por ejemplo, el modelo de la densidad futura de tráfico como una función de la densidad, medida velocidad y los flujos medidos.

### Modelo de Caja Gris

Finalmente, un método intermedio entre el modelo de caja negra y el modelo de caja blanca puede ser señalado. Este método se lo conoce como el modelo de

caja gris, y es una combinación del método inductivo y deductivo. En la fase deductiva, las ecuaciones relacionan los estados del sistema, estas ecuaciones tienen parámetros que necesitan se determinados en la siguiente fase. En la fase inductiva, los parámetros son determinados por la relación de entrada salida del modelo de tráfico.

Ejemplos de estos tipos de modelos son el modelo de flujo de tráfico vehicular de primer orden de Lighthill, Whitham y Richards y los modelos de flujo de tráfico de segundo orden propuestos por Payne y Papageorgiou como se menciona en Hoogendoorn y Bovy [3]. Las ecuaciones de estos modelos tienen una interpretación física, pero contienen parámetros que deben ser determinados usando datos de entrada salida del sistema de tráfico.

### 1.5.2. DETERMINISTICOS VERSUS ESTOCÁSTICOS [3,4]

En un modelo de tráfico determinístico hay una relación determinística entre la entrada, los estados de tráfico y la salida del modelo. Si una situación de tráfico es simulada dos veces usando un modelo determinístico, comenzando con las mismas condiciones iniciales, con las mismas entradas, las salidas de ambas simulaciones son las mismas.

Un modelo de tráfico estocástico contiene al menos una variable estocástica. Esto implica que dos simulaciones del mismo modelo que comienza de las mismas condiciones iniciales y las mismas entradas pueden entregar resultados diferentes, dependiendo del valor de la variable estocástica durante cada simulación. Una variable estocástica puede ser caracterizada por su función de distribución o por su histograma. Por ejemplo, en la simulación microscópica, una distribución del nivel de paciencia sobre conductores tiene que ser definida. Durante la simulación, esta distribución es probada para determinar un nivel individual de paciencia para cada conductor simulado en la red. Una segunda simulación, y así una nueva aplicación de la distribución causarán en los conductores otros niveles de paciencia. Por lo tanto, modelos estocásticos tienen que ser simulados repetidamente y los resultados tienen que ser un promedio

para poder llegar a una conclusión. Las variables estocásticas son usadas para modelar situaciones de tráfico verdaderas.

#### 1.5.3. DISCRETO VERSUS CONTINUO

Un modelo de tráfico vehicular describe la evolución del estado de la red de tráfico con el tiempo. Hay dos variables independientes en un modelo de tráfico vehicular, el espacio y el tiempo. Dependiendo del tipo de modelo, estas variables independientes pueden ser continuas o discretas.

Los modelos de tráfico vehicular continuos, para situaciones de la vida real en general son demasiado complicados para encontrar una solución analítica, sobre todo si el tamaño de la red de tráfico vehicular es grande. En la práctica la discretización en el tiempo y en el espacio se utiliza para simular el comportamiento de tráfico en computador.

#### 1.5.4. NIVEL DE DETALLE

Los modelos de tráfico pueden ser clasificados según el nivel de detalle con el cual se representan a los sistemas de tráfico vehicular. Esta clasificación puede considerarse operacional debido a las entidades de tráfico y el nivel de descripción de estas entidades en los modelos de flujo respectivos. Se propone la siguiente clasificación:

#### 1.5.4.1. Modelo macroscópico [3,4]

Los modelos macroscópicos se enfocan en captar las relaciones globales del flujo de tráfico, tales como velocidad de los vehículos, flujo vehicular y densidad de tráfico. Por su naturaleza, son modelos continuos, que hacen uso extensivo de ecuaciones diferenciales. Incluye a los modelos de gases cinéticos y los hidrodinámicos. Dentro de los modelos macroscópicos existen modelos puramente empíricos, denominados modelos de capacidad y nivel de servicio, que renuncian al planteamiento preciso de ecuaciones diferenciales y se limitan a establecer relaciones empíricas entre las principales variables bajo control del diseñador.

A estos modelos se los puede clasificar de acuerdo al orden del modelo desarrollado.

Un modelo de flujo de tráfico de primer orden propuesto por Lighthill y Whitham en 1955 y por separado por Richards en 1956, como se menciona en Hoogendoorn y Bovy [3] está basado en la analogía de flujos de tráfico con los flujos de fluidos, la variable que se utiliza para describir este modelo es la densidad de tráfico.

El modelo descrito por Payne en 1971 [3,4] es un modelo de flujo vehicular de segundo orden ya que este usa dos variables de estado de tráfico: la densidad de tráfico y velocidad media.

Helbing [3,4] propuso un modelo de tercer orden, este modelo de tráfico utiliza la densidad de tráfico, velocidad media y la variación de la velocidad como variable de estado.

Ya que los modelos de tráfico macroscópico sólo trabajan con variables que describen el comportamiento de una sección (calle, avenida) y no la situación de tráfico a nivel de vehículos independientes o a un nivel de conjunto de vehículos, resultan más generales y computacionalmente menos intensivos que los microscópicos o los modelos mesoscópicos.

### 1.5.4.2. Modelo mesoscópico [3,4]

Los modelos mesoscópicos de tráfico vehicular describen al tráfico en un nivel medio de detalle. En vez de modelar cada vehículo individualmente, este modelo describe a los vehículos sobre un nivel más agregado usando funciones de distribución de probabilidad. Sin embargo, las reglas de comportamiento son descritas en un nivel individual. Por ejemplo, un modelo de gas cinético describe distribuciones de la velocidad en posiciones e instantes de tiempo específicos.

La dinámica de estas distribuciones generalmente es gobernada por varios procesos como la aceleración, la interacción entre vehículos o los cambio de carril; describiendo el comportamiento del conductor individualmente.

Existen diferentes tipos de modelos mesoscópicos como por ejemplo, los modelos de distribución de progreso (headway), modelos de tipo cluster y modelos de gas cinético. Los modelos de distribución de progreso describen la distribución del progreso de los vehículos individualmente. El progreso de tiempo de un vehículo es definido como el tiempo entre el vehículo y su precursor. Los modelos de distribución de progreso han sido criticados por descuidar el papel de dinámica de tráfico. Además, estos modelos asumen que todos los vehículos son esencialmente los mismos. Es decir las funciones de distribución de probabilidad son independientes del tipo de conductor, el tipo de vehículo, el objetivo de viaje, el nivel de la dirección de los conductores, etc.

Los modelos de tráfico vehicular tipo cluster describen grupos o clusters de vehículos con propiedades similares (la agresividad de conductor, la velocidad deseada, velocidad media, el tamaño del grupo, etc.).

Por lo general, los grupos de vehículos surgen debido a posibilidades de adelantamiento restringido debido a la prohibición de adelantamiento, o las interacciones de vehículos de distintas características, o debido al tiempo predominante o condiciones ambientales.

Modelos de gas cinéticos describen la dinámica de las funciones de distribución de la velocidad de los vehículos en el flujo de tráfico.

#### 1.5.4.3. Modelos Microscópicos

En los modelos microscópicos los vehículos son descritos individualmente, cada vehículo es modelado usando modelos que describen las interacciones entre los vehículos y la red vial. Los modelos microscópicos más importantes para describir estos comportamientos son: *Car- Following (siga al lider)*, *Lane Change (cambio de carril)*, *Gap Acceptance (aceptación del espacio)*.

Otros modelos microscópicos también pueden ser puestos en la práctica como los modelos de autómatas celulares. Un modelo de autómata celular describe a los sistemas de tráfico como una red de células interconectadas de igual tamaño,

típicamente de 7.5 m, en el cual se describe un juego de reglas que indican como y cuándo los vehículos saltan de una célula a otra. La velocidad del vehículo sólo puede asumir un número limitado de valores discretos en los límites del cero a  $v_{max}$ . [3]

El modelo de Car-following asume que existe una correlación entre los vehículos en un rango de distancia en la cual puede existir una interacción entre ellos. Normalmente el modelo de Car-following tiene una validez entre los 0 y 125 metros de distancia entre el líder y el que le sigue [7,8]

El modelado asume que cada conductor del vehículo siguiente es un elemento de control activo y fiable en el sistema conductor-vehículo-camino. Estas tareas son llamadas habilidades psicomotoras o habilidades motoras-perceptuales porque se requiere una respuesta motora continua a una serie continua de estímulos.

El hecho de conducir un vehículo en un solo carril puede ser categorizada en los siguientes aspectos:

- Percepción: El conductor adquiere información relevante del movimiento del vehículo que circula enfrente. Generalmente esta información es la velocidad, aceleración o desaceleración y la distancia entre los vehículos.
- Toma de decisiones: El conductor interpreta la información colectada y la transforma en un conjunto de acciones que debe tomar basándose adicionalmente en su vehículo y su experiencia como conductor.
- Control: El conductor 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 cómo 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 el conductor tiene varias funciones de transferencia dependiendo de las circunstancias.

En general, se ha llegado al consenso de que en el modelo de Car-following el conductor trata de:

- Mantenerse a una distancia prudente del vehículo enfrente.
- Evitar colisiones

Estas dos condiciones se pueden lograr si el conductor mantiene una pequeña velocidad relativa promedio en intervalos de tiempo cortos.

En general al conductor se lo representa de la manera más sencilla posible, una ganancia que relaciona su respuesta cuando recibe un estímulo. La forma en que se representa al conductor ha sido motivo de muchos estudios. Dentro de los más recientes constan los que al conductor se lo representa a través de agentes inteligentes, en los cuales se trata de incluir el factor humano [5,6]. Desde un punto de vista práctico, para fines de simulación, lo más recomendable como se dijo anteriormente es representar al conductor como:

#### Respuesta = $\lambda$ Estímulo

Dadas las condiciones del vehículo, la respuesta del conductor será su comando en la aceleración o desaceleración del vehículo, el estimulo su percepción de la velocidad relativa entre los dos vehículos y  $\lambda$  la sensibilidad, éste es un parámetro conductual que podría depender de la diferencia de velocidades y de la distancia entre los dos vehículos, tal manera que un modelo muy simple y muy utilizado de C*ar-following* se reduce a:

$$\ddot{x}_f(t+T) = \lambda \left[ \dot{x}_l(t) - \dot{x}_f(t) \right]$$

Donde:  $\dot{x}_l(t)$  y son las velocidades relativas a un punto de referencia tanto del vehículo líder y del que le sigue, T es el tiempo de respuesta del conductor

y  $\ddot{x}_f(t+T)$  es la aceleración del vehiculo siguiente. Un diagrama equivalente del modelo se presenta en la figura 1.4.

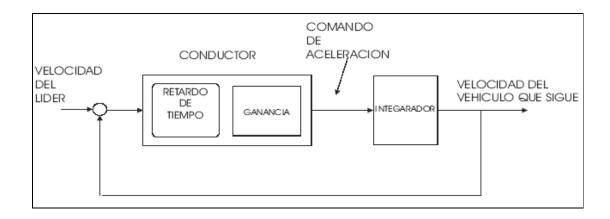


Figura 1.4 Diagrama de bloque, del modelo de Car-following [9].

El modelo de *Car-following* puesto en práctica en AIMSUN está basado en el modelo de Gipps[10,11]. En realidad puede ser considerado como un desarrollo ad hoc de este modelo empírico, en el cual los parámetros del modelo no son globales, pero determinados por la influencia de parámetros locales dependiendo del tipo de conductor, la aceptación de límite de velocidad, la geometría de la sección, la influencia de vehículos sobre los carriles adyacentes, etc.

Básicamente consiste en dos componentes: aceleración y desaceleración. El primero representa la intención de los vehículos de alcanzar una cierta velocidad deseada mientras el segundo reproduce las limitaciones impuestas por el vehículo precedente tratando de conducir en la velocidad deseada.

Este modelo declara que la velocidad máxima a la cual un vehículo puede acelerar durante un período de tiempo (t, t+T) esta dada por

$$V_a(n,t+T) = V(n,t) + 2.5 * a_n(t) * T * \left(1 - \frac{V(n,t)}{V^*(n)}\right) * \sqrt{0.025 + \frac{V(n,t)}{V^*(n)}}$$

Donde:

V(n,t+T)= Velocidad del vehículo n en el instante t

 $V^*(n)$  = Velocidad deseada del vehículo n en la sección actual

 $a_n(t)$  = Aceleración máxima para el vehículo n

T = Tiempo de reacción

Por otro lado, la velocidad máxima que el vehículo n puede alcanzar durante el intervalo de tiempo (t, t+T), según sus propias características y las limitaciones impuestas por la presencia del vehículo de líder (vehículo n-1) es:

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

Donde:

d(n) (<0) = máxima desaceleración deseada por el vehículo n

x(n,t) = Posición del vehículo n en el instante t

x(n-1,t) = Posición del vehículo predecesor en el instante t

s(n-1) = Longitud efectiva del vehículo predecesor

d'(n-1) = Estimación de la desaceleración deseada por el vehículo n-1

En cualquier caso, la velocidad definitiva para el vehículo n durante el intervalo de tiempo es el mínimo entre las velocidades antes definidas.

$$V(n,t+T) = \min(V_a(n,t+T),V_b(n,t+T))$$

La posición del vehículo n en el carril es calculada considerando la velocidad resultante en la siguiente ecuación de movimiento:

$$x(n,t+T) = x(n,t) + V(n,t+T) * T$$

### 1.5.4.3.2. Lane Change (Cambio de Carril)

Lane Change modela el proceso de decisión que existe para realizar el cambio de carril, analizando la necesidad, la conveniencia y las condiciones de viabilidad para realizar dicho cambio, dependiendo de la posición o ubicación del vehículo en la red vial. Este modelo se desarrolló para poder cubrir varias situaciones de tráfico cuando existe, señales de tránsito, obstrucciones, presencia de carros pesados, o si se desea una velocidad mayor a la del vehículo líder, las cuales afectan a la decisión de un cambio de carril.

El cambio de carril es considerado factible si hay un espacio de tamaño suficiente en el carril de modo que el vehículo pueda moverse a éste de manera segura, sin forzar a otros vehículos que circulan por este carril a reducir la velocidad considerablemente. Las maniobras para realizar el cambio de carril también pueden ser realizadas en condiciones de congestión vehicular (por ejemplo en un accidente) siendo este un cambio de carril forzado

Modelar el comportamiento de cambio de carril es complejo ya que en realidad incluye tres partes: la necesidad de cambio de carril, la posibilidad para cambio, y la trayectoria para el cambio de carril. Cada parte es importante para conseguir un modelo realista. Además, este modelo tiene que considerar no sólo el vehículo que tiene en frente, sino también los vehículos que se encuentren cerca de este, como también la información del flujo de tráfico. Hay una posibilidad de causar incidentes cuando el vehículo realiza el cambio de carril ya que varios vehículos están implicados en este movimiento. Por lo que el modelado del comportamiento de conductor en el cambio de carril se hace difícil y son muchas las consideraciones que se deben realizar para construir un modelo realista y confiable

El cambio de carril en la micro simulación de tráfico puede ser clarificada en dos categorías: obligatorio y discrecional. La figura 1.5 muestra el modelo típico para el cambio de carril.

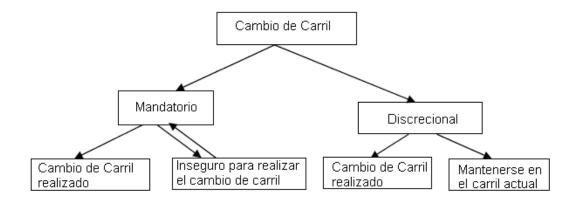


Figura 1.5 Modelo del Cambio de Carril o Lane Change [7]

En el micro simulador de AIMSUN [11] para alcanzar una representación más exacta del comportamiento del conductor en el proceso de decisión de cambio de carril, se definen tres zonas dentro de las secciones (calles, avenidas) que pueden observarse en la figura 1.6.

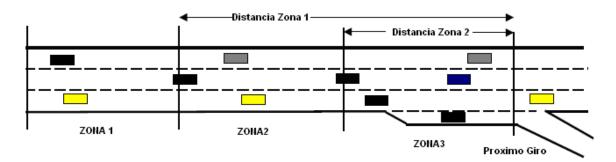


Figura 1.6 Zonas para el Cambio de Carril

Zona 1: Esta definida por la distancia más alejada del siguiente punto de giro. La decisión del realizar el cambio de carril esta determinada por las condiciones de tráfico en el carril de destino. La viabilidad del realizar el cambio de carril no se considera aún en esta zona. Para medir la posibilidad de realizar el cambio de carril se considera varios parámetros: la velocidad deseada de conductor, la velocidad y la distancia actual del vehículo precedente, la velocidad y la distancia futura del vehículo precedente en el carril de destino

Zona 2: Es la zona intermedia, en esta zona de considera el carril que afecta a la

decisión de realizar el giro. Los vehículos que no conducen en carriles válidos (p.

ej. carriles donde el cambio de carril puede ser realizado) tienden a estar más

cercanos al lado correcto del camino que permite realizar el cambio de carril. Los

vehículos buscan un espacio y tratar de adaptarse a él, pero no afectan en el

comportamiento de los vehículos en los carriles adyacentes

Zona 3: En esta zona la distancia es la más corta al punto de giro. Los vehículos

son forzados a alcanzar sus carriles deseados, reduciendo la velocidad si fuera

necesario e incluso realizando una parada completa para hacer posible el cambio.

También, los vehículos en el carril adyacente pueden modificar su

comportamiento para proporcionar un espacio bastante grande para que el

vehículo pueda tener éxito en el cambio de carril.

El cambio de carril de zonas ésta definida por dos parámetros, la distancia zona 1

y la distancia zona 2. Estos parámetros son definidos en el tiempo (segundos) y

luego son convertidos en la distancia siempre que lo requiera un vehículo i en

cada sección s usando la siguiente ecuación:

$$D_m = D_t * S_{\lim it}(s) * \left[ \frac{S_{\lim it}(s)}{v_{\max}(i,s)} \right]$$

Donde:

 $D_m$ : Distancia en metros

Dt: Distancia en segundos

S<sub>lim it</sub>: Limite de velocidad de la sección s

 $V_{\text{max}}(i,s)$ : Velocidad máxima deseada por el vehículo i en la sección de giro

S

Esta función asegura que vehículos más rápidos (que circulan en el límite de

velocidad) tengan zonas más pequeñas en comparación con los vehículos más

lentos. Este procedimiento también proporciona que no todos los vehículos van a

20

tener exactamente las mismas longitudes de zona, dando así más variabilidad al comportamiento del vehículo, lo cual proporciona un modelo más realista.

En la figura 1.7 se muestra una descripción del modelo. El sistema identifica el tipo de entidad (carril central, salida de una autopista o vía por medio de una rampa, entrada a una rampa) en el cual la maniobra debe ser realizada, y luego determina cómo el modelo de la zona debe ser aplicado. Las condiciones de tráfico en ese instante son analizadas, y el nivel en el cual el cambio de carril puede ser realizado también se determina, para que luego el modelo correspondiente sea aplicado [11]

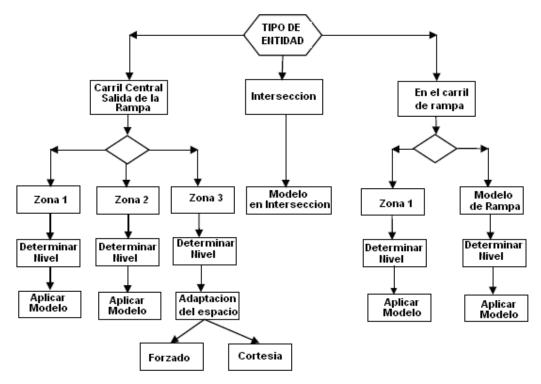


Figura 1.7 Lógica del Modelo de Cambio de Carril en AlMSUN

### 1.5.4.3.3. Gap Acceptance (Aceptación del Espacio)

La aceptación del espacio (*Gap Acceptance*) es un elemento importante en la mayoría de los modelos de cambio de carril. Para realizar un cambio de carril, el conductor evalúa las posiciones y las velocidades del líder y después de los vehículos en el carril de destino y decide si el espacio entre ellos es suficiente

para ejecutar el cambio de carril. Los modelos de Gap Acceptance son formulados como problemas binarios de selección, en los cuales los conductores deciden si hay que aceptar o rechazar el espacio disponible comparándolo al espacio crítico (el espacio mínimo aceptable). Los espacios críticos son modelados como variables aleatorias para capturar la variación en el comportamiento de los conductores y para el mismo conductor con el tiempo

La figura 1.8 muestra que existen dos espacios: el espacio de retraso (espacio entre vehículo siguiente y él que realiza el cambio de carril) y el espacio del líder (espacio entre el vehículo y el líder). El vehículo tiende a moverse de su carril actual al carril de destino, en el espacio entre los dos vehículos que viajan en el carril de destino: estos serán el líder y el vehículo siguiente del vehículo que realiza el cambio de carril cuando la maniobra es terminada. Cuando un conductor quiere hacer el cambio de carril, requiere que el espacio crítico de líder y el espacio de retraso deben se aceptables para el conductor del vehículo que realiza el cambio de carril. De otra manera, no es seguro realizar el cambio de carril.

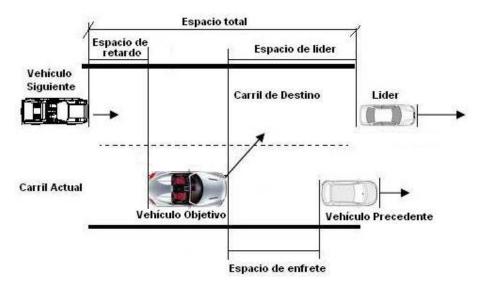


Figura 1.8 Modelo de aceptación del espacio

#### 1.5.4.3.4. Modelos Microscópicos de Simulación

En la actualidad la velocidad de procesamiento de las computadoras se ha incrementado lo cual ha provocado un desarrollo de modelos microscópicos de

simulación. En estos modelos se describe la conducta de los conductores mediante reglas *if – then*, como también las características de los vehículos, posición, velocidad y aceleración que son calculados para cada vehículo en cada instante de tiempo. Algunos de estos modelos de micro simulación son el AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), FOSIM (Freeway Operations SIMulation), PARAMICS, etc.

Ya que los modelos microscópicos describen cada vehículo individualmente, las simulaciones de tráfico microscópicas son a menudo computacionalmente intensivas

## CAPÍTULO 2

## TRÁFICO VEHICULAR

En este capítulo se describen los conceptos que son necesarios para desarrollar el trabajo de investigación y comprender adecuadamente los términos que luego se utilizan.

## 2.1. TRÁFICO VEHICULAR

#### 2.1.1.DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE TRÁFICO

La congestión vehicular dentro y fuera de las áreas urbanas en el mundo es un gran problema. La congestión durante las horas pico se extiende por periodos mas largos en el día y esto tiene efectos en la movilidad, seguridad y en la calidad del aire, lo cual tiene efectos económicos directos debido a los retrasos, accidentes y efectos económicos indirectos en el impacto ambiental. En la mayoría de los casos la capacidad existente no puede ser incrementada con la adición de carriles debido al espacio, recursos y a las implicaciones ambientales que conlleva esto.

Para solucionar en parte el problema de la congestión vehicular, se deben mejorar tanto las estrategias y operaciones de tráfico como también mejorar el diseño geométrico de la red vial, eliminando elementos de la red que provocan congestionamiento como los redondeles.

#### 2.1.1.1. Geometría de la red vial

La infraestructura de la red vial es uno de los patrimonios más valiosos que tiene un país, la calidad y la magnitud de ésta representa el grado de desarrollo que tiene su país.

La red vial tanto urbana como rural, se debe clasificar de manera que se puedan fijar funciones específicas a las diferentes carreteras y calles para poder atender las necesidades de movilidad de personas y mercancías, de manera rápida,

confortable y segura; además de cumplir con las necesidades de accesibilidad a las distintas propiedades o usos de áreas colindantes.

Para un sistema de red vial urbano se tiene la siguiente clasificación:

Autopistas y vías rápidas: son las que facilitan el movimiento expedito de grandes volúmenes de tránsito entre áreas a través o alrededor de la cuidad o de áreas urbanas. Se clasifican de acuerdo a si tienen control total de sus accesos o si no tienen comunicación directa con las propiedades colindantes.

Calles principales: son las que permiten el movimiento de tránsito entre áreas o partes de la ciudad, pueden tener control parcial de sus accesos, las calles principales se combinan entre sí para formar el sistema que mueve el tránsito en todas las direcciones dentro de la ciudad.

**Calles colectoras**: unen las calles principales con las calles locales y dan accesos a las propiedades colindantes.

Calles locales proporcionan acceso a las propiedades residenciales, comerciales, industriales o de algún otro uso, también ayudan al tránsito local.

#### **2.1.1.2.** Vehículos

Las interacciones del tráfico en las secciones de vía congestionadas son muy complejas, puesto que diversos conductores emplean diversas técnicas para viajar a través de estas secciones mientras que interactúan recíprocamente con otros conductores. Para entender el problema de los embotellamientos e idear las soluciones para estos, se requiere de un análisis detallado del vehículo y de las interacciones de éste con respecto a los demás. En la figura 2.1 se muestran dos corrientes vehiculares que circulan por una carretera de dos carriles.

En esta figura se presentan los cuatro estados en que un vehículo puede circular en una corriente vehicular continua: libre, restringido inicialmente, siguiendo a otro

vehículo y adelantando. Hay otro estado en el que no se circula cuando el vehículo está detenido. A continuación se describe brevemente cada uno de estos estados.

- Vehículo libre (L): es el vehículo que no está afectado por la presencia de otros vehículos y va a velocidad libre o a flujo libre. En vías de circulación continua se considera que un vehículo circula libremente cuando el tiempo entre los vehículos, según su espaciamiento, es mayor de cierto valor, o va creciendo. En vías de circulación discontinua, si no hay interacción vehicular, el vehículo puede circular libremente hasta que la regulación del tránsito lo oblique a parar o a aminorar su marcha.
- Vehículo restringido inicialmente (R): Es el vehículo que ha reducido su velocidad al acercarse a otro que va a menor velocidad que la que quiere su conductor u ocupantes, pero aún circula a mayor velocidad que el vehículo precedente.
- Vehículo siguiendo a otro vehículo (S): Esta es la continuación del estado anterior, cuando un vehículo que va detrás de otro más lento y no lo adelanta debe seguirlo más o menos a su misma velocidad para no chocar con él ni quedarse atrás.
- Vehículo adelantando (A): Es el estado, cuando un vehículo va realizando una maniobra de adelantamiento, mediante la cual se coloca delante del vehículo que iba siguiendo. Para ello debe aprovechar un claro en la fila de vehículos que circula por un carril adyacente en su mismo sentido o en sentido contrario.
- Vehículo detenido (D): Es un estado anormal, aunque no raro, en vías de circulación continua y normal en las de circulación discontinua. En las arterias urbanas, los vehículos detenidos constituyen un elemento muy importante del tránsito [1].

Los vehículos en grupos pueden circular formando un pelotón, caravana o columna esto es un conjunto de vehículos que se siguen unos a otros y que avanzan juntos por un carril. En la figura 2.1 se pueden identificar cuatro pelotones. El vehículo que encabeza el pelotón, que se conoce como cabeza de

pelotón, suele ser un vehículo libre, pero la velocidad deseada por su conductor es generalmente menor de la media de las velocidades deseadas por todos los conductores. A los espacios entre pelotones se les denomina claros.

Se entiende por cola, una hilera de vehículos detenidos o casi detenidos, mientras que el pelotón es una hilera de vehículos en movimiento. Un pelotón puede convertirse en cola y viceversa. Por ejemplo, los vehículos que están detenidos en un carril de acceso a una intersección semaforizada esperando la indicación del semáforo constituyen una cola y cuando se ponen en movimiento, uno detrás de otro, forman un pelotón. Luego, si se separan mucho se dispersa el pelotón.

Se llama simplemente fila a una hilera de vehículos que puede estar en movimiento, detenida o parcialmente detenida [1].

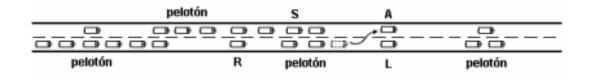


Figura 2.1 Corrientes vehiculares en una vía de dos carriles

En el desarrollo de las teorías del tráfico a un nivel microscópico, se describe a los vehículos de manera individual, cada vehículo es modelado describiendo las interacciones entre vehículos. Los modelos microscópicos que describen estas interacciones son *Car Following (Siga al Llider)* que describe como siguen los vehículos a sus predecesores *y Lane Change (Cambio de Carril)*, el cual describe cómo el conductor decide si acepta o no la apertura para realizar un cambio de carril [1].

#### 2.1.1.3. Flujo Vehicular

Para entender las características y el comportamiento del tránsito se debe realizar un análisis del flujo vehicular, el flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier red vial lo cual permite determinar el nivel de eficiencia.

El flujo vehicular se ha utilizado para desarrollar los modelos macroscópicos, la corriente de tránsito está representada con la tasa de flujo, densidad y velocidad; mediante la deducción de las relaciones que existen entre éstas variables se puede determinar las características de la corriente de tránsito. Las posibles unidades para estas variables son, *vehículos/km*, *vehículos/hr*, *km/hr*, respectivamente. Las herramientas que se usan para encontrar relaciones temporales y espaciales con la velocidad, la densidad y el flujo, son ecuaciones diferenciales parciales.

#### 2.1.1.4. Variables de Tráfico Vehicular

Las variables de tráfico que pueden ser medidas, observadas y que describen el estado del tráfico son:

- Tasa de flujo vehicular: esta variable se define cómo el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal fijo durante un cierto periodo de tiempo.
- Velocidad: esta variable se ha convertido en un indicador para medir la calidad de operación de una vía, para un vehículo la velocidad representa la relación de movimiento.
- Densidad: es el número de vehículos por unidad de longitud en un cierto instante de tiempo, la densidad puede variar de carril a carril, la densidad total en una vía es la suma de las densidades que existe en cada carril.
- Nivel de Ocupación: es el porcentaje de tiempo que un vehículo se demora en pasar por un sensor, la ocupación depende del tamaño de la zona de detección para la medida de este, puede diferir a pesar que se tenga las mismas condiciones de tráfico.
- Tiempos de adelanto entre dos vehículos: es el tiempo que pasa entre el arribo del primer vehículo y el arribo del siguiente a un punto de referencia.
- **Distancia de adelanto entre dos vehículos:** es la distancia medida desde el inicio del primer vehículo al inicio del siguiente vehículo.

#### 2.1.1.5. Análisis Estadístico

En situaciones reales la circulación vehicular es muy dispersa y 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 tres 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 bajos y medios [2].

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

$$p(n) = P(X = n) \frac{m^n e^{-m}}{n!}$$
 para  $n = 0, 1, 2, ..., \infty$ 

Donde:

X es la variable aleatoria y representa el número de llegadas de vehículos a un punto.

p (n) es la probabilidad que llegue exactamente n vehículos al punto durante un intervalo de tiempo t.

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

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

$$p_n(t) = P(X = n) = \frac{(\lambda . t)^n . e^{-\lambda . t}}{n!}$$

La probabilidad de que no lleguen vehículos durante el intervalo de tiempo t, está dado por:

$$P(X=0) = \frac{(\lambda t)^0 \cdot e^{-\lambda t}}{0!} = e^{-\lambda t} \quad para \quad t \ge 0$$

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 de intervalos de tiempo entre vehículos, la cual se expresa con:

$$P(X=0) = \frac{(\lambda t)^0 \cdot e^{-\lambda t}}{0!} = e^{-\lambda t} \quad para \quad t \ge 0$$

Entonces la probabilidad de que un intervalo *h* sea menor que *t* es:

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

En estas condiciones, el valor medio del intervalo entre llegadas es:

$$E[h] = \frac{1}{\lambda}$$

Una manera de calcular estas probabilidades, de acuerdo a la distribución de Poisson, es mediante un proceso recursivo dado por:

$$p(n+1) = \frac{m}{1+m} p(n)$$
 ó también  $p(n) = \frac{m}{n} p(n-1)$ 

#### 2.1.1.6. Semáforos

Los semáforos son dispositivos eléctrico-electrónicos que sirven para ordenar, regular y dirigir el tránsito de vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces de color rojo, ámbar y verde, operados por una unidad de control.

El semáforo es un dispositivo útil para el control y la seguridad, tanto de vehículos como de peatones, el semáforo ejerce una profunda influencia sobre el flujo del tránsito. Por lo tanto, es de vital importancia que la selección y el uso de tan importante dispositivo de control sean precedidos de un estudio detenido del sitio y de las condiciones del tránsito.

Según esto, los semáforos se usan para desempeñar las siguientes funciones:

- a) Interrumpir periódicamente el tránsito en una corriente vehicular o peatonal para permitir el paso de otra corriente vehicular.
- b) Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua a una velocidad constante.
- c) Controlar la circulación por carriles.
- d) Eliminar o reducir el número y gravedad de algunos tipos de accidentes, principalmente los que implican colisiones perpendiculares.
- e) Proporcionar un ordenamiento del tránsito.

En una intersección, el flujo total de vehículos que llega a cada uno de sus accesos, debe ser dividido en diferentes fases de movimiento, en cada una de las cuales se efectúa un desplazamiento específico de vehículos. Ciertos movimientos 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 o de pare.

Para la descripción lógica de las señales de control de tráfico, es necesario definir dos términos fundamentales: movimiento y fase. Un movimiento 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.

Los movimientos se combinan en pares para formar las fases. Cuando una fase es seleccionada, los verdes se despliegan para el par de movimientos involucrados, mientras que los otros movimientos reciben un rojo. Una fase comienza con la pérdida de derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que lo ganan. Un movimiento pierde derecho de paso en el momento de aparecer la indicación ámbar.

Otros términos asociados son: Ciclo o longitud de ciclo, que 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 sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.

#### 2.1.1.7. Administración del Tránsito

La administración del tránsito se puede realzar usando Políticas y Estrategias. Una estrategia es la colección de políticas que se pueden aplicar para resolver un problema, por ejemplo, aliviar la congestión vehicular en las horas pico.

Una política consiste en el conjunto de acciones que pueden ser aplicadas al mismo tiempo. Una acción es una codificación de las condiciones de tráfico o de la conducta de los conductores, entre las acciones que pueden tomarse se tienen:

- Cierre de un carril
- Cambio de velocidad
- Giros forzados
- Reorientar el tráfico

## 2.2. SEMAFORIZACIÓN [3]

Se consideran Intersecciones semaforizadas, las que están reguladas permanente o mayoritariamente mediante sistemas de luces que establecen las prioridades de paso por la intersección.

La semaforización de intersecciones puede ser un instrumento eficaz para la reducción de la congestión, la mejora de la seguridad o para apoyar diversas

estrategias de transporte (promoción del transporte público, reforzamiento de la jerarquía vial, prioridad de peatones y ciclistas, etc.).

Prácticamente, cualquier tipo de intersección es susceptible de semaforización. No obstante, un buen aprovechamiento de los sistemas modernos de semaforización puede requerir modificaciones en la localización de las intersecciones y en el diseño de sus elementos (isletas, etc.). Se pueden distinguir los siguientes tipos de sistemas de semaforización:

Sistemas de ciclo y fases de duración prefijada: en estos se mantienen constantes con independencia de las variaciones de tráfico en las vías. No obstante, sus fases pueden variarse desde el centro de control, y coordinarse con las de otras intersecciones.

Sistemas coordinados en "ondas verdes": conjunto de intersecciones con fases prefijadas, pero sincronizadas entre sí, para permitir el movimiento de vehículos sin paradas, a lo largo de un itinerario, a una velocidad determinada.

Sistemas adaptables automáticamente a la demanda ("Actuated Control"): en las que las fases del ciclo varían en función de los datos de la longitud de colas existentes en cada carril, que son recibidos y procesados por un computador. Una forma particular de estos sistemas son los semáforos que mantienen la fase verde en la vía principal hasta que se presenta un vehículo en la secundaria.

Sistemas que conceden prioridad de paso al transporte público: mediante detectores que activan la fase verde de este al aproximarse a la intersección, tornando a fase roja todos los movimientos que puedan resultar incompatibles.

Semáforos dosificadores ("ramp metering"): Se trata de semáforos cuyas fases verdes sólo permiten el paso de un vehículo. El número de fases verdes por ciclo puede dosificar la intensidad de tráfico que pasa por ellos y suele regularse automáticamente en función de la mayor o menor congestión en los carriles de arriba de los mismos. Pueden instalarse en vías de un solo carril (rampas de

acceso a autopistas o autovías) o en batería, en el tronco principal de una autopista, sincronizados para que no coincidan sus fases verdes.

Semáforos accionables manualmente por peatones o ciclistas: en los que se activa la fase verde al presionar un mecanismo.

## CAPÍTULO 3

## MEDICIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR

Para tener un modelo de simulación de tráfico vehicular que reproduzca la realidad es necesario tener mediciones para alimentar dicho modelo, como también para poder realizar la validación de modelo y poder cuantificar a través de la calidad del servicio utilizando indicadores e índices. En este capítulo se describe el proceso que se realizó para obtener mediciones de aforo para alimentar y validar el modelo, como también para establecer índices de calidad de servicio.

## 3. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR

Los sistemas de control de tráfico se basan en el conteo de los vehículos, en mediciones de velocidad y de tiempo entre vehículos. Si se basa en el conteo de vehículos, es posible medir las siguientes características del tráfico vehícular:

- Flujo de vehículos en cada carril y en cada sentido de una vía.
- Densidad de vehículos en cada carril y en cada sentido de una vía.
- Conteo de vehículos cambiando de dirección en los cruces.
- Velocidad de los vehículos circulando en la vía.
- Tipos de vehículos circulando en la vía.

Los sistemas de control de tráfico vehicular han permitido el desarrollo de tecnologías para detectar vehículos, las cuales pueden ser clasificadas en dos categorías: sensores invasivos y no-invasivos.

#### 3.1. SENSORES INVASIVOS

Son sensores instalados directamente sobre el asfalto, dentro del mismo, los principales sensores invasivos son los bucles inductivos, sensores magnéticos, tubos neumáticos, cables piezoeléctricos. Las tecnologías invasivas han sido usadas extensivamente en muchas aplicaciones, lo que ha permitido bajar sus

costos y mejorar su precisión. Actualmente, representan los sensores más comúnmente usados en mediciones permanentes relacionadas con el tráfico vehicular.

La desventaja principal de ese tipo de sensores reside en la necesidad de parar el tráfico en la vía para poder instalarlos sobre, dentro o debajo del asfalto. Otra desventaja se debe a que es necesario combinar varios sensores del mismo tipo cuando se trata de medir varios parámetros en la misma vía, lo cual obviamente representa inversión económica y problemas de congestión vehicular debido al cierre de la vía para la instalación como para su mantenimiento. Por ejemplo, en una vía doble sentido de 6 carriles, se requieren al menos 6 bucles inductivos para contar vehículos en cada carril. Si se necesita clasificar los vehículos, bucles de tamaños diferentes deben ser instalados. Medir velocidades requiere combinar varias zonas y medir tiempos de recorrido de una zona a la otra.

#### 3.1.5. BUCLES INDUCTIVOS

Se pueden utilizar en forma temporal o permanente, siendo esta última la más normal. Detectan el paso del vehículo por variación de la masa magnética sobre el lazo. No detectan con detalle el eje, de modo que no pueden diferenciar el eje doble o el eje triple de un eje sencillo. Permiten clasificar vehículos, pero sin precisar exactamente el número de ejes. Son económicos, son los más comunes en todo tipo de mediciones de tráfico, la instalación permanente requiere cierre de la vía y daña la misma, es necesario varios bucles para obtener información pertinente y son sensibles a la temperatura [1].





Figura 3.1. Bucle inductivo en utilización temporal y permanente

## 3.1.6. SENSORES MAGNÉTICOS

Detectan el vehículo por el cambio de flujo magnético natural de la tierra o producido artificialmente. Puede ser usado cuando los bucles inductivos no son adecuados, y requieren el cierre de la vía para instalación, además de dañar está cuando se instala.

#### 3.1.7. TUBOS NEUMÁTICOS

Son sensores de ejes que detectan el paso del vehículo en base al impulso de presión que se genera. Pueden contar y clasificar, pero solo para utilización temporal y en tránsitos fluidos. Cuando la manguera atraviesa varios carriles debe estar protegida en los carriles en los que no esté efectuando la medida. Hay que cuidar también la fijación de la manguera a la calzada para evitar que los vehículos la arrastren o la rompan [1].



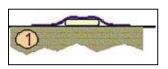
Figura 3.2. Tubos Neumáticos

### 3.1.8. SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

Estos sensores detectan el paso del vehículo en base a la carga eléctrica que se genera en el material piezoeléctrico cuando es presionado por una rueda. Su campo de aplicación va desde 1 Km./h hasta 180 Km./h. Un par de sensores piezoeléctricos colocados a una distancia conocida permiten calcular la velocidad del vehículo y clasificarlo con precisión. Se utilizan normalmente con un lazo inductivo situado entre ellos para poder separar unos vehículos de otros, en configuración piezo-lazo-piezo. Se puede utilizar dos lazos inductivos con un

sensor piezoeléctrico pero la primera configuración es la que proporciona mayor precisión.

Los sensores piezoeléctricos presentan las siguientes desventajas: sensibilidad al tráfico de carriles adyacentes, baja sensibilidad al tránsito lento, son susceptibles a la corrosión y al ruido eléctrico, transmisión de la energía del rayo al dispositivo electrónico de clasificación [1].



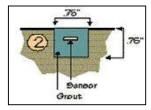
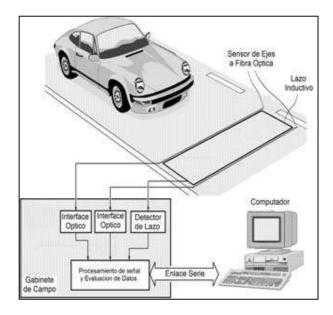


Figura 3.3 Sensores piezoeléctricos en ubicación temporal y fija

#### 3.1.9. SENSORES EN BASE A CABLES DE FIBRA ÓPTICA.

Son sensores de ejes que detectan el paso del vehículo por la variación de la conductividad óptica de un cable de fibra óptica presionado por la rueda del vehículo. Su utilización es análoga a la de los sensores piezoeléctricos, pero cubriendo velocidades desde "0" Km/h, por lo que son los únicos sensores que permiten clasificar en base al número de ejes en situaciones de circulación a vuelta de rueda, arranque-parada, etc.

Los sistemas de conteo y de clasificación vehicular en base a Sensores Ópticos ofrecen numerosas ventajas: el sensor no tiene partes metálicas, es solamente sensible a las cargas verticales, y detecta el paso de los ejes a cualquier velocidad, incluyendo el tránsito a paso de rueda y el tránsito con paradas frecuentes. Es insensible a las vibraciones en los carriles adyacentes, son robustos, fáciles de manejar, y presentan una larga duración de vida. Como no están hechas a base de conductores eléctricos no pueden conducir descargas de rayos ni ruidos eléctricos [1].



**Figura 3.4.** Esquema del sistema de clasificación desde 0 Km/h en función del número de ejes.

#### 3.2.SENSORES NO INVASIVOS

Estos sensores permiten una medición similar a los anteriores sin tener que interrumpir el tráfico y sin afectar la calidad y la seguridad de la vía. La ubicación de dispositivos en altura predomina en muchos de los sensores no invasivos. Sensores no invasivos, basados en la propagación de ondas, son más sensibles a condiciones climáticas. Sin embargo, los desarrollos tecnológicos han permitido obtener una precisión similar a los equipos invasivos.

La ventaja principal de los sensores no-invasivos es la flexibilidad y la facilidad con la cual pueden ser instalados. Además se puede medir directamente la velocidad de los vehículos y existe la posibilidad de cubrir varios carriles con el mismo sensor. El costo sigue siendo una desventaja importante para dispositivos no-invasivos. Son rentables solamente en caso de tener muchas zonas de detección.

#### 3.2.1. SENSOR INFRARROJO

El sensor infrarrojo es sensible a la luz infrarroja ya sea producida por la reflexión de un haz viniendo de una fuente (sensores activos) o producida por el vehículo mismo (sensores pasivos). El sensor proporciona la siguiente información: longitud, alto y ancho del vehículo, posición respecto al acotamiento, velocidad. La desventaja de estos sensores es que son sensibles a la luz ambiente y por lo tanto a condiciones climáticas [1].

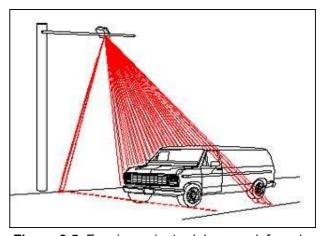


Figura 3.5 Funcionamiento del sensor infrarrojo

#### 3.2.2. ULTRASONIDO

Consiste de la emisión de onda ultrasonido y medición de la recepción. Para la medición de velocidad por el efecto Doppler, se realiza comparando la frecuencia de la onda emitida con la frecuencia de la onda reflejada. Este tipo de sensores son sensibles a condiciones climáticas [2].



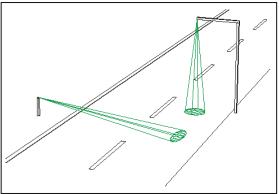


Figura 3.6. Sensor de ultrasonido y posibles ubicaciones del sensor en la vía

#### 3.2.3. MICROONDAS

El sensor basado en tecnología de microondas convencional determina la distancia a la que se encuentra un objeto, en movimiento o parado, en función del tiempo entre la emisión y la recepción de la onda reflejada. Este tipo de sensores son sensibles al ruido ambiental, a la velocidad de los vehículos y a condiciones climáticas.



Figura 3.7 Sensor a Microondas

## 3.2.4. CÁMARAS [2,3]

Este tipo de sensores tiene un costo unitario alto, pero por otro lado, la cantidad de información disponible, la flexibilidad, la facilidad de uso, y la posibilidad de medir en muchas zonas de la vía son características que han hecho que este tipo de sensores sean utilizados en la actualidad. Al final, el uso de cámaras representa la solución económicamente más eficiente.

Por otra parte, cabe mencionar otras ventajas importantes a nivel práctico:

- Ausencia de instalaciones en la vía.
- Distinción directa de vehículos por el tamaño.
- Posibilidad de medición en varios puntos al mismo tiempo.

 Conectividad directa a una computadora para el tratamiento y almacenamiento de los datos.



Figura 3.8. Cámara para la detección de vehículos

Las desventajas principales de los sistemas de visión son:

- Dificultad de calibración para situaciones exteriores con luz ambiente muy variable (el producto seleccionado para este proyecto está diseñado para abrir o cerrar automáticamente el iris de la cámara y prevenir este tipo de problemas).
- Manejo de sombras presentes en la imagen. La selección de la ubicación del sensor y la definición de las zonas de detección son muy importantes y permiten evitar dichos problemas.
- Posibilidad de obturación de la vista por vehículos grandes, lo cual se evita con una buena ubicación de la cámara.
- Nitidez de la imagen, especialmente en caso de movimientos de la cámara.
   La definición de zonas de detección suficientemente grandes soluciona este problema. Sin embargo, es importante tratar de ubicar la cámara en sitios fijos.

## 3.3. SISTEMA TRAFICAM [4]

El sistema seleccionado para la toma de mediciones de tráfico vehicular, es TrafiCam ilustrado en la figura 3.9, es un sensor fabricado en Bélgica por la empresa Traficon n.v., consiste en una cámara digital con sensor y detector CMOS cuya imagen es procesada en vivo según una configuración previamente

definida por el usuario. El producto TrafiCam permite contar vehículos que están pasando hasta 8 zonas predefinidas de la imagen.



Figura 3.9 Cámara TrafiCam

Con este sistema se puede detectar vehículos en el día y en la noche. Esto le permite realizar la detección de presencia vehicular en varios carriles. TrafiCam cuenta con zonas de detección sensibles a la dirección, indicando la presencia de vehículos que se desplazan en una dirección específica. Con la ayuda de una PC se puede configurar las zonas en una vía.

## 3.3.1. CARACTERÍSTICAS



Figura 3.10. Componentes del Sistema TrafiCam

Como se observa en la figura 3.10, cada cámara cuenta con un cable serial DB9, un convertidor RS485 a RS232, un soporte para la instalación de la cámara y una tarjeta de interfaz, en la cual se obtienen los pulsos de salida cuando una zona ha sido activada. En el sistema se pueden configurar ocho zonas pero solo se dispone de cuatro salidas, si se desea trabajar con las todas las zonas se puede utilizar operaciones lógicas AND y OR que pueden ser configuradas con ayuda del software TrafiCam.

# 3.4. PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

Se realizaron pruebas iniciales en el parqueadero de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, aquí se probó la configuración de las zonas y el modo de operar de las salidas. El la figura 3.11 se puede observar una de las configuraciones con las que se trabajó.



Figura 3.11. Configuración de Zonas en el parqueadero de EPN

De estas pruebas realizadas se pudo concluir que:

- La ubicación de la cámara, como la altura, la distancia y la perspectiva a la cual está ubicada afecta a las mediciones.
- En esta ubicación las zonas fueron activadas con la presencia de personas que circulaban en el sentido configurado en la zona.
- Los pulsos de salida del sistema son de Vcc a 0 V.

#### 3.4.1. DESARROLLO DEL PROGRAMA EN LABVIEW

Con estos resultados se procedió a desarrollar un programa en Labview que permita registrar el número de vehículos que activan la zona y el tiempo en el cual ocurrió este evento. Para la adquisición de los datos se utilizó una tarjeta DAQ NI USB-6008 de la National Instruments [5] de la figura 3.12, debido a las ventajas de la tecnología plug-and-play, facilidad de conectividad, bajo costo y al pequeño tamaño.

La tarjeta DAQ NI USB-6008 tiene capacidades multifunción con ocho canales de entrada analógica 12 bits, dos salidas analógicas, 12 líneas E/S digitales y un contador. Este dispositivo funciona con la corriente del bus USB así que no necesitan una fuente de energía externa para trabajar. Incluyen terminales de tornillo extraíbles para conectarse por señal directa, una referencia de tensión para suministrar energía a dispositivos y sensores externos (5 V), una capa diseñada para reducir el ruido y aumentar la precisión, así como para proteger contra sobre tensión en las líneas de entrada analógica de hasta ±35 V.



Figura 3.12. DAQ NI USB-6008

En la figura 3.13, se observa la interfaz desarrollada en Labview, en está se puede configurar la línea a la cual está conectada la salida de la cámara. En la tabla se registra el número de vehículos y la hora a la cual ocurre con una

precisión de segundos. También existe un botón el cual puede grabar los datos en un archivo tipo texto que puede se abierto con EXCEL. Además esta configurado para que el sistema active la grabación del archivo tipo texto a la hora de empezar la adquisición de los datos.



Figura 3.13. Interfaz de Labview

Con este software se realizó pruebas en el parqueadero de la EPN y se probó su efectividad, la dificultad que presentó fue que si un vehículo se quedaba en una zona activada el contador se incrementaba hasta que el carro saliera.

Se decidió probar el programa en la Av. 12 de Octubre y Roca el 25 de Agosto del 2006 a las 03:20 pm., por un lapso de media hora, las cámaras se ubicaron sobre el puente peatonal existente.

Las dos configuraciones utilizadas fueron; en el carril sur norte se lo configuró 8 zonas que utilizan la operación AND para evitar la activación de las zonas con el paso de los peatones, en el carril norte-sur se configuró las cuatro zonas para determinar la velocidad, la distancia de separación entre las zonas fue de 11.74m, estas configuraciones se puede observar en la figura 3.14.

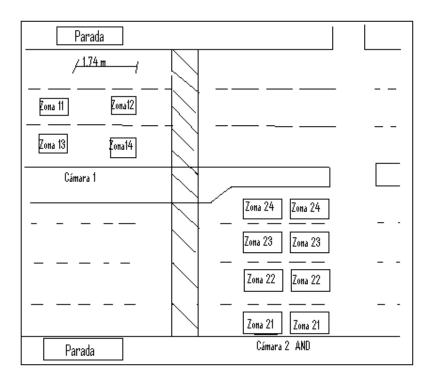


Figura 3.14. Configuración de las zonas en la Av. 12 de Octubre y calle Roca

#### 3.4.2. ANÁLISIS DE LA PRUEBAS REALIZADAS

- El total de los autos registrados en el carril sur-norte fueron de 544 vehículos de los cuales 428 siguieron en la dirección sur-norte y 116 vehículos giraron hacia la izquierda.
- En el carril norte sur se registraron 727 vehículos, sin tomar en cuenta el carril por el cual circulan los buses.
- Se observa según los datos de las zonas 13 y 14, que ingresaron a la zona 317 vehículos y salieron 348 vehículos, existiendo un exceso de 31 vehículos. Esto implica que debieron existir cambios de carril que incrementaron los vehículos de salida.
- Al realizar un análisis parecido a las zonas 11 y 12 se observa que ingresaron 330 vehículos y salieron 379, lo cual implica que debió existir cambios de carril de la zona por donde circulan buses a la zona11 y de la zona12 a las zona13. Esto da como exceso 79 vehículos aproximadamente.

• Estos cambios de carril afectan en un alto grado a los datos para determinar la velocidad, por lo que no se puede determinar esta variable.

Con las pruebas realizadas y el análisis de los datos obtenidos se puede concluir que:

- Si las zonas configuradas para determinar la velocidad se encuentran muy distanciadas se producen datos erróneos debido a los cambios de carril que realizan los conductores de las zonas adyacentes.
- Los vehículos grandes como los buses ocupan más de un carril lo cual provoca que activen las zonas de los carriles adyacentes, introduciendo de esta manera datos falsos.
- Al analizar los datos se observó que es necesario registrar el tiempo con centésimas de segundos debido a que las distancias de recorrido que registran las cámaras son muy pequeñas y los autos la recorren en menos de un segundo.
- Debido a los inconvenientes presentados, los datos para determinar la velocidad no pueden se procesados.

#### 3.4.3. MODIFICACIONES AL PROGRAMA EN LABVIEW

De los resultados de las pruebas realzadas se decidió corregir el programa en Labview, para evitar el registro de un vehículo cuando permanece dentro de la zona activada, además se incremento el registro de las centésimas de segundo.

Se corrigió el programa haciendo que el registro de un vehículo como el tiempo de ingreso a la zona solo se realice cuando exista un cambio de estado en la zona respectiva.

En la figura 3.15, se observa la interfaz del programa modificado aquí se ha incrementado en la tabla de registro una nueva columna en la cual se registran las centésimas de segundo.



Figura 3.15. Pruebas de laboratorio con el programa modificado

Con las modificaciones realizadas al programa en Labview se procedió a tomar nuevos datos en la AV 12 de Octubre y Roca el día 18 de Septiembre del 2006 a las 12:20 p.m., por un lapso de 25 minutos aproximadamente.

Las configuraciones de las zonas variaron: en el carril sur-norte se colocó solo cuatro zonas no se utilizó la operación AND debido a que los peatones no activan las zonas ya que no circulan en el sentido en el que éstas están configuradas. En el carril norte – sur, para determinar la velocidad se ubicó las zonas muy seguidas

para evitar que los cambios de carril afecten a las medidas; estas configuraciones pueden ser observadas en las figuras 3.16 y 3.17.

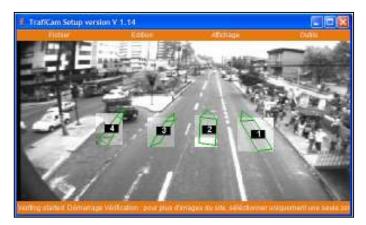


Figura 3.16. Configuración carril sur-norte Av. 12 de Octubre



Figura 3.17. Configuración carril norte-sur Av. 12 de Octubre

#### 3.4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Los autos registrados en el lapso de 25 min. en el carril sur-norte fueron de 305 de los cuales 275 siguieron en la dirección sur-norte y 30 vehículos giraron hacia la izquierda.
- La zona 3 en el carril norte sur registró datos a partir de las 12:29:50 minutos debido a un error en la conexión, de ahí que para calcular valores de velocidad se van a considerar los datos de la zona 4 a partir del dato 48.

 Los cálculos de la velocidad así como de otras variables que haya que realizar se hacen de acuerdo a los requerimientos del trabajo.

## 3.5. MEDICIONES

La zona que se escogió para realizar las medidas fue la intersección de la Av. 12 de Octubre (sentido norte - sur y sur - norte) y la calle Roca, en la figura 3.18, se puede observar la zona seleccionada:



Figura 3.18. Zona de Estudio

Las medidas que se realizaron fueron:

- Manuales, por ejemplo el conteo de colas formadas en las intersecciones y giros en U
- Automáticas (cámaras TrafiCam): por ejemplo el aforo.

#### 3.5.1. MEDICIONES MANUALES

En las mediciones manuales se midieron dos variables: colas de vehículos que se forman a la espera del cambio de rojo a verde del semáforo y el aforo o cantidad de vehículos que pasan en un determinado lapso de tiempo, para estas mediciones se contó con la ayuda del personal del proyecto de investigación y con los ayudantes del Laboratorio de Control y Sistemas de la Escuela Politécnica Nacional.

El conteo manual se lo realizó el día 26 de Octubre del 2006, por el lapso de una hora desde 12:01 a 13:01, a continuación se presentan los datos recolectados considerando el lapso de 12:10 a 13:00 para así poder realizar comparaciones con los datos recolectados mediante el sistema TRAFICAM.

Para obtener el promedio de las colas o del flujo cada 15 min. se considera sólo los 3 últimos cuartos de hora, debido a que las mediciones automáticas se realizaron a partir de las 12:10 AM.

#### 3.5.2. COLAS DE VEHÍCULOS

El conteo de colas de vehículos se realizó en:

- Av. 12 de Octubre sentido norte sur
- Av. 12 de Octubre sentido norte sur distinguiendo la cantidad de vehículos livianos y buses.
- Av. 12 de Octubre sentido sur norte en el carril que gira hacia la calle
   Roca y en U hacia la Av. 12 de Octubre sentido norte sur .

Los resultados se pueden observar en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3:

Tabla 3.1 Cola de vehículos formada en la Av. 12 de Octubre sentido norte-sur

Rango	Total
12:10 – 12:14:59	47
12:15 – 12:19:59	47
12:20 – 12:24:59	47
12:25 – 12:29:59	46
12:30 – 12:34:59	46
12:35 – 12:39:59	37
12:40 – 12:44:59	44
12:45 – 12:49:59	34
12:50 – 12:54:59	30
12:55 – 12:59:38	38
Total	416

Rango	Total
12:00 – 12:14:59	47
12:15 -12:29:59	140
12:30 – 12:44:59	127
12:45 – 12:59:59	102
Total	416

**Promedio (5 min.)** 41.6

**Tabla 3.2.** Cola de Vehículos Livianos y Buses en la Av. 12 de Octubre norte – sur

Rango	Livianos	Buses	Total
12:10 – 12:14:59	0	0	0
12:15 – 12:19:59	0	0	0
12:20 – 12:24:59	0	0	0
12:25 – 12:29:59	0	0	0
12:30 – 12:34:59	25	2	27
12:35 – 12:39:59	38	3	41
12:40 – 12:44:59	48	3	51
12:45 – 12:49:59	32	6	38
12:50 – 12:54:59	29	6	35
12:55 – 12:59:38	37	2	39
Total	209	22	231

Rango	Livianos	Buses	Total
12:00 – 12:14:59	0	0	0
12:15 -12:29:59	0	0	0
12:30 – 12:44:59	111	8	119
12:45 – 12:59:59	98	14	112
Total	209	22	231

Promedio (5min.) 34.8 3.7 38.5

**Tabla 3.3.** Cola de vehículos en la Av. 12 de Octubre sur - norte que giran a la calle Roca o en U

Rango	Total
12:10 – 12:14	8
12:15 – 12:19	6
12:20 – 12:24	7
12:25 – 12:29	17
12:30 – 12:34	2
12:35 – 12:39	8
12:40 – 12:44	9
12:45 – 12:49	2
12:50 – 12:54	10
12:55 – 12:59	18
Total	87

Rango	Total
12:00 – 12:14	8
12:15 -12:29	30
12:30 – 12:44	19
12:45 – 12:59	30
Total	87

**Promedio (5 min.)** 8.7

## 3.5.3. CONTEO MANUAL DE VEHÍCULOS

## 3.5.3.1.Conteo de Buses

Tabla 3.4. Número de Buses que circulan por la Av. 12 de Octubre

Rango	N - S	S - N
12:10 - 12:14	16	16
12:15 - 12:19	11	8
12:20 - 12:24	16	15
12:25 - 12:29	14	12
12:30 - 12:34	15	13
12:35 - 12:39	21	13
12:40 - 12:44	17	12
12:45 - 12:49	14	11
12:50 - 12:54	17	11
12:55 - 12:59	11	16
Total	152	127

Rango	N - S	S - N
12:10 - 12:14	16	16
12:15 -12:29	41	35
12:30 - 12:44	53	38
12:45 - 12:59	42	38
Total	152	127

**Promedio (5 min.)** 15.2 12.7

En la tabla 3.4, se observa el número de buses que circulan por la avenida en ambos sentidos; estas mediciones se realizaron para determinar la incidencia que tiene esta clase de vehículos en la avenida. Mediciones de vehículos pesados no se realizó, ya que por esta avenida no circula esta clase de automotores.

## 3.5.3.2. Conteo de vehículos que giran a la Calle Roca o en U desde la Av. 12 de Octubre

**Tabla 3.5.** Vehículos que giran a la calle Roca o en U desde la Av. 12 de Octubre carril sur – norte

Rango	Roca	Giro en U	Total
12:10 - 12:14	12	2	14
12:15 - 12:19	14	3	17
12:20 - 12:24	8	1	9
12:25 - 12:29	16	1	17
12:30 - 12:34	12	0	12
12:35 - 12:39	8	0	8
12:40 - 12:44	12	2	14
12:45 - 12:49	17	6	23
12:50 - 12:54	17	2	19
12:55 - 12:59	16	3	19
Total	132	20	152

Rango	Roca	Giro en U	Total
12:10 - 12:14	12	2	14
12:15 -12:29	38	5	43
12:30 - 12:44	32	2	34
12:45 - 12:59	50	11	61
Total	132	20	152

Promedio (5min) 13.2 2 15.2

Estas medidas se realizaron manualmente y con la ayuda de las cámaras también. Las medidas manuales sirvieron para determinar el aforo de carros que giran en U en este carril, ya que con las cámaras sólo se puede determinar el número de vehículos que circulan por este carril. Los resultados que se obtuvieron son: 20 vehículos que giran en U y 132 vehículos que van hacia la calle Roca esto en el lapso de 50 min. Es decir, 13.5% de vehículos que ingresan a este carril giran en U.

#### 3.5.3.3.Conteo de Vehículos que ingresan a la calle Roca

Tabla 3.6. Vehículos que ingresan a la Calle Roca

Rango	Total
12:10 - 12:14	22
12:15 - 12:19	20
12:20 - 12:24	26
12:25 - 12:29	27
12:30 - 12:34	30
12:35 - 12:39	25
12:40 - 12:44	23
12:45 - 12:49	26
12:50 - 12:54	30
12:55 - 12:59	20
Total	246

Rango	Total
12:00 - 12:14	68
12:15 -12:29	73
12:30 - 12:44	78
12:45 - 12:59	76
Total	246

Promedio (5min) 24.9

El total de vehículos fueron de 246 en lapso de 50 min., con un promedio de 24.9 vehículos en 5 min., y de 75.7 vehículos en 15 min. Los datos de conteo de vehículos serán utilizados para la calibración de la zona crítica en el simulador de AIMSUN.

## 3.6.MEDICIONES AUTOMÁTICAS

Las mediciones automáticas se utilizaron para determinar el flujo de vehículos que existe en la avenida, así como el flujo que ingresa a la calle Roca proveniente de la 12 de Octubre sentido sur – norte y sentido norte-sur, estas mediciones se realizaron con el siguiente equipo:

- Dos cámaras TrafiCam
- Una laptop
- Tarjeta de adquisición de datos USB-6009 NI
- Batería 12(V)
- Programa realizado en Labview

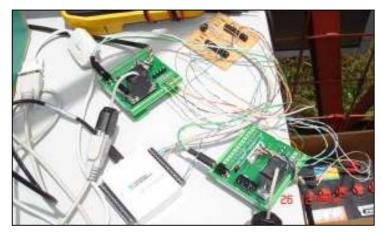


Figura 3.19. Hardware para la adquisición de los datos de las cámaras

## 3.6.1. CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO

Las cámaras se ubicaron en el puente peatonal, con vista hacia el norte de la Av. 12 de Octubre, esto se puede observar en Figura 3.20. Se utilizaron cuatro zonas por cada cámara (figura 3.21)





Figura 3.20. Ubicación de las cámaras sobre el puente peatonal

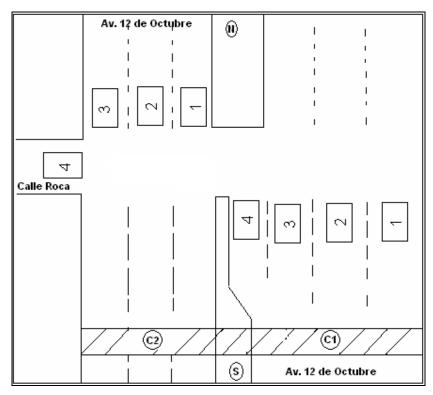


Figura 3.21. Configuración de las zonas utilizadas por las cámaras

# 3.6.2. CONTEO AUTOMÁTICO DE VEHÍCULOS

# 3.6.2.1.Av. 12 de Octubre sentido norte - sur

Las mediciones automáticas se realizaron en el lapso de 12:10 - 13:00. En la tabla 3.7 se puede observar los promedios de los flujos por cada zona en el lapso de 5 minutos. Se puede observar también el incremento significativo del flujo vehicular a partir de las 12:30 horas.

Tabla 3.7. Vehículos que circulan por la Av. 12 de Octubre en sentido norte-sur

	Zona	Zona	Zona	
Rango	1	2	3	Total
12:10 - 12:14	0	24	15	39
12:15 - 12:19	18	21	5	44
12:20 - 12:24	23	21	0	44
12:25 - 12:29	43	27	7	77
12:30 - 12:34	42	42	14	98
12:35 - 12:39	28	21	17	66
12:40 - 12:44	28	30	16	74
12:45 - 12:49	41	25	11	77
12:50 - 12:54	37	37	13	87
12:55 - 12:59	34	33	13	80
Total	294	281	111	686

	Zona	Zona		
Rango	1	2	Zona 3	Total
12:10 - 12:14	0	24	15	39
12:15 -12:29	84	69	12	165
12:30 - 12:44	98	93	47	238
12:45 - 12:59	112	95	37	244
Total	294	281	111	686

**Promedio 5'** 29.4 28.1 11.1 68.6

# 3.6.2.2.Ingreso a la calle Roca

Tabla 3.8. Vehículos que ingresan a la calle Roca.

	Zona
Rango	4
12:10 - 12:14:59	20
12:15 - 12:19:59	34
12:20 - 12:24:59	27
12:25 - 12:29:59	45
12:30 - 12:34:59	31
12:35 - 12:39:59	21
12:40 - 12:44:59	29
12:45 - 12:49:59	27
12:50 - 12:54:59	33
12:55 - 12:59:59	35
Total	302

	Zona
Rango	4
12:10 - 12:14:59	20
12:15 -12:29:59	106
12:30 - 12:44:59	81
12:45 - 12:59:59	95
Total	302

**Promedio 5'** 30.2

El total de vehículos que ingresan a la calle Roca es de 302 en un lapso de 50 min. Aquí no se observa un incremento en el flujo vehicular, este se mantiene alrededor de los valores promedios.

# 3.6.2.3. Av. 12 de Octubre sentido sur -norte

Tabla 3.9. Vehículos que circulan por la Av. 12 de Octubre en sentido sur - norte

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

	Zona	Zona	Zona	
Rango	1	2	3	Total
12:10 - 12:14	22	35	24	81
12:15 -12:29	46	78	79	203
12:30 - 12:44	39	85	72	196
12:45 - 12:59	47	77	77	201
Total	154	275	252	681

**Promedio 5'** 15.4 27.5 25.2 68.1

El flujo vehicular en este sentido es menor que en el sentido norte –sur, su valor es de 681 vehículos en 50 min. El promedio del flujo vehicular en el lapso de 5 min. y 15 min., se mantiene dentro del promedio, no existe un incremento significativo como se ve para el otro sentido de la avenida.

# 3.6.2.4.Giro en U o a la calle Roca desde la Av. 12 de Octubre (sur - norte)

El total de vehículos que giran en U o hacia la calle Roca es de 172, esto es el 20.16% del total de vehículos que circulan en el sentido sur - norte. Estos datos se utilizaran para calibrar el modelo de simulación en AIMSUN.

**Tabla 3.10.** Vehículos que giran en U o hacia la calle Roca desde la Av. 12 de Octubre (S-N)

Rango	Zona 4
12:10 - 12:14	15
12:15 - 12:19	19
12:20 - 12:24	10
12:25 - 12:29	21
12:30 - 12:34	15
12:35 - 12:39	10
12:40 - 12:44	16
12:45 - 12:49	25
12:50 - 12:54	20
12:55 - 12:59	21
Total	172

Rango	Zona 4
12:10 - 12:14	15
12:15 -12:29	50
12:30 - 12:44	41
12:45 - 12:59	66
Total	172

**Promedio 5'** 17.2

Para el cálculo de los errores se consideraron tanto las mediciones reales con el sistema TRAFICAM como las experimentales.

# 3.6.3. MEDICIONES OBTENIDAS DE EMSAT [8]

EMSAT realiza mediciones en distintas zonas de la ciudad donde existen sensores, estos datos son utilizados para alimentar varios modelos en el simulador de AIMSUN. A continuación se indican estos datos resumidos en las siguientes tablas. Estos datos fueron medidos el 18 de Octubre del 2006:

**Tabla 3.11** Datos de flujo vehicular en la intersección Av. 10 de Agosto y Naciones Unidas

	N -S	S - N	O - E	E - O
	Veh / h	Veh / h	Veh / h	Veh / h
8:00 - 9:00	1221	695	1217	766

Tabla 3.12 Datos de flujo vehicular en la intersección Av. 10 de Agosto y Colón

	N-S	S - N	O - E	E - O
	Veh /h	Veh / h	Veh / h	Veh / h
8:00 - 9:00	1550	1500	816	-

**Tabla 3.13** Datos de flujo vehicular en la intersección Av. 10 de Agosto y Av. 6 de Diciembre

	N-S	S-N	O - E	E - O
	Veh / h	Veh / h	Veh / h	Veh / h
8:00 - 9:00	1266	886	774	924

Los datos del EMSAT en estas zonas no son suficiente para alimentar el modelo de ahí que se realizó mediciones manuales en todas las intersecciones de la Av. Colón y en el redondel de la Av. 10 de Agosto y Av. Naciones Unidas el día 3 de Julio del 2007 a las 10:00 AM., como también en el sector entre las Av. Veintimilla y Av. 12 de Octubre el día 10 de Julio 12:00 PM., para obtener datos de los porcentajes de giro en las diferentes intersecciones y salidas del redondel como también las fases y ciclos de los semáforos en dichas intersecciones. En las siguientes tablas se encuentra resumida esta información. Además en las figuras 3.22, 3.23, 3.24 se encuentran los flujos y porcentajes con los que se calibra al simulador de AIMSUN

Tabla 3.14 Intersección: Av. Colón y Av. 6 de Diciembre

	Ciclo	Tiempo Verde				
	100	42				
	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total	SN	711		NS	1332	
10001	EO	729	45	OE	792	63

Sentido	Carros	Sentido	Carros
SE	81	NO	270
OS	72	EN	198

Tabla 3.15 Intersección: Av. Colón - Yánez Pinzón y Av. Colón - Urbina

# GIROS-Pinzón GIROS-Urbina

	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total						
10001	EO	852	72	OE	996	48

Sentido	Carros	Sentido	Carros
ON	144	SE	60
EN	192	SO	36

Tabla 3.16 Intersección: Av. Colón y Diego de Almagro

	Ciclo	Tiempo	Verde			
	100	6	5			
	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total	NS	554	0			
lotai	EO	513	81	OE	801	27

# GIROS

Sentido	Carros	Sentido	Carros
NO	137	NE	94
OS	126		

Tabla 3.17 Intersección: Av. Colón y Reina Victoria

	Ciclo	Tiempo Verde				
	100	55				
	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total	SN	814				
	EO	837	63	OE	747	81

Sentido	Carros	Sentido	Carros
		SE	137
SO	94	EN	243

Tabla 3.18 Intersección: Av. Colón y Rábida

	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses	Se
Total	EO	888	168	OE	852	60	O

Sentido	Carros	Sentido	Carros
ON	108	EN	120

Tabla 3.19 Intersección: Av. Colón y Juan León Mera

	Ciclo	Tiempo Verde				
	100	50				
	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total	NS	1152				
	EO	486	72	OE	909	63

# **GIROS**

Sentido	Carros	Sentido	Carros
NE	72	NO	100,8
OS	198		

Tabla 3.20 Intersección: Av. Colón y Amazonas

	100	35				
	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total	SN	711				
Total	EO	639	63	OE	711	63

Ciclo Tiempo Verde

# **GIROS**

Sentido	Carros	Sentido	Carros
SO	129,6	SE	162
NO	554,4		

Tabla 3.21 Intersección: Av. Colón y 9 de Octubre

	Ciclo	Tiempo Verde				
	100	46				
	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total	SN	693				
1 Juni	EO	936	81	OE	801	36

Sentido	Carros	Sentido	Carros
SE	81	SO	117
EN	252		

Tabla 3.22 Intersección: Av. Colón y Av. 10 de Agosto

	Duración	
Ciclo	Verde	
100	35	

	Sentido	Carros	Buses	Sentido	Carros	Buses
Total	NS	1701		SN	1683	
1000	EO	675	27	OE	738	45

Sentido	Carros	Sentido	Carros
SE	153	NO	144
EN	144	os	117

Tabla 3.23 Esquina: Av. 10 de Agosto (Sur) y Naciones Unidas (Este)

		Duración	
	Ciclo	Verde	
	120	28	
	Sentido	Carros Buse	
Total	SN	732	
Total	OE	1433	38

Sentido	Carros	Sentido	Carros	Buses
SEs	30	SEn	198	
OEs	218	OEn	1133	30

Tabla 3.24 Esquina: Naciones Unidas (Este) y Av. 10 de Agosto (Norte)

	Ciclo	Tiempo Verde		
	120	90		
	Sentido	Carros	Buses	
Total	EO	960		
1 otai	SN	503	8	

**GIROS** 

Sentido	Carros
EN	143
SN	315

Tabla 3.25 Esquina: Av. 10 de Agosto (Norte) y Naciones Unidas (Oeste)

	Ciclo	Tiempo	o Verde
	120	57	
	Sentido	Carros	Buses
Total	NS	1005	
10001	EO	1193	45

**GIROS** 

Sentido	Carros	Sentido	Carros	Buses
NO	165	EO	720	45

Tabla 3.26 Esquina: Av. 10 de Agosto (Sur) y Naciones Unidas (Oeste)

Ciclo	Tiempo Verde
120	33

	Sentido	Carros	Buses
Total	OE	990	
Total	NS	1433	0

Sentido	Carros
OS	83
NS	773

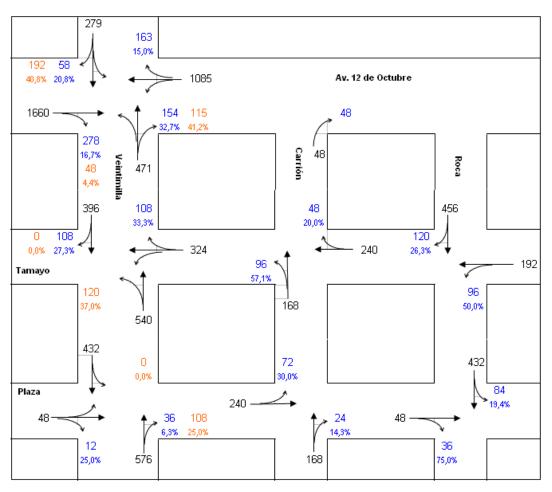


Figura 3.22 Porcentajes de Giro y Flujos en la zona EPN-PUCE

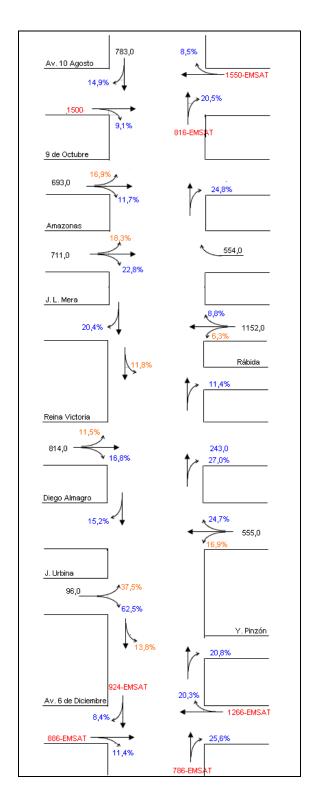


Figura 3.23 Porcentajes de Giro y Flujos en la Av. Colón

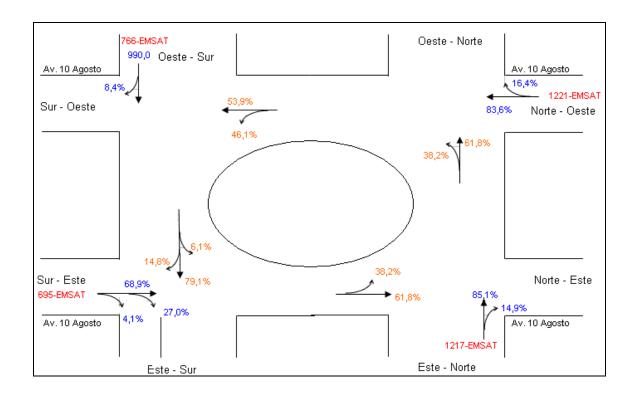


Figura 3.24 Porcentajes de Giro y Flujos en el redondel de las NNUU y Av. 10 de Agosto

# CAPÍTULO 4

# SIMULACIÓN, ANÁLISIS Y CONTROL

La simulación es necesaria para este trabajo primero porque no se pueden trabajar directamente en el escenario (zonas críticas), también es necesario para realizar el análisis y determinar la calidad del nivel de servicio y cuantificar a través de indicadores e índices, por último se necesita la simulación ya que nos permite probar qué pasaría si existe un incidente en la zona de estudio u otro tipo de perturbación posible, lo cual permite plantear estrategias para la toma de decisiones y control de dicha zona.

# 4. SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR USANDO AIMSUN

El simulador escogido para esta Tesis, con el propósito de poder realizar el Análisis del Tráfico Vehicular, ha sido el AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), este fue desarrollado en el Departamento de Estadística e Investigación Operacional de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. AIMSUN es un simulador microscópico que puede reproducir condiciones reales de tráfico vehicular de diferentes redes viales.

Este software es la combinación de un simulador continuo y discreto, debido a que existen elementos del sistema (vehículos y detectores) cuyos cambios de estados son continuos y cambian cada periodo de simulación y hay otros elementos (señales de tráfico) cuyos estados cambian discretamente en un específico punto de la simulación.

El sistema simulado posee un alto detalle de modelación, distingue entre diversos tipos de vehículos y conductores; permite a una amplia gama de geometría de la red vial y puede también modelar incidentes, maniobras conflictivas, etc. La mayoría del equipo de tráfico vehicular como semáforos, detectores del tráfico,

señalización, etc. presente en una red vial verdadera puede ser también modelados en AIMSUN [1].

# 4.1.CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR AIMSUN [2]

Entre las características principales del AIMSUN se tiene:

- AIMSUN realiza una aproximación microscópica al problema, el comportamiento de cada vehículo es continuamente modelado durante el período de simulación, mediante diferentes técnicas. (car-following, cambios de carril etc.)
- En AIMSUN las simulaciones pueden realizarse basándose en flujos de tráfico, proporciones de giro, o en matrices de viaje origen / destino basadas en una zonificación previamente establecida. Para el primer caso, los vehículos son distribuidos estocásticamente a lo largo de la red. En el segundo caso, los vehículos son asignados a rutas específicas desde su origen a su destino.
- El comportamiento de los vehículos responde a funciones de varios parámetros que permiten modelar diferentes tipos de vehículos: autos, buses, pesados, etc. Los vehículos pueden agruparse en clases y por carriles reservados.
- AIMSUN puede simular sistemas de control de transporte público con horarios, así como también aplicaciones para estimar las consecuencias para el medio ambiente debido a la contaminación que genera el parque automotor y el consumo de energía de este.
- Los elementos de control de tráfico pueden ser modelados mediante: semáforos, señales de ceda el paso, pare, etc. Los planes de control de los semáforos están basados en la duración de las fases y son muy flexibles tanto en su definición como en su control.

# 4.2.DATOS QUE REQUIERE EL SIMULADOR AIMSUN

La simulación microscópica es caracterizada por el alto nivel del detalle en el cual se modela el sistema. La calidad del modelo depende altamente de la disponibilidad y la exactitud de los datos de entrada.

Los datos que requiere el programa son: <u>un panorama de la simulación</u> que se compone de cuatro tipos de datos, descripción de la red, datos de la demanda de tráfico, planes de control de tráfico y planes de transporte público; y <u>un sistema de de parámetros de la simulación que definen el experimento</u>, estos pueden ser valores fijos como; tiempo de simulación, periodo transitorio, etc.; y otros parámetros que son variables como el tiempo de reacción, tiempo para el cambio de carril, etc. A continuación se detallan los datos que son requeridos para definir el panorama de la simulación.

# 4.2.1. DISPOSICIÓN DE LA RED

El modelo de la red vial en AIMSUN está compuesto por diferentes secciones (calles, avenidas, redondeles), las cuales se conectan unas con otras a través de nodos (intersecciones), que tienen diferentes características de tráfico. Para editar el modelo de geometría de la red se necesitan los siguientes datos:

- Mapa del área, preferiblemente un mapa convertido a formato digital DXF o DWG.
- Detalles del número de carriles para cada sección, carriles reservados y carriles laterales.
- Posibles giros en cada intersección, incluyendo los detalles sobre los carriles en los cuales se puede realizar los giros.
- Límites de velocidad para cada sección

#### 4.2.2. DATOS DE LA DEMANDA DE TRÁFICO

La demanda de tráfico puede definirse de dos maneras diferentes. Flujos de tráfico en las secciones y Matrices Origen / Destino. Dependiendo del tipo de modelo de demanda seleccionado los datos que se requieren son:

#### 1.- Flujos de Tráfico

- Tipos de vehículos y sus atributos.
- Clase de vehículos para los carriles reservados.
- Flujos en las entradas de las secciones para cada tipo de vehículos.
- Porcentajes de giro en todas las secciones y por cada tipo de vehículos.

# 2.- Matrices Origen/Destino

- Definición de los centroides: fuentes de tráfico y salidas
- Tipos de vehículos y atributos
- Clase de vehículos para las líneas reservadas
- Número de viajes desde cada origen a cada destino.

#### 4.2.3. CONTROL DE TRÁFICO.

Existen diferentes maneras de controlar el tráfico en AIMSUN: semáforos, señales de ceda el paso y rampas de medición. Los primeros y los segundos se utilizan en las intersecciones y el tercero se utiliza en las secciones y al finalizar el nodo. Los datos que se requieren son:

- Intersecciones señalizadas: localización de las señales de control, grupos de las señales en los cuales se agrupan los movimientos de giro, la secuencia de fases.
- Intersecciones no señalizadas; definición de las reglas de la prioridad y localización de las señales de pare.
- Medición de la rampa: localización, tipo de medición, parámetros del control (tiempo de verde, tiempo de flujo o tiempo de retardo).

#### 4.2.4. DETECTORES

Como se mencionó en el Capitulo 3 existen una variedad de sensores, que en el simulador son conocidos como detectores, cuyas características y diferencias están basadas en la capacidad de las medidas de las variables de tráfico que pueden realizar. Las mediciones que presenta son: aforo, presencia, velocidad,

ocupación, densidad, la capacidad de distinguir la diferencia entre tipos de vehículos. La ubicación de estos detectores en el modelo puede estar en cualquier lugar de la vía y puede ocupar un carril o todo el ancho de la vía [3].

Para la recolección de datos de aforo se utilizan los detectores para simular a los sensores reales o las mediciones manuales.

#### 4.2.5. TRANSPORTE PÚBLICO

Para definir el transporte público se necesitan los siguientes datos:

- Líneas de transporte público: el conjunto de secciones que componen la ruta de los buses.
- Carriles reservados
- Paradas de buses: localización, longitud y tipos de paradas de bus en la red.
- Localización de las parada de buses de transporte publico
- Horarios: salidas programadas, tipo de vehículos y tiempo de parada para cada parada

# 4.3.RESULTADOS DISPONIBLES

AIMSUN tiene como salidas de la simulación: la animación en 2D y 3D, la información del vehículo y del control durante la simulación, genera resultados estadísticos y brinda datos generados en los detectores que se colocan en la simulación mediante series de tiempo.

Así también brinda un conjunto de salidas gráficas y mediante tablas, tras la ejecución de la simulación entre las que se puede mencionar:

- Flujos
- Flujos por carril
- Velocidades
- Velocidades máximas

- Tiempo de viaje
- Paradas
- Máxima longitud de Cola
- Longitud media de colas
- Flujo / capacidad
- Densidad por carril

Las gráficas y tablas mencionadas se pueden obtener dependiendo si es una sección, un detector, un nodo o si son valores estadísticos.

- Sección, tiempo de retardo, densidad flujo, consumo de combustible, máxima longitud de la cola, longitud promedio, velocidad, tiempo de parada o de viaje.
- Detectores: contador, densidad, ocupación y velocidad.
- Nodos: nivel de servicio (LOS Level Of Service).
- Datos Estadísticos: tiempo de retaso, flujos, velocidad, tiempo de viaje o de parada.

# 4.4.IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO AV. 12 DE OCTUBRE Y CALLE ROCA

#### **4.4.1. EDICIÓN.**

Lo primero que se debe hacer en AIMSUN es crear un nuevo modelo de Simulación en Archivo/Nuevo, luego determinar las preferencia que tendrá el modelo como son las unidades de medida, el sentido de circulación, etc.

Después de definir las preferencias que tendrá el modelo, se importa el mapa sobre el cual se dibujará la zona a simular. Esto se realiza en Archivo/Importar/Archivo de dibujo de Autocad; se escoge las unidades y el mapa se carga en AIMSUN (figura 4.1).

Luego se procede a dibujar la zona de estudio con la ayuda de la barra de dibujo de AIMSUN y se crean las secciones.

Una vez creadas las secciones, se crea el nodo (intersección) con todas las posibilidades de giro que existen, en la figura 4.3 se puede observar los resultados.

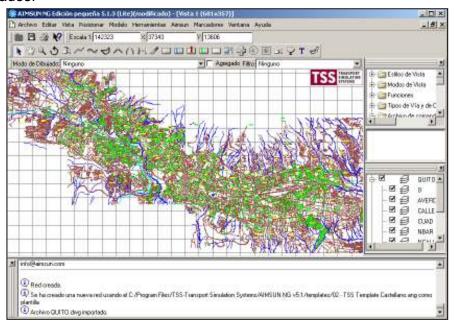


Figura 4.1 Mapa de Quito

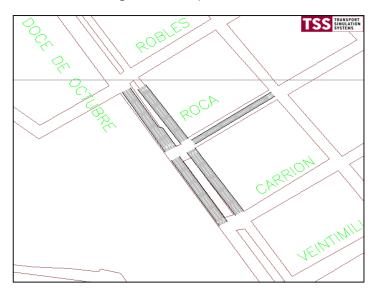


Figura 4.2 Secciones de la zona de estudio

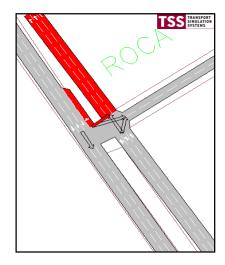


Figura 4.3 Creación de la Intersección

Una vez creada la zona de estudio se deben crear los Grupos semafóricos, ya que esta intersección está controlada por semáforos.

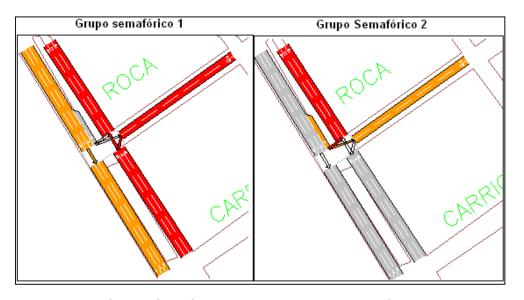


Figura 4.4 Grupos Semafóricos de la intersección 12 de Octubre y Roca

# 4.4.2. PLAN DE CONTROL.

En el Plan de Control es necesario definir las fases que existen en la intersección, para ello hay que crear el Plan de Control en Modelo/ Nuevo/Plan de Control. Luego de esto en la ventana del nodo en la etiqueta Control se define:

- El tipo de control, que para éste caso es fijo
- La duración del ciclo del semáforo, de las medidas realizas se encontró que la duración del ciclo del semáforo es de 74 seg., con una duración de verde de 54 seg., para el grupo de 1 y de 18 seg., de verde para el grupo 2.
- El tiempo de ámbar o amarillo de 2 seg.
- Los valor de inicio y duración de cada fase (tabla 4.1)

Tabla 4.1 Duración de las fases

Grupo Semafórico	Inicio	Duración
Grupo 1	0	54
Grupo 2	57	21

# 4.4.3. ESTADO DEL TRÁFICO Y DEMANDA DE TRÁFICO

En AIMSUN se puede representar la demanda de tráfico mediante el Estado del Tráfico o utilizando las Matrices de viaje Origen/ Destino. Para este caso se trabaja con el Estado del Tráfico para lo cual se necesita los flujos vehiculares para las entradas de la zona de estudio y los porcentajes de giro. Estos datos fueron recolectados con la ayuda del Sistema Traficam y de Mediciones manuales que se realizaron el día 26 de Octubre a las 12h00 en la zona de estudio. En la figura 4.5 se muestra estos datos.

También en el Estado del Tráfico se puede definir el día de la semana, el tipo de clima, estación y si existe algún evento que modifique el tráfico. Una vez definido el Estado del Tráfico es necesario crear la Demanda de Tráfico para esto se debe ir a Modelo/ Nuevo /Demanda de Tráfico.

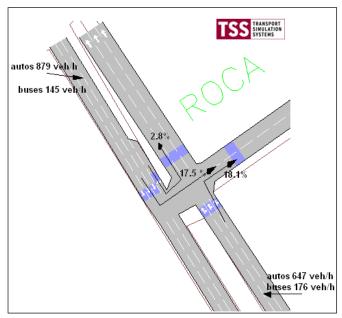


Figura 4.5 Estado del Tráfico

# 4.4.4. PLAN DE CONTROL MAESTRO

El plan de control maestro es el conjunto de planes de control que se tienen en la red vial, para crear este Plan de control maestro debe ir a Modelo / Nuevo / Plan de Control maestro. Es necesario definir la hora de inicio y la duración de la simulación.

#### 4.4.5. SIMULACIÓN.

Para simular la red vial es necesario crear un Escenario, para ello se debe ir a Modelo /Nuevo/Escenario El escenario crea por defecto un Experimento. En el escenario creado se configura la Demanda de Tráfico y el Plan de Control Maestro, además se indica cada cuanto tiempo se debe hacer la recolección de datos.

# 4.5. ANALSIS DE TRÁFICO VEHICULAR

Para la realización de la investigación se establecieron tres zonas de estudio, considerando las diferentes geometrías que existen en la red vial, las cuales son:

 Zona 1, denominada Av. 12 de Octubre y la intersección con la calle Roca (figura 4.6), para modelar esta zona se utilizó los datos recolectados por el sistema desarrollado con las cámaras Traficam.

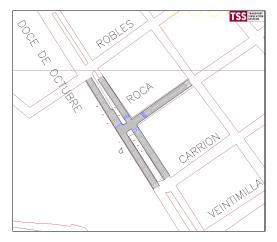


Figura 4.6 Zona 1 Av. 12 de Octubre y Roca

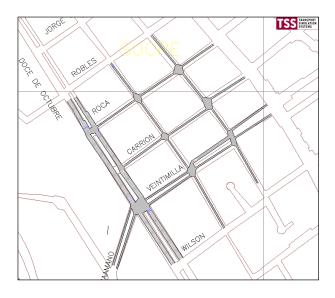


Figura 4.7 Zona 2 EPN – PUCE

Zona 2, denominada EPN-PUCE comprendida entre la Av. 12 de Octubre,
 Av. Veintimilla y Calle Roca. (figura 4.7), los datos necesarios para modelar esta zona se recolectaron manualmente y con el sistema de cámaras

 Zona 3, denominada Av. Colón, comprendida desde la Av. 6 de Diciembre hasta la Av. 10 de Agosto. (figura 4.8), para crear el modelo en el simulador de AIMSUN se utilizó datos entregados por EMSAT y también datos recolectados manualmente.

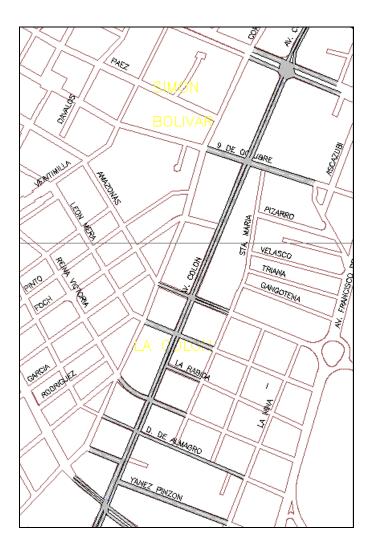


Figura 4.8 Zona 3. Av. Colón

 Zona 4. denominada Redondel de la Av. 10 de Agosto y Av. NNUU (figura 4.9), para establecer el modelo de esta zona se contó con datos entregados por el EMSAT y datos que se tomaron manualmente.

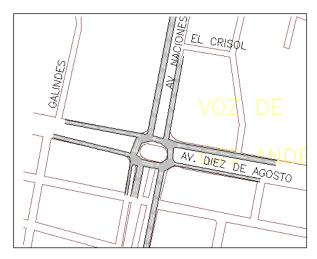


Figura 4.9 Zona 4 Redondel NNUU

El análisis de tráfico en las diferentes en las diferentes zonas se realiza para determinar el comportamiento dinámico del sistema, basado en los diferentes datos que entrega el simulador. También se genera un incidente en un tramo de vía del sistema y se analiza los resultados de los modelos bajo esta condición, para luego poder establecer un criterio de control adecuado, basado en el control de señales de tránsito (semáforos, cambio de velocidad, cambio de dirección de un carril, etc.).

# 4.6. VALIDACIÓN DEL SIMULADO USANDO ANÁLISIS ESTADISTICO

Como se ha mencionado anteriormente el comportamiento del tráfico vehicular es estocástico y este comportamiento se reproduce en el simulador de AIMSUN en cada realizaciones del proceso simulado, la forma para determinar si son suficientemente cercanas las realizaciones y los valores obtenidos en las mediciones se requiere de la utilización de técnicas estadísticas, como la prueba de hipótesis nula, la cual recomienda AIMSUN [4].

Para esta prueba se obtiene la diferencia entre los datos de aforos simulados  $w_i$  y los datos de Aforo medidos con las cámaras  $v_i$ , a este conjunto de datos denominados  $d_i$ :

$$d_i = w_i - v_i$$
,  $i = 1, 2, ..., n$ 

Se obtiene la media  $\overline{d_i}$  y la varianza  $\overline{s_d}$ , con estos datos se encuentra la t experimental mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{t}_{n-1} = \frac{\overline{d_i} - \delta_i}{\overline{s_d} / \sqrt{n}}$$

Donde:  $\delta_i$  es el valor esperado de  $\overline{d_i}$ ,  $\overline{s_d}$  es la desviación estándar de  $\overline{d_i}$ . Para la prueba de hipótesis nula, se tiene:

$$H_0: \delta_i = 0 \quad (|\overline{t}_{n-1}| > t_{\alpha/2})$$

- a) Si para  $\delta_i=0$ , el valor calculado  $t_{n-1}$  de la distribución t-Students es significativo, para el nivel  $\alpha$  se debe concluir que el modelo no está reproduciendo el comportamiento del sistema en forma adecuada, por lo que se debe rechazar al modelo.
- b) Si para  $\delta_i = 0$ , se tiene un valor  $t_{n-1}$  insignificante, entonces se concluye que la simulación y los valores reales son prácticamente los mismos, por lo que la simulación es válida.

#### 4.7.INDICES

Una vez que se aplica las diferentes alternativas de control se utiliza índices que permita analizar la efectividad de las acciones tomadas, para ello se define a continuación el Nivel de Servicio tanto para las secciones como también para las intersecciones desde el punto de vista de la literatura de Tráfico Vehicular como desde el punto de vista de AIMSUN.

#### 4.7.1. NIVEL DE SERVICIO [5]

El Nivel de Servicio es la forma general de evaluar el desempeño de cierta infraestructura desde el punto de vista del usuario. La calidad del nivel de servicio refleja dos aspectos importantes: primero hace referencia al grado de disponibilidad de la infraestructura en ciertos periodos y lugares y el segundo aspecto, habla de la comodidad y conveniencia (calidad) del servicio proporcionado a los usuarios.

En 1965 en el HCM Highway Capacity Manual, se estableció cinco niveles de servicio para los distintos tipos de vías A, B, C, D, E, F. El HCM estima el nivel de servicio para un punto o un tramo uniforme de un carril o calzada durante 15 minutos [5].

En vías de circulación continua el nivel de servicio A cae normalmente dentro del régimen de flujo libre, cuando la interacción vehicular no afecta significativamente la velocidad de los vehículos. El nivel F representa las condiciones de flujo forzado, esta situación se da cuando una cantidad de tráfico que se acerca a un punto excede la cantidad que puede pasar por él, también en lugares donde se forman colas, donde la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque extremadamente inestables. Los niveles B, C, D, y E son niveles intermedios que se ubican dentro de los regímenes de flujo libre y restringidos.

El nivel de servicio se define por uno o más parámetros que varían de acuerdo al tipo de vía de que se trate. En la tabla 4.2 se muestran distintos parámetros que usa la versión de HCM del 2000 para determinar los niveles de servicio.

Tabla 4.2 Parámetros que determinan los niveles de servicios en HCM-2000

Tipo de Estructura	Parámetros
Autopistas:	
Secciones Básicas	Densidad y Velocidad
Tramos de Entrecruzamiento	Densidad y Velocidad
Rampas de convergencia y divergencia	Densidad
Carreteras de múltiples carriles	Densidad y Velocidad
Carreteras de dos carriles	Velocidad
Intersección con semáforo	Demora
Intersecciones de Prioridad	Demora
Arteria	Velocidad
Peatones	Espacio, Eventos y Demoras
Bicicletas	Eventos y Demoras

#### 4.7.1.1. Nivel de Servicio en tramos de carretera

El concepto de nivel de servicio se define como la medida cualitativa que describe las condiciones de circulación de una corriente vehicular, caracterizada generalmente por ciertos parámetros como velocidad y tiempo de recorrido, libertad para maniobrar, interrupciones de circulación, comodidad y seguridad.

Aunque el nivel de servicio sea una medida cualitativa, se define por medio de un parámetro numérico tal como la velocidad media o la densidad y a veces por más de un parámetro. En el nivel de servicio influye la intensidad de la interacción vehicular, las condiciones de la vía, su entorno, la calidad de la regulación y señalización vial.

A continuación se describen las diferentes condiciones de nivel de servicio en las secciones de vías según la clasificación del HCM.

Nivel de Servicio A: describe el funcionamiento a flujo libre. La operación de los vehículos no se encuentra perturbada por la presencia de otros vehículos ni las operaciones se encuentran restringidas por las condiciones geométricas. La maniobrabilidad con el tráfico es buena, los efectos de incidentes menores o averías en un punto son fácilmente absorbidos en este nivel sin cambiar la velocidad de viaje.

Nivel de Servicio B: este nivel de servicio también indica el flujo libre, aunque la presencia de otros vehículos se vuelve notable. Las velocidades medias de viaje son igual en el nivel de servicio A, pero los conductores tienen menos libertad para maniobrar. Todavía se absorben fácilmente las rupturas menores locales en un punto, el deterioro en el nivel de servicio es más obvio.

Nivel de Servicio C, marca la influencia de densidad de tráfico en el funcionamiento. La habilidad de maniobrar dentro de la corriente de tráfico está claramente afectada por la presencia de otros vehículos. En las vías multicarriles con una velocidad a flujo libre, es sobre los 80Km/h, las velocidades se reducen un poco. Las rupturas menores pueden causar un deterioro local serio en el

servicio y se puede formar colas detrás de cualquier ruptura de tráfico significativa.

Nivel de Servicio D: la habilidad de maniobrar se restringe severamente a la congestión de tráfico. La velocidad de viaje está reducida debido al aumento del volumen creciente. Solo rupturas menores pueden ser absorbidas sin formación de de colas extensas y el servicio está seriamente deteriorado.

Nivel de Servicio E: este nivel de servicio representa el funcionamiento cercano de la capacidad de la vía, es un nivel inestable. Las densidades varían, mientras dependan de la velocidad a flujo libre que experimenta la corriente de tráfico. Los vehículos se encuentran operando con un mínimo espaciamiento para mantener un flujo uniforme. No pueden disiparse las rupturas prontamente y se producen a menudo colas que llegan a deteriorar el nivel de servicio a F. Para la mayoría de vías multicarriles con velocidad a flujo libre entre 70 y 100 Km/h, la velocidad media de los vehículos livianos se registra en el rango de 68 a 88Km/h pero es muy inconstante e imprevisible. En las figuras 4.10 ,4.11, 4.12, se muestran los diferentes niveles de servicios para vías multicarriles, autopistas, vías de dos carriles [5].

Nivel Servicio F: representa condiciones de flujo forzado o de ruptura. Ocurre cuando los vehículos que llegan son mayores que la proporción a que ellos se descargan o cuando la demanda de previsión excede la capacidad computada de un medio planeado. El funcionamiento dentro de las colas es muy inestable, con vehículos que experimentan periodos breves de movimientos seguidos por bloqueos. Las velocidades de viaje dentro de las colas generalmente son menores a los 48 Km/h.

# **LEVELS OF SERVICE**

for Two-Lane Highways

Level of Service	Flow Conditions	Operating Speed (mph)	Technical Descriptions
A		55+	Highest quality of service. Free traffic flow with few restrictions on maneuverability or speed. <b>No delays</b>
B		50	Stable traffic flow. Speed becoming slightly restricted. Low restriction on maneuverability.  No delays
C		45	Stable traffic flow, but less freedom to select speed, change lanes or pass. Minimal delays
D	10 M	40	Traffic flow becoming unstable. Speeds subject to sudden change. Passing is difficult.  Minimal delays
E	OFF CO.	35	Unstable traffic flow. Speeds change quickly and maneuverability is low. Significant delays
E	of the contract of the contrac		Heavily congested traffic. Demand exceeds capacity and speeds vary greatly. Considerable delays

Source: 2000 HCM, Exhibit 20-2, LOS Criteria for Two-Lane Highways in Class 1

Figura 4.10 Nivel de Servicio para una vía de dos carriles

# 4.7.1.2. Nivel de Servicio en intersecciones controladas por semáforos.

El nivel de servicio está definido en términos de demora, siendo ésta una medida que refleja la molestia y la frustración del conductor, el consumo del combustible y la pérdida de tiempo en su viaje. Estos términos de servicio se han establecido en términos de la demora promedio por parada por vehículo. La demora es una medida compleja y depende de un número de variables que incluyen: la calidad

de la sincronía, la duración del ciclo y la relación de verde para un grupo de carriles o accesos de estudio.

# **LEVELS OF SERVICE**

for Multi-Lane Highways

Level of Service	Flow Conditions	Operating Speed (mph)	Technical Descriptions
A		60	Highest level of service. Traffic flows freely with little or no restrictions or maneuverability. No delays
В		60	Traffic flows freely, but drivers have slightly less freedom to maneuver. No delays
C	8 8 8	60	Density becomes noticeable with ability to maneuver limited by other vehicles. Minimal delays
D		57	Speed and ability to maneuver is severely restricted by increasing density of vehicles. Minimal delays
E		55	Unstable traffic flow. Speeds vary greatly and are unpredictable. Minimal delays
F		<55	Traffic flow is unstable, with brief periods of movement followed by forced stops.  Significant delays

Source: 2000 HCM, Exhibit 21-3, Speed-Flow Curves with LOS Criteria for Multi-Lane Highways

Figura 4.11 Nivel de Servicio para vías multicarriles

# 4.7.1.3. Nivel de Servicio en intersecciones no señalizadas.

Los niveles de servicio se definen según los valores expresados en la tabla 4.4, los cuales se encuentran en función de la demora total promedio, que se define como el tiempo total transcurrido desde cuando un vehículo se detiene al final de

la cola hasta que el vehículos pasar del extremo final de la cola a la primera posición.

# **LEVELS OF SERVICE**

for Freeways

Level of Service	Flow Conditions	Operating Speed (mph)	Technical Descriptions
A		70	Highest quality of service. Traffic flows freely with little or no restrictions on speed or maneuverability.  No delays
В		70	Traffic is stable and flows freely. The ability to maneuver in traffic is only slightly restricted.  No delays
C		67	Few restrictions on speed. Freedom to maneuver is restricted. Drivers must be more careful making lane changes. Minimal delays
D	A	62	Speeds decline slightly and density increases, Freedom to maneuver is noticeably limited. Minimal delays
E		53	Vehicles are closely spaced, with little room to maneuver. Driver comfort is poor.  Significant delays
F		<53	Very congested traffic with traffic jams, especially in areas where vehicles have to merge.  Considerable delays

Source: 2000 HCM, Exhibit 21-3, Speed-Flow Curves with LOS Criteria

Figura 4.12 Nivel de Servicio para Autopistas

**Tabla 4.3** Descripción de los niveles de servicio para intersecciones controladas con semáforo

Nivel de	Características de Operación	Demora
Servicio		(segundos)
Α	Baja demora, sincronía extremadamente favorable y ciclos cortos, los vehículos no se detienen	≤ 10
В	Ocurren con una buena sincronía y ciclos cortos, los vehículos empiezan a detenerse	> 10 – 20
С	Ocurre con una sincronía la regular y/o ciclos largos, los ciclos en forma individual empiezan a fallar.	> 20 – 35
D	Empieza a notarse la influencia de congestionamientos ocasionados por un ciclo largo y/o una sincronía desfavorable o relaciones v/c altas, muchos vehículos se detienen	> 35 – 55
E	Es el límite aceptable de la demora: indica una sincronía muy pobre, grandes ciclos y relaciones v/c mayores, las fallas en los ciclos son frecuentes.	> 55 – 80
F	El tiempo de demora es inaceptable para la mayoría de los conductores ocurren cuando las valores de flujo exceden a la capacidad de la intersección o cuando las relaciones v/c son menores de 1 pero con una sincronía muy pobre y/o ciclos demasiados largos.	> 80

La demora total promedio para cualquier movimiento secundario está en función de la capacidad de acceso y el grado de saturación.

**Tabla 4.4** Descripción de los niveles de servicio para intersecciones con prioridad de "pare"

Nivel de Servicio	Demora (seg/veh)
Α	0 - 10
В	> 10 – 15
С	> 15 – 25
D	> 25 – 35
E	> 35 – 50
F	> 50

#### 4.7.1.4. Nivel de Servicio en AIMSUN

En el simulador de AIMSUN, se calcula el Nivel de Servicio en base de la sumatoria del tiempo de demora y de los flujos, este valor solo se lo puede obtener en las intersecciones, la ecuación que rige este parámetro es:

$$NS = \frac{\sum tiempo\ demora * flujos}{\sum flujos}$$

En la tabla 4.5 se presentan valores referenciales de los parámetros que se observan para determinar, en este estudio, valores aceptables y críticos, que pueden ser útiles para obtener índices de Nivel de Servicio en las zonas urbanas; lo que permite establecer un criterio de eficacia del sistema de tráfico vehicular.

Tabla 4.5 Valores de variables para definición de indicadores de Nivel de Servicio

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

# 4.8.CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR

Las áreas en las cuales se puede realizar una acción de control y que pueden alterar el flujo de tráfico vehicular efectivamente son semáforos, velocidad limite, cambio de sentido de circulación, etc.

#### 4.8.1. SEMÁFOROS

Los semáforos tienen una enorme incidencia en el control del flujo de tráfico vehicular, además de que son fáciles de controlar, ya que se pueden usar para limitar el paso a una vía y dar acceso a otra congestionada. Hay dos aspectos, que en la conducta de los semáforos, se pueden variar para realizar el control.

- Cambiar el ciclo, el tiempo que hay de rojo a rojo para una dirección dada.
- Cambiar el tiempo de cada fase, que es una porción del ciclo que tiene un color determinado.

En esta Tesis el control se lo realizará en los semáforos aplicando las técnicas mencionadas en el apartado 2.2.

#### 4.8.1.1. Sistemas sin semaforización (pare y ceda el paso)

Se utilizada en la mayoría de las intersecciones de calles secundarias de la red vial. Las señales de "pare" y "ceda el paso" se utilizan para asignar el derecho de paso a una vía. Esta estrategia, obliga a los conductores de la vía controlada, a seleccionar los espacios entre vehículos del flujo de la vía principal para hacer las maniobras de cruce o de giro. Para la implementación de esta alternativa de control en el simulador se asigna a la vía la señalización en el nodo de la intersección. Estas señales de tránsito se pueden observar en la vista 2D y en la 3D como se ve en la figura 4.13.

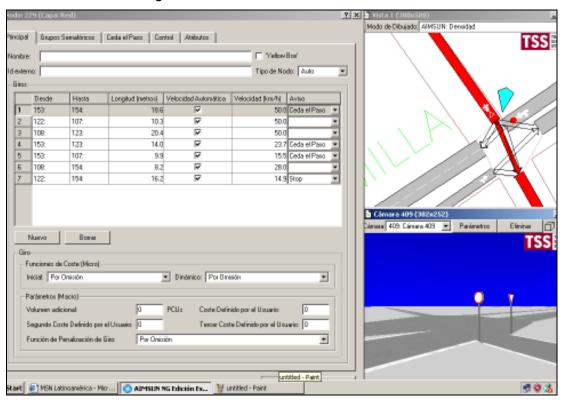


Figura 4.13. Señal de "Pare" y "Ceda el Paso" en AIMSUN

#### 4.8.1.2. Sistemas de ciclo y fases de duración prefijada [2]

Este sistema utiliza el control del tráfico para regular la circulación haciendo detener y proseguir el tránsito de acuerdo a una programación de tiempo determinada o a una serie de programaciones establecidas.

Las características de operación de los semáforos de tiempo fijo o predeterminado, tales como, duración del ciclo, intervalo, secuencia, desfasamiento, etc., pueden ser cambiadas de acuerdo a un programa determinado.

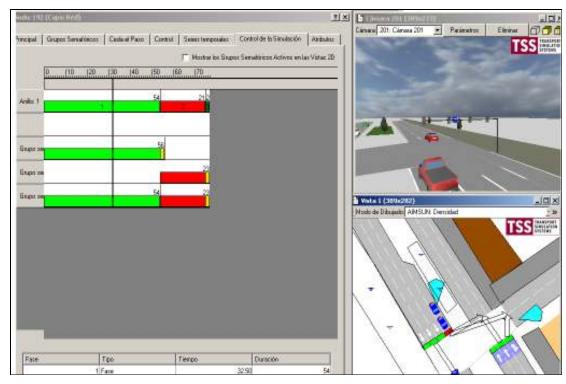


Figura 4.14 Semáforos en 2D y 3D

Estos se adaptan mejor a las intersecciones en donde los patrones del tráfico son relativamente estables y constantes, o en donde las variaciones del tráfico que se registran pueden tener cabida mediante una programación pre-sincronizada sin causar demoras o congestión no razonables, puesto que es un control en lazo abierto que debe ser cuidadosamente calibrado.

Este tipo de semáforo se debe instalar y operar solamente si se satisfacen uno o más de los requisitos o condiciones siguientes:

- Condición A: Volumen mínimo de vehículos. La condición de volumen mínimo de vehículos, se entiende que es para ser aplicada donde el volumen de tráfico intersectante es la razón principal para considerar la instalación de un semáforo.
- Condición B: Interrupción del tráfico continúo. La condición de interrupción del tráfico continuo se entiende que es para ser aplicada en donde las condiciones de operación de una calle sean tales, que el tráfico de la calle secundaria sufra un retardo o riesgo indebido al entrar en la calle principal o al cruzarla.
- Condición C: Volumen mínimo de peatones. Se satisface esta condición, si durante un día representativo en la calle principal se verifican los siguientes volúmenes de tráfico, para un período de dos horas:
  - a) Si entran 1200 o más vehículos en la intersección (total para ambos accesos), o si 1.600 o más vehículos entran a la intersección en la calle principal.
  - b) Si durante el mismo período pico, cruzan 250 o más peatones en el cruce de mayor volumen correspondiente a la calle principal.
- Condición D: Movimiento o circulación progresiva. El control del movimiento progresivo a veces demanda la instalación de semáforos en intersecciones, en donde bajo otras condiciones no serían necesarios, con el objeto de regular eficientemente las velocidades de grupos compactos de vehículos. Se satisface el requisito correspondiente a movimiento progresivo en los dos siguientes casos:
  - En calles con circulación en un solo sentido o en calles en las que prevalece la circulación en un solo sentido y en las que los

semáforos adyacentes están demasiado distantes para conservar el agrupamiento compacto y las velocidades deseadas de los vehículos.

- En las calles de doble sentido de circulación, cuando los semáforos adyacentes no proveen el adecuado agrupamiento de vehículos ni el control de la velocidad y el semáforo propuesto, junto con los adyacentes pueden conformar un sistema progresivo de semáforos.
- Condición E: Antecedentes y experiencia sobre accidentes. La opinión general de que los semáforos reducen considerablemente el número de accidentes, rara vez se comprueba en la práctica. En algunos casos, ocurren más accidentes después de instalar los semáforos que antes de su instalación. Por lo tanto, si ninguno de los requisitos, exceptuando el relativo a los accidentes, se satisface, debe suponerse que no será necesario instalar el semáforo.
- Condición F: Combinación de las condiciones anteriores.

Cuando ninguno de los requisitos anteriores se cumplen en un 100%, pero dos o más se satisfacen en un 80% del valor indicado para cada uno de ellos, se puede considerar justificada la instalación de semáforos.

Las decisiones en estos casos excepcionales deben apoyarse en un análisis completo de todos los factores que intervienen, debiendo estudiarse la conveniencia de emplear otros métodos que ocasionen menos demoras al tráfico.

#### 4.8.1.3. Sistemas coordinados en "ondas verdes"

En un sistema coordinado en "ondas verdes", todos los semáforos muestran la misma indicación a lo largo de la vía aproximadamente al mismo tiempo. Este es uno de los primeros tipos de sistemas de semáforos importantes en la práctica moderna.

En todas las intersecciones, la sincronización esencialmente es la misma y las indicaciones cambian simultáneamente o casi al mismo tiempo, de manera que todos los semáforos indiquen luz verde en la dirección de la calle principal y luz roja en todas las calles secundarias.

Si únicamente se trata de coordinar hasta cinco intersecciones muy próximas entre sí, deberá emplearse este sistema, dejando un tiempo de luz verde suficiente en la calle principal para permitir que pase una proporción mayor de la circulación y despeje las intersecciones.

Cuando la intensidad del tráfico es alta, el sistema simultáneo puede dar buenos resultados. Cuando el volumen de tráfico es bajo, este sistema no es recomendable, debido a que se propician altas velocidades entre tiempos de luz verde y la velocidad media resulta baja debido a la detención simultánea de todo el tráfico a lo largo de la vía, lo cual impide el movimiento continuo.

# 4.8.1.4. Sistemas adaptables automáticamente a la demanda ("Actuated Control") [6]

Los controles adaptables a la intensidad del tráfico, totalmente accionados por éste, permiten que el intervalo correspondiente a los lapsos entre el paso de vehículos sucesivos que exceden los tiempos prefijados para cada una de las calles disminuya durante cada fase, de acuerdo con ciertos factores de circulación.

Por tanto, la probabilidad de que el intervalo de luz verde termine y ceda el derecho de paso a la calle transversal aumenta proporcionalmente a la disminución del tráfico que circula con luz verde, al transcurso del tiempo durante el cual se tienen vehículos detenidos con las indicaciones de luz roja y al número de los mismos. Estos y otros factores hacen que el control de este tipo sea más sensible a las demandas de circulación con amplias variaciones de intensidad puesto que es un control en lazo cerrado. En el sistema de control adaptable a la densidad del tráfico, el cambio de una combinación de tiempos a otra se efectúa rápidamente y con interferencia mínima para el tráfico que circula durante el

cambio. Este sistema permite una gran flexibilidad para lograr la coordinación efectiva de circulación tanto en una vía como en una red de calles.

En el simulador de AIMSUN se puede implementar este control, para ello se debe cambiar el tipo de Plan de Control a Plan de Control Actuado (figura 4.15) y configurar los siguientes parámetros:

- Recall, tiene como propósito activar una fase determinada, puede ser No:
   no llamar, Min: llamada mínimo, Max o Coord: fases coordinadas.
- Verde mínimo, es el tiempo más pequeño que se asigna a la fase de verde.
- Verde inicial máximo, es el valor máximo que puede dar a la fase de verde.
- Segundos por actuación, son los segundos que se adiciona al Verde mínimo por cada activación registrada durante los amarillos previos y todos los tiempos de rojo de la fase.
- Tiempo de Paso, el valor máximo inicial permitido entre las actuaciones sin perder el verde.
- Mínimo Espacio, el mínimo espacio aceptable entre vehículos especificado por el usuario.
- Tiempo antes de la reducción, el tiempo que se tiene antes de empezar a reducir el espacio.
- Tiempo para reducir, es tiempo promedio para reducir el posible espacio desde el tiempo de paso y el mínimo espacio. [4]

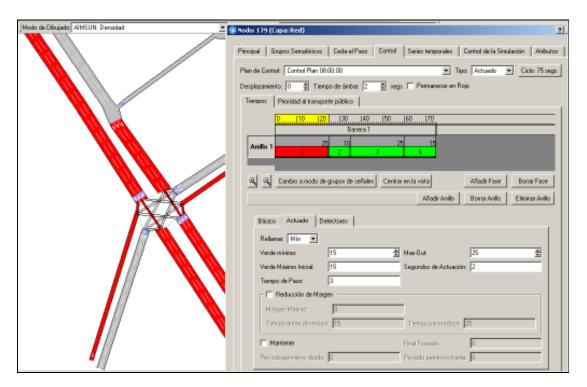


Figura 4.15 Parámetros del Control Actuado

### 4.8.1.5. Sistemas semafóricos utilizando API.

AIMSUN tiene una arquitectura abierta que permite al usuario crear una interfaz con el simulador lo cual permite intercambiar información y modificar el estado dinámico de la simulación [7].

Por medio del API se crea una aplicación externa en la cual se decide el control o las acciones de administración que deben ser aplicadas al modelo, para ello se usan los detectores y la información estadística que genera el simulador; y, en base a estas se toma la acción a implementar, enviando esta información a los semáforos o a las señales visuales de mensajes.

Para que los semáforos puedan ser controlados debe activarse en el Plan de Control la opción de control externo, figura 4.15.

El modulo API (Application Program Interface) de AIMSUN tiene definido seis funciones de alto nivel para garantizar la comunicación entre el Simulador y el API de AIMSUN [7].

- AAPILoad(), se llama cuando se carga el modulo por el simulador de AIMSUN.
- AAPIInit(), se llama cuando el comienza la simulación y puede inicializarse de acuerdo con los requerimientos.
- AAPIManage(float time, float timeSta, float timTrans, float cicle), se llama en cada paso de simulación y se utiliza para solicitar la información de los detectores, información estadística de las secciones, vehículos. También se ejecuta la acción de control o las políticas de manejo.
  - Esta función recibe cuatro parámetros, el primero es el tiempo de simulación en segundos, el periodo de simulación en segundos, el tercero el tiempo transitorio que tiene el modelo y por ultimo el tiempo de simulación de cada paso de simulación
- AAPIPostManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle), se llama al final de cada ciclo.
- AAPIFinish(), se llama cuando finaliza la simulación y puede ser usada para finalizar cualquier tarea que el modulo haya iniciado.
- AAPIUnLoad(), se llama cuando el modulo ha sido descargado de AIMSUN.

En la figura 4.16 se observa como interactúa el AIMSUN con el modulo API de AIMSUN.

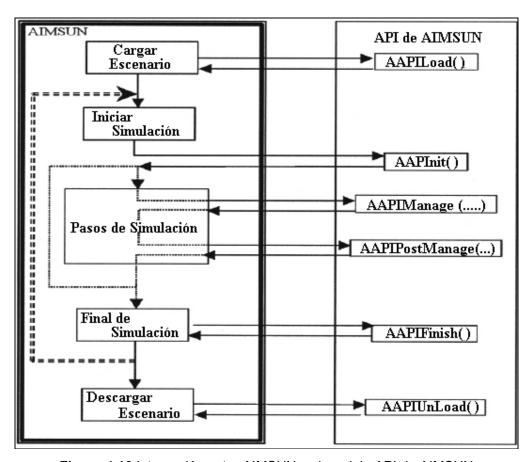


Figura 4.16 Interacción entre AIMSUN y el modulo API de AIMSUN

EL programa implementado para controlar la intersección de la Av. Colón y la Calle 9 de Octubre, tomando como variable de control la Máxima Longitud de Cola se detalla a continuación.

```
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include "ANGConProxie.h"
#include "AAPI.h"
#include <stdio.h>

int AAPILoad()
{
    return 0;
}
int AAPIInit()
{
    return 0;
}
```

```
int AAPIManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
      int x = 339:
      float t = ECIGetStartingTimePhase(x);// lee el tiempo de inicio de la fase
      StructAkiEstadSection z =
AKIEstGetParcialStatisticsSection(227,300,NULL);
      if (z.LongQueueMax >=4)
      int w=ECIChangeTimingPhase(x,1,61,t);// Cambia la duración de la fase
      int q= ECIChangeTimingPhase(x,3,36,t);//
      else
      int w=ECIChangeTimingPhase(x,1,46,t);
      int q = ECIChangeTimingPhase(x,3,51,t);
      }
          return 0;
int AAPIPostManage(float time, float timeSta, float timTrans, float acicle)
      return 0;
int AAPIFinish()
      return 0;
int AAPIUnLoad()
      return 0;
```

### 4.8.2. DIRECCIÓN DE LOS CARRILES

La dirección de ciertos carriles puede cambiar en la hora pico para mejorar el flujo de tráfico en una dirección dada. Esta acción de control requiere de la presencia de un carril extra. El problema de control óptimo del cambio de dirección de un carril resulta en un problema de optimización de enteros debido a que la variable de control es el número de carriles el cual debe ser evaluado como un número entero.

### 4.8.3. VELOCIDAD LÍMITE

La velocidad límite de una sección de carretera no se cambian generalmente, pero para ciertos casos se puede realizar como una medida de control. Esta estrategia de control trata de minimizar las diferencia de velocidades entre vehículos. Esto puede ser implementado con un sistema automatizado que provee a los conductores la velocidad deseada a través de mensajes en paneles puestos en la carretera o como una medida que es informada por la policía en un día festivo.

El control en la velocidad también se puede realizar aplicando sistemas inteligentes que envían la información de la velocidad máxima deseada a cada vehículo dependiendo de las condiciones de trafico, la localización del vehículo, las condiciones climáticas, este sistema puede ser de advertencia, voluntario u obligatorio.

Hay varias consideraciones en los modelos que no se toma en cuenta, como carriles reservados para el transporte público (Eco Vía, Trole); prioridad del transporte de vehículos de emergencia (ambulancias, bomberos, policía); estacionamiento de vehículos en las vías lo cual afecta flujo de tráfico vehicular; condiciones climáticas lluvia, niebla ,etc. las cuales afectan significativamente el tráfico.

### CAPÍTULO 5

# RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Anteriormente se ha hecho la conceptualización teórico bibliográfico, ahora se hace el trabajo de campo y la experimentación de laboratorio simulando la realidad física usando un simulador profesional que pueda ser utilizado en trabajos profesionales futuros para dar asesoramiento a instituciones públicas y privadas

Se desarrollan cuatro tipos de pruebas para realizar el análisis de tráfico en las diferentes zonas. Se realiza primeramente la validación de la Zona 1 debido a que se tienen datos medidos con las cámaras. También se analiza el comportamiento dinámico del sistema en todas las zonas de estudio debido a un incidente generado. Además se registran datos dinámicos como, flujos, tiempos y densidad para analizar el tipo de nivel de servicio que se tiene en las zonas sin la presencia de incidente y con incidente. Luego se analizan los resultados de los modelos bajo esta condición, para poder establecer un criterio de control adecuado basado en la regulación de las señales de tránsito de los semáforos.

### 5.1. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

### 5.1.1. VALIDACIÓN

La validación se la realizó en la Zona 1 debido a que se cuenta con los datos medidos por las cámaras utilizadas para esta investigación. La validación se la realiza utilizando el criterio establecido en el manual de AIMSUN [10], utilizando el Test de Hipótesis Nula, para esta zona se tienen diez mediciones cada 5 min.

En la Figura 4.6 se observan los datos de flujos de entrada que se ingresaron al modelo y también los porcentajes de giro. Una vez calibrado el modelo con estos datos, establecida la geometría vial y los detectores ubicados en los mismos

lugares donde se colocaron las zonas de las cámaras para la recolección de datos se procedió a la simulación.

Para realizar el Test de Hipótesis Nula como se describe en el apartado 4.6 es necesario determinar si los datos tiene una distribución normal. Se utiliza Matlab para determinar si los datos  $d_i$  tiene una distribución normal. En la figura 5.1 se observa el resultado obtenido; para ello se utiliza el comando *normplot* que permite determinar si los datos di se aproximan a una distribución normal, esto ocurre si se obtiene una gráfica lineal, lo cual ocurre, por lo tanto se pude utilizar el Test de la hipótesis nula utilizando la disctribución t-student.

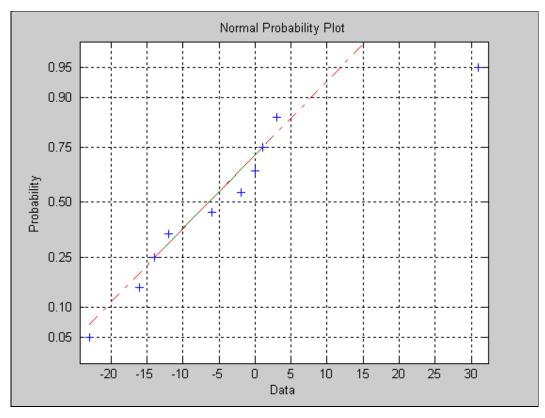


Figura 5.1 Gráfico de Probabilidad Normal

Para cuantificar este resultado se utiliza el comando *lillietest* el resultado de utilizar este comando no dice que no se puede rechazar la hipótesis nula lo cual refleja que los datos tienen una distribución normal o no se rechaza la hipótesis nula por falta de datos fehacientes.

>> [H,p]=lillietest(a)  

$$H = 0$$
  
 $p = 0.1512$ 

Una vez que se ha demostrado que se puede utilizar la prueba t – student, se procede a realizarla, en la tabla 5.1 se presenta los resultados de la prueba de hipótesis nula para los tres detectores.

Tabla 5.1 Resultados de Validación de la Zona 1

Detector 1: Av. 12 de Octubre (S-N)		Detector 2: Av. 12 de Octubre (N-S)			Detector 3: Roca			
Simulación	Manuales	Error	Simulación	Manuales	Error	Simulación	Manuales	Error
99	96	3	83	39	44	31	20	11
65	88	-23	53	44	9	17	34	-17
70	84	-14	60	44	16	20	27	-7
68	84	-16	64	77	-13	25	45	-20
85	91	-6	90	98	-8	29	31	-2
89	58	31	74	66	8	38	21	17
88	88	0	81	74	7	32	29	3
92	91	1	63	77	-14	32	27	5
82	94	-12	65	87	-22	35	33	2
80	82	-2	56	80	-24	26	35	-9
	Media di	-3,8		Media di	0,3		Media di	-1,7
	Desviación	14,9		Desviación	20,7		Desviación	11,7
	t experimental	0,808		t experimental	0,046		t experimental	0,458

La t – student con un nivel de significancía de 0.05 es de 2.228, al comparar este valor con los t experimentales se puede observar que se rechaza la hipótesis nula por lo tanto el modelo del simulador representa la realidad.

Se puede concluir entonces que el simulador de AIMSUN refleja la realidad; esto de debe a que se ha seguido todos los pasos de Calibración, los cuales consisten en reproducir la geometría vial de la zona tal cual es la realidad y la señalización que existe; señales de pare, semáforos, calibrados con las fases y ciclos reales; además de utilizar los datos de aforo y de flujo vehicular medidos en cada zona, por lo que se puede concluir que en Simulador de AIMSUN es confiable y robusto. Por lo tanto si se realiza la calibración adecuada reproduciendo la realidad de la geometría vial, de señalización, aforo y flujo vehicular se puede aceptar los modelos de las otras tres zonas como validados y que representan la realidad.

### 5.1.2. ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Para la prueba de Análisis de comportamiento dinámico se simuló las zonas por dos horas generando un incidente en una de las secciones del modelo a los 20 minutos de iniciada la simulación, como también se simuló sin generar un incidente para registrar datos de las variables que varían en el tiempo, como son flujo vehicular, máxima longitud de cola, densidad, velocidad y tiempo de parada para comparar y analizar el comportamiento dinámico de cada zona de estudio.

### 5.1.2.1.Determinación de las variables de control y de salida

La figura 5.2 muestra el lugar donde se ubica el incidente en la Zona 1. En las siguientes figuras se observa la comparación de las variables dinámicas del sistema de Máxima Longitud de Cola, Velocidad, Flujo y Ocupación.

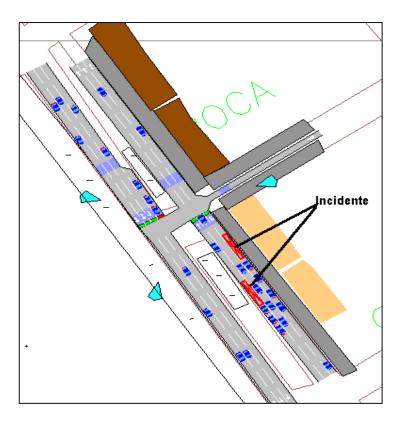


Figura 5.2 Zona 1 con el incidente generado

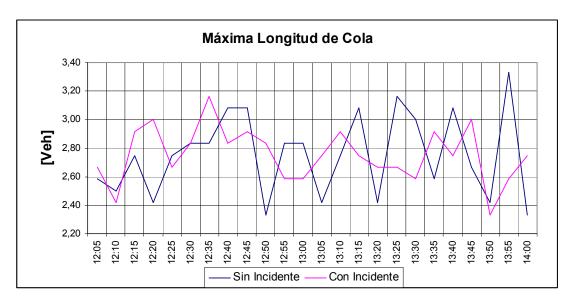


Figura 5.2 Máxima Longitud de Cola

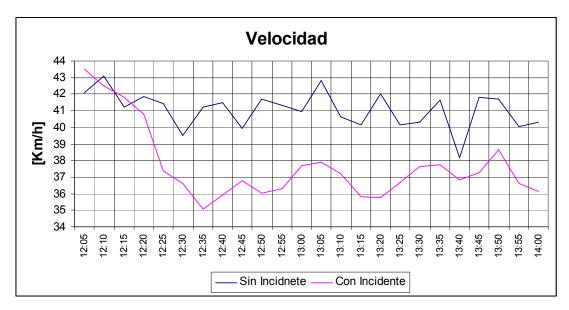


Figura 5.4 Velocidad en la sección del incidente

Como se observa en las gráficas la variable que presenta una variación sustancial al momento de generarse el incidente es la velocidad, la cual puede ser utilizada para realizar alguna acción de control. Para verificar si no existe otra variable que se afecte al momento del incidente, se incrementa el flujo vehicular al doble en el modelo de simulación, donde se registra que otra variable que se ve afectada es la Máxima Longitud de Cola (figura 5.7).

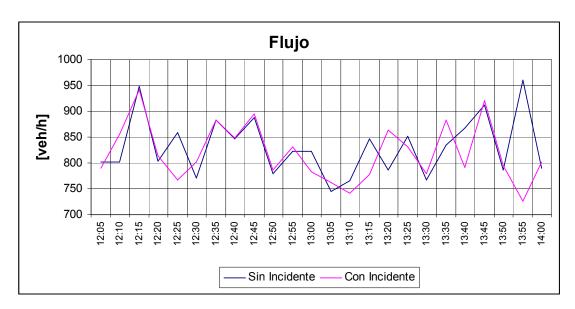


Figura 5.5. Flujo Vehicular



Figura 5.6 Ocupación

Tanto de la gráfica de la Velocidad (figura 5.4.) como la de Máxima Longitud de Cola (figura 5.7.), se puede ver que el sistema tiende a auto-regularse luego del incidente y llega a estabilizarse a un valor diferente de las condiciones iniciales.

Se presenta también en la figura 5.8 el tiempo de demora con incidente y sin incidente, obviamente se puede observar el incremento, por lo que puede tomar al tiempo de demora como la variable de salida.

De lo observado en las gráficas se toma como variables para controlar mediante el API (*Aplication Program Interface*) del AIMSUN a la Máxima Longitud de Cola y Velocidad.

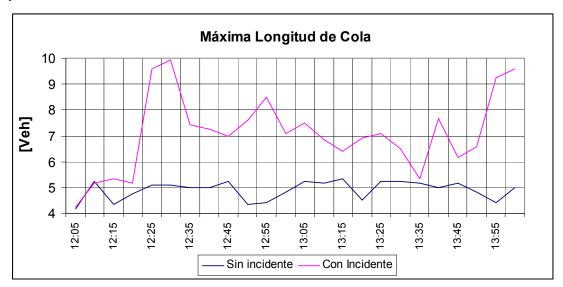


Figura 5.7. Máxima Longitud de Cola con el doble de Flujo Vehicular

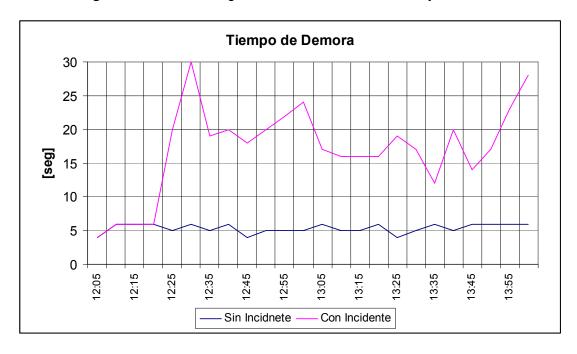


Figura 5.8. Tiempo de Demora

### 5.1.2.2. Tiempo de Establecimiento

Otras pruebas fueron realizadas para analizar el tiempo de establecimiento que tienen los sistemas de tráfico vehicular, para ello se generó el incidente en la Zona 1 por un tiempo de 40 min., esta prueba también se realiza en la Zona 3 ya que la primera es solo una intersección mientras que la segunda zona tiene más intersecciones que afecta a la zona de prueba, esto para observar si el tiempo de establecimiento es el mismo sin importar la complejidad de la geometría de la red vial.

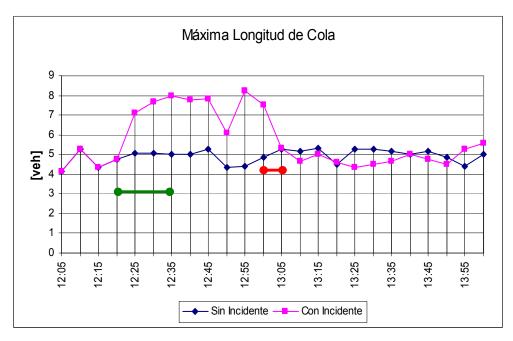


Figura 5.9 Máxima Longitud de Cola en la Zona 1

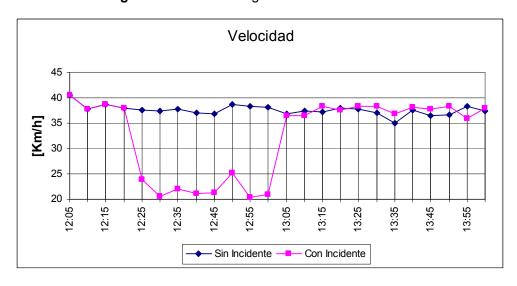


Figura 5.10 Velocidad en la Zona 1

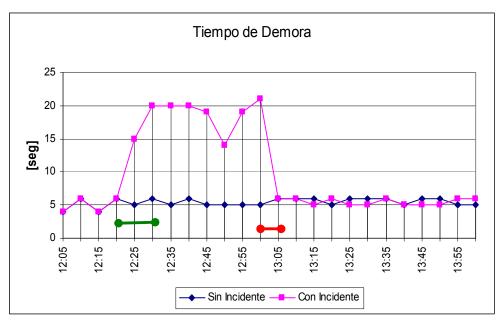


Figura 5.11 Tiempo de Demora en la Zona 1

De las figuras 5.9, 5.10, 5.11 se observa que el tiempo de establecimiento (verde) luego de generarse el incidente es de 10 en el tiempo de demora y de 15 min., en la Velocidad y Máxima Longitud de Cola; el tiempo en que el sistema se restablece (rojo) luego de desaparecer el incidente es de 5 min., para todas las variables analizadas.



Figura 5.12 Incidente en la Zona 3 Intersección Av. Colón Y 9 de Octubre

En la figura anterior se observa la sección en la cual se genero el incidente dentro de la Zona 3.

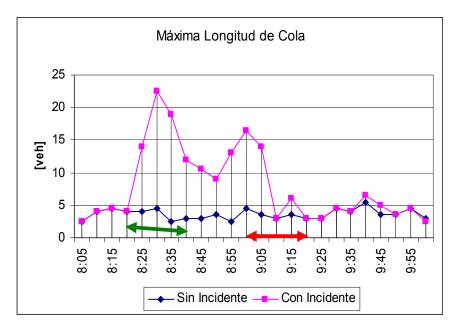


Figura 5.13 Máxima Longitud de Cola en sección del incidente en la Zona 3.

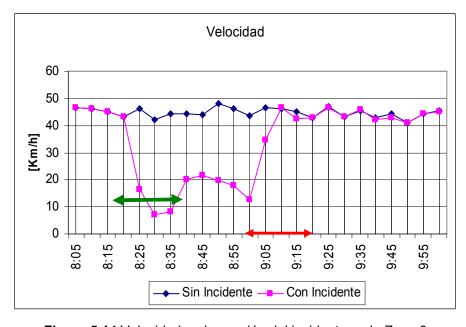


Figura 5.14 Velocidad en la sección del incidente en la Zona 3

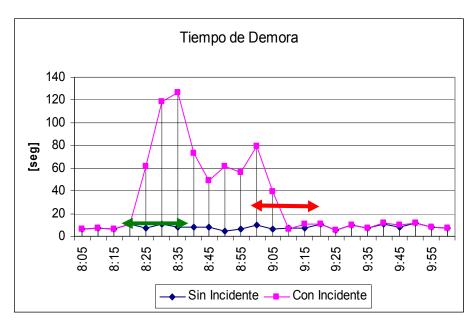


Figura 5.15 Tiempo de Demora en la sección del incidente en la Zona 3

Para este caso el tiempo de establecimiento que tiene el sistema es de 20 min., tanto para la aparición del incidente como para cuando éste desaparece en las variables analizadas.

De lo que se concluye que estos tiempos están de acuerdo a lo que se menciona en la teoría de Tráfico, la cual dice que se necesita como mínimo tiempo de establecimiento 15 min.

#### 5.1.3. Análisis de Nivel de Servicio

### 5.1.3.1. Pruebas de Control utilizando el módulo API del AIMSUN

Para utilizar el modulo API del AIMSUN es necesario programar en Visual C++ 2006 y compilar un archivo tipo dll, el cual es cargado en el Escenario del Simulador para que se ejecute según la lógica que se explicó en Figura 4.14 del Capítulo 4.

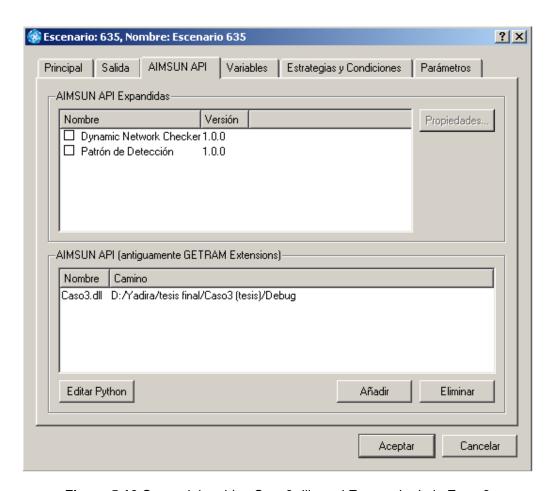


Figura 5.16 Carga del archivo Caso3.dll en el Escenario de la Zona 3

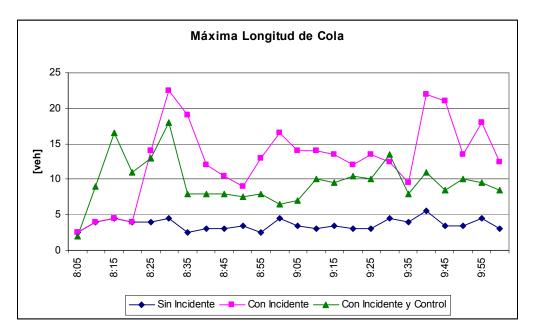


Figura 5.17 Máxima Longitud de Cola con Control Externo

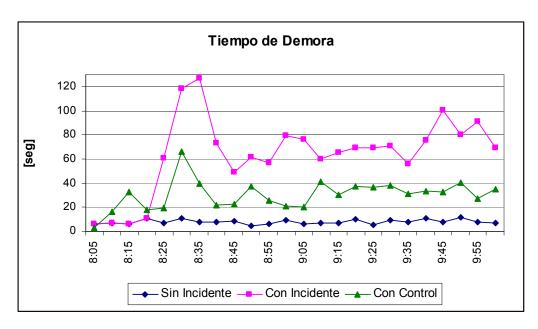


Figura 5.18 Tiempo de Demora con Control Externo

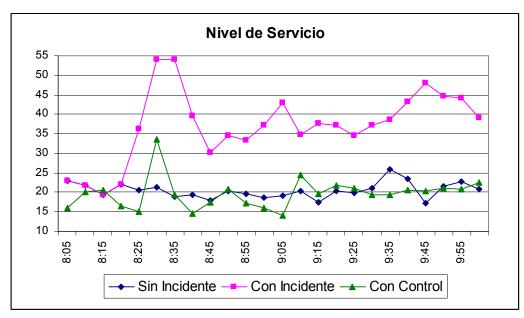


Figura 5.19 Nivel de Servicio con Control Externo

Se observa en las figuras 5.17, 5.18, 5.19 que la acción tomada para mejorar el tráfico luego del incidente es efectiva se logra reducir la cola de vehículos, el tiempo de demora.

Tabla 5.2. Valores Promedios

	Promedio Sin Incidente	Promedio Con Incidente	Promedio Con Control
Máxima Longitud de Cola	3,63	12,81	9,65
Tiempo Demora	7,93	64,13	30,31
Nivel de Servicio	20,54	37,00	19,70

El nivel de servicio promedio para el sistema sin perturbación es B y luego de la perturbación este esta en E, según la tabla 4.2, los cuales están en función del tiempo de demora, luego de aplicar el control el nivel de servicio se reduce en un punto aproximadamente y regresa al nivel C con lo cual se mejora la calidad de servicio que se da a esta intersección.

El nivel de servicio que nos da el Simulador está acorde con el concepto explicado en el capítulo 4 sección 4.7.1.4, el cual también se ve afectado directamente por el tiempo de demora.

### 5.1.3.2. Pruebas de Control utilizando sistemas adaptables a la demanda

Este tipo de control se lo aplicó en intersección de la Av. 12 de octubre y Veintimilla de la Zona 2, debido a son útiles cuando se tiene calles secundarias con poca demanda de trafico y un sistema de fases prefijas no es tan útil. Por esta razón se toma datos de la Máxima Longitud de Cola en la Av. Veintimilla en sentido O - E y E - O.

Tabla 5.3 Valores Promedios

	Actuado	Original
MLC E - O	6	7,25
MLC O-E	3,38	3,17
Nivel de Servicio	19,04	13,55

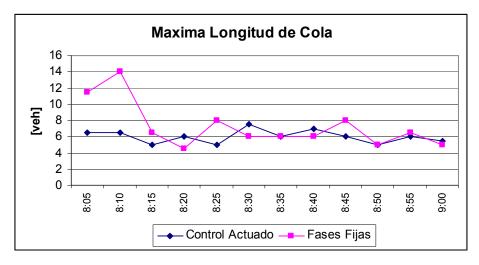


Figura 5.20 Máxima Longitud de Cola sentido E - O en la Av. Veintimilla

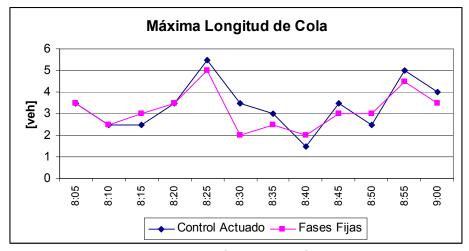


Figura 5.21 Máxima Longitud de Cola sentido O - E en la Av. Veintimilla

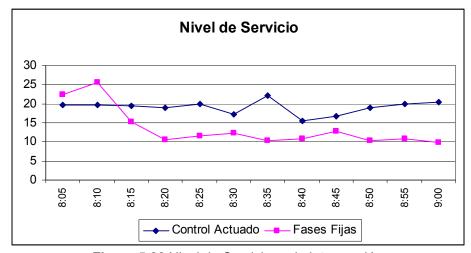


Figura 5.22 Nivel de Servicio en la intersección

El objetivo de dar mayor circulación en las calles secundarias de esta intersección se cumple como se puede observar en las figuras 5.20, 5.21, el nivel de servicio de la intersección se incrementa ya que se esta dando mayor circulación por el nodo.

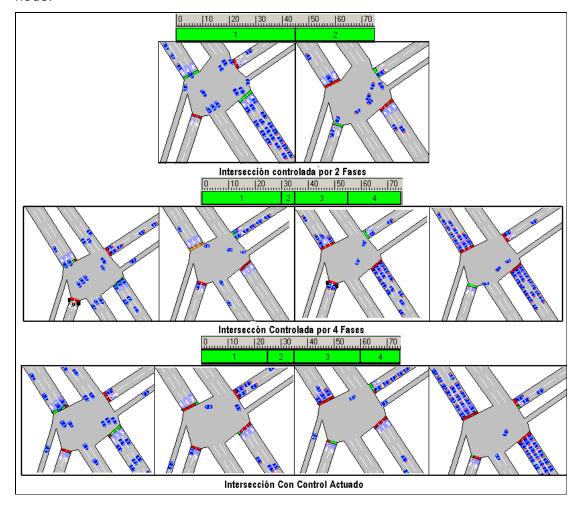


Figura 5.23 Diferentes alternativas de Control para mejorar el nivel de seguridad

Este tipo de control se aplica para lograr mayor seguridad en la intersección debido a que el sistema original es inseguro (figura 5.23) tanto para los conductores como para los peatones, debido a que solo tiene dos fases y cuando tienen paso los vehículos de las calles secundarias, estos deben realizar maniobras peligrosas para cruzar la intersección y esto también afecta a los peatones que cruzan la avenida con esta fase.

Como se observa en la figura 5.23 también se implemento en la intersección el control incrementado dos fases más, con lo cual se aumento el nivel de seguridad, la diferencia de esta alternativa con el control actuado es que para este ultimo se definen 4 fases pero se logra dar independencia a los diferentes giros que se realiza de las calles secundarias.

### 5.1.3.3. Pruebas de Control utilizando sistemas coordinados "ondas verdes"

En la zona 3 se aplica este control, como se menciono en el capitulo cuatro, este tipo de control es útil para coordinar hasta 5 intersecciones próximas cuya distancia no es mayor de 400m. [2], por esta razón para implementar este control se coordina las primeras 5 intersecciones contadas desde la Av. Colón y 6 de Diciembre desfasando los planes de control, basado en los tiempos de viaje promedio que se tiene de intersección a intersección, las dos ultimas intersecciones se coordinan una respecto a la otra ya que las distancias entre estas son muy grandes, en la tabla 5.4 se presentan estos valores.

Tabla 5.4 Tiempos de Viaje y Distancias en la Zona 3

	Tiempo de	
Intersección	Viaje	Distancia
6 de Diciembre - Diego de Almagro	21	154
Diego de Almagro – Reina Victoria	15	72
Reina Victoria - Juan León Mera	21	158
Juan León Mera - Amazonas	30	83
Amazonas - 9 de Octubre	56	343
9 de Octubre - 10 de Agosto	48	210

El simulador de AIMSUN permite crear Rutas, las cuales se utilizan para obtener las variables de tiempo de demora, tiempo de viaje y velocidad que permiten ver la efectividad del control implementado. Se crean dos rutas en la zona 3 la primera es la Ruta en sentido Este – Oeste y la otra es la Ruta en sentido Oeste – Este.

En la figura 5.24 se observa las rutas creadas y en las figuras 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30 se tiene los resultados obtenidos.



Figura 5.24 Rutas creadas en la Zona 3 Av. Colón

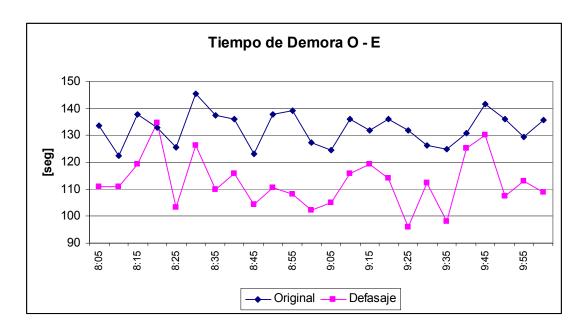


Figura 5.25 Tiempo de Demora sentido O – E

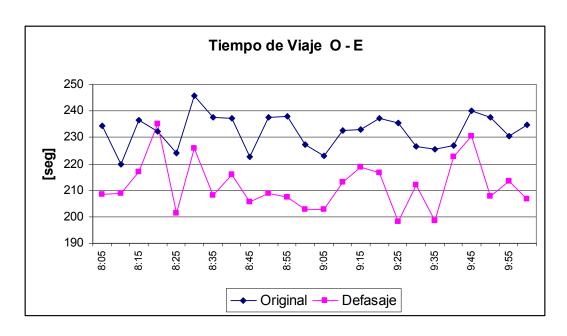


Figura 5.26 Tiempo de Viaje sentido O – E

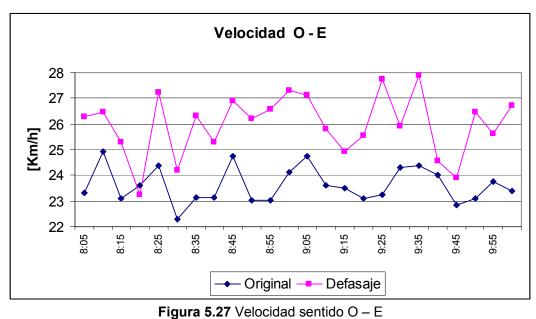


Tabla 5.5 Valores promedios de la Ruta O – E

	Original	Defasaje	Diferencia
Velocidad	23,62	25,98	2,36
T. Viaje	232,34	211,93	20,41
T. Demora	132,67	112,53	20,13

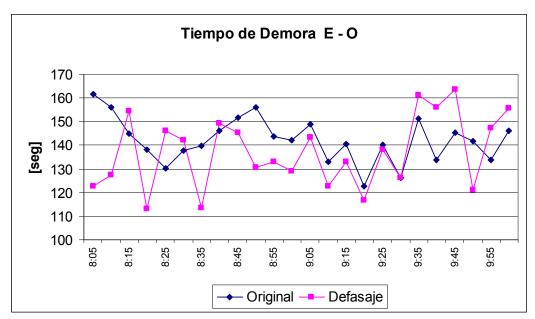


Figura 5.28Tiempo de Demora sentido E - O

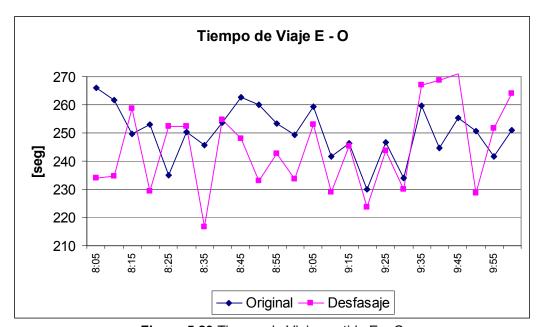


Figura 5.29 Tiempo de Viaje sentido E - O

**Tabla 5.6** Valores promedios de la Ruta E – O

	Original	Defasaje	Diferencia
Velocidad	23,61	24,56	0,95
T Viaje	250,06	244,37	5,68
T. Demora	142,21	137,16	5,05

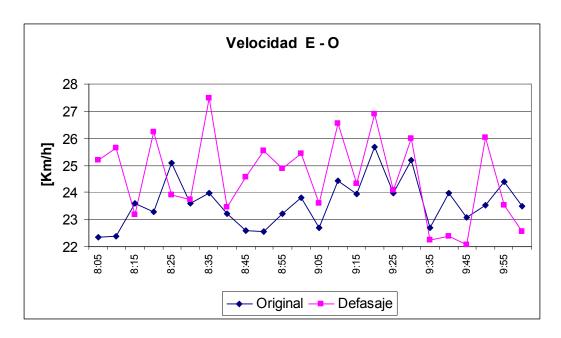


Figura 5.30 Velocidad sentido E - O

Se puede ver en las tablas 5.5 y 5.6 que se logra una reducción en los tiempos de demora y tiempos de viaje y se incrementa la velocidad para las dos rutas. Claro está que la mejora resulta más eficiente en la Ruta O – E debido a que como se ve en a figura 5.24 en la sección entre la Av. Reina Victoria y Juan León Mera no hay el ingreso de una calle secundaria como ocurre en el sentido contrario.

### 5.1.3.4. Pruebas de Control utilizando sistemas fases prefijadas.

En la figura 5.28 se observa la zona 4 configurada con las fases actuales, se ha generado un incidente a los 20 min., de iniciada la simulación, se observa claramente que a los 26 min., de simulación la zona colapsa y es imposible la circulación dentro de ésta.

En la figura 5.29 se tiene los resultados al generar un incidente pero se puede ver que la zona no colapsa y se puede circular dentro de ésta.

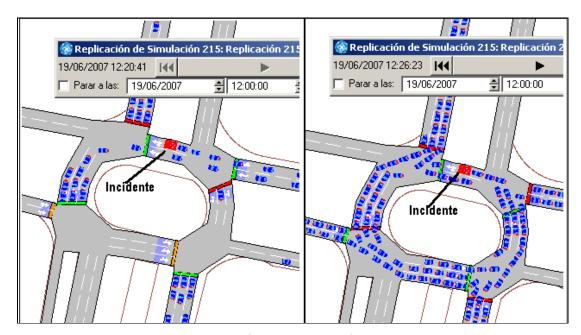


Figura 5.31 Zona 4 Con Incidente y fases originales (5)

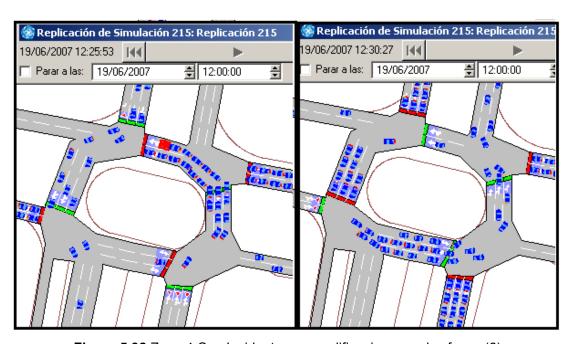


Figura 5.32 Zona 4 Con Incidente con modificaciones en las fases (6)

### CAPÍTULO 6

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### 6.1. CONCLUSIONES

### 6.1.1. HIPÓTESIS

Para la realización de esta tesis se partió de una hipótesis de trabajo que maneja dos aspectos por un lado la mejora del nivel de servicio y por otro lado la utilización de estrategias de control inteligente para conseguir dicha mejora. La hipótesis puede enunciarse como:

"Las técnicas de control inteligente servirían para mejorar el flujo de tráfico en diferentes geometrías viales de la ciudad Quito".

#### 6.1.2. OBJETIVO GENERAL

"Analizar la situación actual del tráfico vehicular y proponer estrategias de control en zonas críticas de la ciudad de Quito para mejorar la calidad de servicio de tráfico vehicular, mediante simulación."

El desarrollo de la tesis, de acuerdo con el objetivo general planteado implica, el análisis de zonas críticas mediante simulación para proponer estrategias de control tendientes a mejorar la calidad del servicio.

Una vez concluido el trabajo de investigación, utilizando el simulador profesional AIMSUN se puede concluir que las técnicas de control inteligente implementadas permiten mejorar el nivel de servicio en zonas críticas de la ciudad de Quito tomadas como casos de estudio.

#### 6.1.3. OBJETIVO ESPECIFICOS

"Realizar el análisis de Tráfico Vehicular utilizando software basado en micro simulación."

Se realizó el análisis de dinámico tráfico vehicular mediante y de nivel de servicio utilizando modelos microscópicos (*Car Following Lane Changing Gap Acceptance*) utilizando el software profesional AIMSUN basado en micro simulación, garantizando la validación de los modelos de simulación implementados y confirmando la robustez del simulador.

"Determinar zonas críticas de tráfico vehicular de la ciudad de Quito para su análisis mediante la ayuda de un simulador de tráfico vehicular utilizando información de campo."

Se seleccionaron zonas críticas en la ciudad de Quito basados en la complejidad, la representatividad de la geometría vial; y, su viabilidad para obtener información de campo, a través de mediciones automáticas utilizando cámaras de video especializadas en medición de variables de tráfico, información estadística de EMSAT y aforos manuales con el personal de la Escuela Politécnica Nacional.

"Analizar los datos obtenidos mediante mediciones y los entregados por el EMSAT para establecer índices de calidad."

La información obtenida sobre tráfico vehicular, (en zonas críticas, a través de datos de aforo, número de carriles, dispositivos de señalización, ciclos y tiempos de semáforos), fue analizada con la finalidad de calibrar y alimentar los modelos de simulación para obtener valores de variables macroscópicas fundamentales de flujo, velocidad, ocupación; y, de congestión como longitud de cola, tiempos de demora, tendientes a determinar criterios usando indicadores sobre niveles aceptables y críticos de calidad del servicio vehicular de manera cualitativa y establecer índices de nivel de servicio.

"Proponer nuevas estrategias de control de tráfico vehicular para las zonas de estudio utilizando Técnicas Clásicas y de Inteligencia Computacional."

De la literatura del estado del arte, la experiencia adquirida del trabajo de campo y de las pruebas de simulación se propusieron diferentes estrategias de control: clásicas, sistemas de ciclo y fases de duración prefijada, sistemas coordinados en ondas verdes, en un esquema de lazo abierto; técnicas inteligentes, como Sistemas adaptables automáticamente a la demanda (*Actuated Control*) y Sistemas semafóricos utilizando API (*Application Program Interface*), estos últimos en un esquema en lazo cerrado para el rechazo de perturbaciones y el manejo de diferentes condiciones de circulación.

"Analizar el comportamiento del sistema simulado de tráfico vehicular controlado para determinar la mejora de los índices de calidad."

Gracias a la versatilidad del simulador profesional se realiza análisis de los sistemas actuales y perturbados a través de indicadores usando variables macroscópicas y de congestión mediante series de tiempo y valores estadísticos, como también índices de nivel de servicio.

#### 6.1.4. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

La utilización de video cámaras para tráfico vehicular permite una óptima información para control de tráfico vehicular ya sea para efectos de calibración o control en tiempo real. El programa desarrollado en Labview resulto ser eficiente y adaptado a las necesidades de las zonas críticas.

Se confirmó, vía simulación, que el comportamiento dinámico de tráfico vehicular, requiere de al menos 15 minutos para entrar en un régimen de estado estable a través de un mecanismo de autorregulación, debido a la presencia de una capacidad vial y la ocupación actual de las vías. Dependiendo de la mayor o

menor ocupación este tiempo de establecimiento puede modificarse ligeramente de una zona crítica a otra.

El software desarrollado utilizando Labview es suficiente para un adecuado manejo de las videos cámaras. Para el desarrollo del archivo tipo dll en el programa de Visual C++ requirió de las librerías que posee el modulo API de AIMSUN y la estructura que se menciona en el capítulo 4.

Las variables macroscópicas de Velocidad, Máxima Longitud de Cola y Tiempos de Demora, resultaron eficientes como indicadores de la calidad del servicio y como variables de control.

El índice de nivel de servicio de AIMSUN es suficiente para estudios comparativos de diferentes zonas críticas, diferentes condiciones de circulación y diferentes esquemas de control.

Las zonas críticas seleccionadas resultaron suficientemente conflictivas y representativas además que permitieron un adecuado manejo por su condición geométrica y por su dinámica.

El sistema coordinado de "ondas verdes" funcionó adecuadamente para 5 intersecciones próximas y con una distancia aproxima de 400m., lo cual está de acuerdo a lo analizado en la teoría.

Los sistemas adaptables a la demanda reducen la longitud de cola de las calles secundarias, también se brinda mayor servicio. Este control resulta más seguro tanto para los peatones como para los conductores, en comparación al original de fases fijas.

La implementación de los sistemas adaptables a la demanda tiene que basarse en un estudio costo beneficio ya que es necesario colocar en todos los accesos a la intersección sensores (detectores) que permitan establecer la demanda de tráfico.

El modulo API de AIMSUN permite desarrollar aplicaciones externas que interactúan con AIMSUN mientras ocurre la simulación, permitiendo implementar un control adaptativo en función de la demanda de tráfico, el control se lo puede hacer utilizando las diversas variables que brinda el simulador de AIMSUN, sean estos valores estadísticos o mediciones en los detectores.

Los redondeles son puntos críticos de una red vial cuando se ha alcanzado la capacidad que tienen estos otro parámetro que los vuelve críticos son las coordinación inadecuada de los ciclos semafóricos. Como se ve en las pruebas realizadas el producir un incidente en el redondel de la Av. NNUU y 10 de Agosto provoca un colapso de éste con la configuración de las actuales, aumentando una fase más se logra evitar el colapso.

En la actualidad en la ciudad de Quito se está eliminando los redondeles, tratando de disminuir la congestión en esos puntos, pero no se hace un análisis del efecto en las intersecciones aledañas. Esto se podría solucionar utilizando la micro simulación.

### **6.2. RECOMENDACIONES**

Es necesario en la actualidad implementar Sistemas de Transporte Inteligentes para mejorar la seguridad, eficiencia y confort del transporte. Esto se debe al desarrollo que ha tenido las telecomunicaciones y la tecnología de sensores.

Dentro de las aplicaciones que pueden realizar estos sistemas está el control de arterias y de intersecciones de forma automática permitiendo implementar la regulación y control en los accesos, la captura de datos para medir intensidad, velocidad y la detección automática de incidentes, la información de itinerarios, auxilio en carretera, pagos electrónicos de peajes y control de la demanda.

Las más recientes y relevantes innovaciones en los automóviles y que se están comenzando a implementar en los servicios públicos para proveerlos de mayor seguridad son los sistemas de alarma para avisar al conductor en el caso de que

éste se duerma al volante, y el pilotaje automático de seguridad, si no se consigue despertarlo en un tiempo preestablecido.

El software de AIMSUN es muy útil cuando se utiliza sistemas de transporte inteligente, ya que entre las aplicaciones que permite realizar el modulo API de AIMSUN están los Sistemas Dinámicos de Seguridad en túneles, Sistemas de Ruteo Guiado.

La licencia que se dispone del AIMSUN es limitada y no permite explotar este software en todo su potencial, por ejemplo no se dispone de la planificación de transporte público, no permite implementar otras estrategias de administración, como cambiar la dirección de carriles debido a un incidente o desplegar información en los VMS (*Variable Messaje Signs*) para informar a los conductores la reducción de la velocidad, incidentes, etc.

En trabajos futuros desde el punto de vista de control se debe buscar la manera de relacionar el AIMSUN con software que se utilizan en el control como lo es el MATLAB [1].

También se debe estudiar la posibilidad de aplicar técnicas de control inteligente más avanzadas como Lógica Difusa, Agentes Inteligentes y Redes Neuronales, etc., para ser aplicadas al control de las señales de tráfico (semáforos), que puedan ser implementadas y validadas mediante el módulo API de AIMSUN [2, 3 4].

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

### **CAPITULO 1**

- González Juan, Rodríguez Gustavo, Carballido Jorge, "¿CÓMO MEJORAR EL FLUJO VEHICULAR POR MEDIO LA SIMULACIÓN?", México.
- 2. Fernández Rodrigo, Cortés Cristian, Burgos Vanesa, "MODELACION DE PASAJEROS, BUSES Y PARADEOS EN MICROSIMULADORES DE TRAFICO, REVISION Y EXTENSION", XIV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte 20-23 Septiembre 2006, Las Palmas de Gran Canaria, España.
- 3. Hoogendoorn Serge, Bovy Piet, "State of-the-art-of Vehicular Traffic Flow Modelling", Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of Systems and Control Engineering
- Bellemans Tom, "TRAFFIC CONTROL MOTORWAY", Universidad Católica de Leuven, Mayo 2003
- Fachbereich Physik, "INFORMATION IN INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS" Technologie der Universitat – Gesamthochschule-Duisburg zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Inaugural-Dissertation
- Sheng Li, "Simulation of Car-following Decision Using Fuzzy Neural Networks System", School of Business Administration Southwestem University of Finance & Economics
- 7. Zhang Y., "SCALABILITY OF CAR FOLLOWING LANE CHANGING MODELS", Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, August 2004
- 8. Rothery R. "CAR FOLLOWING MODELS", Senior Lecturer, Civil Engineering Departament the University of Texas.
- Modelación, Simulación y Control de Tráfico Vehicular MSCTV Reporte No.1 "Estado del Arte en Modelación, Análisis de Tráfico Vehicular y Herramientas", Proyecto auspiciado por FUNDACYT y

- desarrollado en cooperación entre la Escuela Politécnica Nacional y la Universidad San Francisco de Quito.
- 10. Dextre Q. Juan C., Carrasco Luis F., "MODELO DE SIMULACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR", XI Congreso Nacional De Ingeniería Civil Trujillo, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- 11.AIMSUN 5.1 "Microsimulator User's Manual", Version 5.1.2 October 2006, TSS.

### CAPÍTULO 2

- ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Secretaría TRÁNSITO Y TRANSPORTE, "Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte", Capitulo 2, Bogota. http://www.transitobogota.gov.co/admin/contenido/documentos/
- Cal y Mayor R., Cárdenas J., "INGENIERÍA DE TRANSITO, Fundamentos y Aplicaciones", Séptima Edición, Alfaomega, México 2000. Capitulo 10, Págs. 279 – 291.
- 3. Ayuntamiento de Madrid, "Instrucción Vía Pública, Ficha 5.2 Intersecciones Semaforizadas", Madrid, Diciembre 2000

# CAPÍTULO 3

- 1. http://www.tyssa.ws/
- 2. Modelación, Simulación y Control de Tráfico Vehicular MSCTV Reporte No.1 "Estado del Arte en Modelación, Análisis de Tráfico Vehicular y Herramientas ", Proyecto auspiciado por FUNDACYT y desarrollado en cooperación entre la Escuela Politécnica Nacional y la Universidad San Francisco de Quito
- 3. www.traficom.com
- 4. Traficon nv., TRAFICAM Traffic Presence Sensor, "Installation & User Manual", Belgium, March 2006.
- http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/0662B2C6EB92E4938 6256FB30062A50B

# CAPÍTULO 4

 Barceló J, Casas J, Ferrer L, García D, "MODELLING ADVANCED TRANSPPORT TELEMATIC APPLICATION WITH MICROSCOPIC

- SIMULATORS: The case of AIMSUN2", Micro-Simulation Workshop, http://www.it.leeds.ac.uk/smartest.
- MANUAL INTERAMERICANO DE DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DE TRANSITO EN CALLES Y CARRETERAS XXI CONGRESO PANAMERICANO DE CARRETERAS, MONTEVIDEO, URUGUAY, MAYO DE 1991 CORTESIA DE CENTRUM DIGITAL C.A., www.centrumdigital.com.ve , 0286-9238492 , Capitulo 4 Semaforos.
- 1. AIMSUN NG, "User Manual ", Version 5.1.3, Transport Simulation Systems, November 2006.
- 2. AIMSUN 5.1 "Microsimulator User's Manual", Version 5.1.2, Transport Simulation Systems, October 2006.
- Capacidad y Niveles de Servicio Flujo Continuo Capitulo 2 , Alcaldía Mayor de Bogota
- www.mintransporte.gov.co/Servicios/Biblioteca/documentos/Manual\_s enalizacion/Capitulo7 SEMAFOROS.pdf
- 5. AIMSUN NG, "API MANUAL", Version 5.1.2, Transport Simulation Systems, October 2006.

### CAPÍTULO 5

- DOHNAL P. "Matlab Aimsum Toolboox", Departamento de Ingeniería de Control, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Czech Technical Universyty, Praga, 2007
- Wu,W., Mingjun, W. (2003) "Research on traffic signal control based on intelligence techniques", IEEE Conference on Intelligent Transportation, 892-896
- 3. Nakamiti G., Comide F. (1996), "Fuzzy sets in distributed traffic control", IEEE Internacional Conference on Fuzzy Systems, 1617–1623.
- 4. Chui S, et all, (1993) "Self-Organizing Traffic Control via Fuzzy Logic", Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Proyecto de Remodelación del enlace entre la m-30 (nudo de la paloma) y las calles Pío XII y Avenida de Burgos, www.madridcamina.org/GruposTrabajo/M30/Proyectos/LaPaloma/LaP aloma-EstudioTrafico.pdf
- 2. Gabri'c T., Howden N., Norling E., Tidhar G., Sonenberg L., "Multiagent Design of a Traffic-Flow Control System", A Project in Collaboration with \_The Australian Artificial Intelligence Institute, Department of Computer Science The University of Melbourne, Parkville, AUSTRALIA.
- HWANG S. PARK C., "MODELING OF THE GAP ACCEPTANCE BEHAVIOR AT A MERGING SECTION OF URBAN FREEWAY", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, pp. 1641 - 1656, 2005
- Hughes J. , "TRAFFIC DATA COLLECTION FOR AIMSUN2 SIMULATION OF AN AUCKLAND MOTORWAY" , Regional Transportation Engineer, Auckland, New Zealand, 1997
- Hourdakis J., Michalopoulos P., Kottommannil J., "A PRACTICAL PROCEDURE FOR CALIBRATING MICROSCOPICTRAFFIC SIMULATION MODELS", Transportation Research Board 2003 Annual Meeting, January 2003, Washington, D.C.
- Barceló J., Casas J., Ferrer J., Perarnau J., "A SIMULATION STUDY
  TO EVALUATE THEPERFORMANCE OF ADAPTIVE CONTROL
  STRATEGIES FOR TRAFFIC SAFFETY CONDITIONS IN THE
  VIELHA TUNNEL" Transportation Research Board 2003 Annual
  Meeting, January 2003, Washington, D.C.
- Barceló J., Casas J., "DYNAMIC NETWORK SIMULATION WITH AIMSUN", Dept. of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya, TSS-Traffic Simulation Systems, Barcelona, Spain,
- 8. Barceló J, "AIMSUN MICROSCOPIC TRAFFIC SIMULATOR: A TOOL FOR THE ANALYSIS AND ASSESSMENT OF ITS SYSTEMS", Dept.

- of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona Spain.
- 9. Lieberman E., Rathi A., "Traffic Flow Theory A State-of-the-Art Report Traffic Simulation", Chapter 10. 2001
- 10. Kazi Iftekhar Ahmed, "Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior", MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, February 1999.
- Convenio Escuela Politecnica Nacional Empresa Metropolitana de Servicios y Administración de Transporte.