



**Universidad
Pontificia
Bolivariana**

**SIMULACIÓN Y CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR
POR SEMAFORIZACIÓN**

Unidad académica: Escuela de Ingenierías
Facultad: Facultad de Ingeniería Electrónica
Autor: Daniel Jaramillo Ramírez.

**SIMULACIÓN Y CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR POR
SEMAFORIZACIÓN**

DANIEL JARAMILLO RAMÍREZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2005**





**SIMULACIÓN Y CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR POR
SEMAFORIZACIÓN**

DANIEL JARAMILLO RAMÍREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director
RICARDO JARAMILLO MEJÍA
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2005**



Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Medellín, 18 de Enero de 2006



CONTENIDO

RESUMEN	10
GLOSARIO	11
INTRODUCCIÓN	12
1. RESEÑA DEL TRÁNSITO EN MEDELLÍN	15
2. BASES TEÓRICAS.....	22
2.1 TEORÍA Y RESEÑA DE MODELOS DE TRÁFICO VEHICULAR	22
2.2 BASES TEÓRICAS	33
2.3 ANÁLISIS SOBRE EL TIEMPO Y ESPACIO DE USO DEL SISTEMA VIAL....	50
3. SIMULACIÓN.....	58
3.1 DESCRIPCIÓN PARAMÉTRICA DEL FLUJO VEHICULAR EN EL POBLADO PARA EL SIMULADOR.....	58
3.2 RESUMEN DE DATOS.....	67
3.3 MANUAL DE USO DEL SIMULTRAF	77
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	95
4. SISTEMA DE CONTROL.....	107
4.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DIFUSO.....	107
4.2 APROXIMACIÓN DIFUSA A LOS SEMÁFOROS	109
4.3 CONTROL DIFUSO APLICADO A TRÁFICO VEHICULAR	110
4.4 CONTROL DIFUSO PARA LAS INTERSECCIONES DEL SIMULADOR	115
4.5 CONTROL DE AVENIDAS	117
4.6 CONTROL GENERAL.....	121
5. CONCLUSIONES	122
BIBLIOGRAFÍA	126
ANEXOS.....	129



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa parcial de intersecciones y sus modos en El Poblado	20
Figura 2. Descripción del grado de profundidad de los modelos de tráfico	23
Figura 3. Modelo de conservación vehicular de autopista con carriles discretos.	26
Figura 4. Variación de las familias de curvas ϕ vs ρ con la velocidad como parámetro. En el mismo modelo, variaciones "microscópicas" sobre el comportamiento de un vehículo frente a estímulos, deforman la parábola original del modelo básico.	29
Figura 5. Relaciones de tiempo y espacio entre vehículos	37
Figura 6. Gráfica de flujo vs velocidad según la ecuación fundamental del flujo vehicular $\phi = \rho v$.	39
Figura 7. Gráfica flujo vs tiempo.	44
Figura 8. Representación en diagrama de bloques de la primera aproximación al modelo de segmento de vía semaforizado.	47
Figura 9. Resultado del primer diagrama de bloques.	48
Figura 10. Número de pasajeros transportados por los diferentes vehículos para un mismo espacio-tiempo del sistema vial.	54
Figura 11. Capacidad vial requerida por los diferentes vehículos.	55
Figura 12. Uso del espacio tiempo (x-t) de la avenida El Poblado según tipos de vehículos	56
Figura 13. Factor de forma de diferentes segmentos de vía.	59



Figura 14. Segmentos e intersecciones tenidas en cuenta para la simulación del sistema vial del Poblado.	63
Figura 15. Niveles de tráfico típicos en las diferentes horas del día.	65
Figura 16. Modos de generación: Azul=Random, Rojo=Manual+random, Verde=Cuadrado+random, Negro=Cuadrado, Magenta=Constante.	66
Figura 17. Dirección: Carrera 43 ^a con calle 10	70
Figura 18. Dirección : Carrera 43 ^a con calle 1 Sur	71
Figura 19. Dirección : Carrera 43 ^a con calle 4 y 5 sur	72
Figura 20. Dirección : Carrera 43 ^a con calle 9 Sur	73
Figura 21. Ejemplos de semáforos en el SIMULTRAF	78
Figura 22. Bloque semáforo.	78
Figura 23. Bloque semáforo (interior).	79
Figura 24. Bloque de Maniobras.	80
Figura 25. Bloque Generador.	80
Figura 26. Bloque generador (interior)	81
Figura 27. Bloque Retardador.	81
Figura 28. Bloque Retardador (Interior).	82
Figura 29. Bloque general Intersección.	82
Figura 30. Intersección típica de cuatro semáforos y sus maniobras.	83
Figura 31. Mapa sector del poblado, de calles 10 a 9Sur, Av Las Vegas, Av El poblado y Transv. Inferior. (modelo aproximado).	84
Figura 32. Ejemplo del manual.	85
Figura 33. Paso 2.	86
Figura 34. Paso 3.1	87
Figura 35. Paso 3.2	87
Figura 36. Paso 3.3	88
Figura 37. Paso 3.4	89
Figura 38. Paso 3.5	90
Figura 39. Paso 3.6	91
Figura 40. Paso 3.7	92
Figura 41. Paso 3.8	93
Figura 42. Paso 3.9	94



Figura 43. Paso 3.9	95
Figura 44. Duty cycle desproporcionado.	96
Figura 45. Desperdicio de verde por congestionamiento.	97
Figura 46. Flujos típicos (izquierda) y flujos obstruidos (derecha).	98
Figura 47. Retardos descuadrados.	99
Figura 48. Carreras vacías y calles llenas.	100
Figura 49. Segmentos autosuficientes.	101
Figura 50. Necesidad de planos.	102
Figura 51. Posibilidad de cambio de sentido de las vías.	103
Figura 52. Factor de emisión de monóxido de carbono (CO) vs velocidad.	105
Figura 53. Factor de emisiones de monóxido de carbono (CO) parando en un semáforo (arriba), ó sin parar (abajo).	106
Figura 54. Descripción gráfica de un <i>fis</i> .	108
Figura 55. Sistema vial para control difuso.	111
Figura 56. Simulación del ejemplo para control difuso.	112
Figura 57. Congestionamiento de los tres segmentos controlados con tiempos fijos calculados clásicamente.	113
Figura 58. Resultados del control difuso sobre los almacenamientos porcentuales de los segmentos.	114
Figura 59. Funciones de membresía de la entrada 1 Cra N-S.	116
Figura 60. Conjunto de reglas definitivo para el control.	117
Figura 61. Variables para el cálculo dinámico de offsets.	120



LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Equivalencia de vehículos en PCU
- Tabla 2. Señales y parámetros del modelo inicial
- Tabla 3. Equivalencias en pasajeros, tiempo y espacio de los diferentes vehículos
- Tabla 4. Datos L. Balsos – Av. El Poblado
- Tabla 5. Clínica – Av. Las Vegas
- Tabla 6. Eafit – Av. Las Vegas
- Tabla 7. L. Parra – Inferior
- Tabla 8. L. González – Inferior
- Tabla 9. L. Balsos – Inferior
- Tabla 10. Parámetros de los segmentos del simulador
- Tabla 11. Parámetros de los generadores del simulador



LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Datos del trabajo de grado**
- Anexo B. Carta de aprobación del director**
- Anexo C. Artículo publicable**



RESUMEN

Conciente del creciente problema de tráfico vehicular en Medellín, y tras advertir por medio de la observación que el sistema de transporte en general, no funciona de la mejor manera, este trabajo plantea y argumenta el evidente mal uso de los semáforos por parte de las autoridades, por razones simples como la falta de sincronización, ó el funcionamiento bajo los mismos tiempos durante todo el día entre otras; además, el mal uso de las vías por parte de los ciudadanos, dada la constante indisciplina entre vehículos públicos, particulares livianos y de carga. Aparte de los planteamientos teóricos se ofrecen herramientas y posibles soluciones, utilizando Simulink, con la implementación de un simulador de bloques genérico para sistemas vehiculares de semáforos, por medio del cual, puede observarse el funcionamiento de cualquier conjunto de semáforos que sea configurado. Y finalmente, utilizando conocimientos de estadística, programación y control difuso, se proponen soluciones buscando un mejor rendimiento para el sistema de semáforos del Poblado, con la intención de hacer de ésta una herramienta de uso práctico en nuestra ciudad, gracias a la versatilidad ofrecida por Matlab sus herramientas y aplicaciones.



GLOSARIO

CICLO: Es el paso de una base de tiempo para un grupo de controladores coordinados (sincronizados), o una secuencia completa de señales en un controlador de una intersección aislada.

PLANO: Es un conjunto de ciclos iguales en el cual funciona un controlador determinada parte del día, según las condiciones del flujo por cada uno de sus afluentes. Los semáforos que operan en modo por demanda, tienen ciclos variables durante todo el día y por lo tanto no tienen un plano definido.

DUTY CYCLE: Es el porcentaje de tiempo de verde de un segmento respecto al ciclo total de su intersección. Así el ciclo queda dividido en fases, ya que cada conjunto de *duty cycles* simultáneo conforma una fase, y el conjunto de maniobras que se dan en una fase conforma un movimiento. Para poder agilizar una intersección, se debe buscar que el número de movimientos sea el mínimo posible.

RETARDO: Es el tiempo que tarda en aparecer un verde desde el comienzo del ciclo en cada semáforo respecto a una referencia (todos los ciclos comienzan en la referencia de tiempo igual a cero).

OFFSET: En los semáforos que funcionan en modo coordinado (sincronizados) dicho retardo es llamado *offset*, y se referencia respecto a una base de tiempo de un controlador *maestro*. En nuestro caso, el simulador será el *maestro* de todos los semáforos del sistema y para todos correrá la misma base de tiempo; por lo que no debe confundirse el retardo con el *offset*.



INTRODUCCIÓN

En 2005 el mundo ha sobrepasado los 6400 millones de habitantes. Actualmente, las naciones unidas calculan que más de 2860 millones viven en áreas urbanas, es decir, cerca del 44.8% de la población, y pronostican que la población mundial urbana alcanzará para el 2020 cerca del 55% del total. Pero, si bien es cierto que la población mundial cada vez es más urbana que rural, entre estas cifras hay un hecho más preocupante: La población mundial urbana aumenta claramente como la suma de dos funciones crecientes, una exponencial y una lineal; la lineal representa el crecimiento de la población urbana en los países desarrollados, y la exponencial representa el crecimiento de la misma en los países en desarrollo. En lo anterior podemos respaldar una aseveración bastante evidente:

La población en nuestra ciudad crece de manera dramática. Ante esta verdad, algunos de los analistas estiman que al no rebajar la pobreza en el país, el parque automotor crecerá a un ritmo estimado y aceptable. Pero si somos un poco más puntuales, encontramos que la densidad vehicular en Medellín y el valle de Aburrá, definitivamente crece a un ritmo más elevado, dado que la ciudad crece en población más no lo hace de la misma manera en área.

Por todo lo anterior, manejar en Medellín, como en casi cualquier ciudad del mundo se ha convertido hoy en un problema de grandes dimensiones. Podemos afirmar que la infraestructura vial de una ciudad es directamente proporcional al tamaño de su parque automotriz, por lo que cada vez que una ciudad inaugura



una avenida, un puente o un túnel, sabemos que sus ciudadanos saturarán el sistema de cualquier forma. Por eso, asegurar que todas las ciudades con un sistema de transporte de mayoría de vehículos particulares (como en nuestro caso) tendrán problemas de tráfico, no da lugar a controversias.

Cuando un área urbana contiene una gran densidad vehicular, disminuye las condiciones favorables de vida en general de sus ciudadanos. Una ciudad que no tiene movilidad, es una ciudad dónde no se puede vivir bien, y es una ciudad contaminada. El tráfico, aumenta de manera alarmante el nivel de estrés de los conductores y peatones, y dispara los índices de contaminación, por ejemplo:

Si una avenida sin intersecciones mueve x carros en un lapso de tiempo, la contaminación en promedio será proporcional a x . Pero si sobre dicha avenida se construye una intersección con semáforos, por la cual, cruzan igualmente x carros en el mismo tiempo, la contaminación en la zona no será proporcional a $2x$, sino mucho mayor, ya que detener los vehículos en los semáforos, implica mayor consumo de gasolina, cada vez que se frena y se arranca nuevamente. Por eso, y por las demoras que se ocasionan, antes de ver los semáforos como elementos de control que proporcionan seguridad y movilidad al flujo vehicular, debemos también considerarlos como los responsables de la mala circulación y el aumento de la contaminación cuando son mal ubicados y/o mal configurados.

El trabajo del cual este documento es sumario y fundamento, plantea y argumenta el evidente mal uso de los semáforos en Medellín por parte de las autoridades, el mal uso de las vías por parte de los ciudadanos, y ofrece herramientas y posibles soluciones al problema, utilizando conocimientos de estadística, programación, control, entre otros temas y demostrando el aporte significativo que la ingeniería electrónica puede hacer a la



ingeniería de tránsito, así como a muchas otras ramas del conocimiento humano.

1. RESEÑA DEL TRÁNSITO EN MEDELLÍN

El tráfico vehicular en Medellín, es controlado por semáforos que podríamos ubicar en tres grandes zonas: El centro, la zona occidental (Laureles, La América, Belén, El Estadio) y El Poblado. Las demás zonas, prácticamente no tienen semáforos.

El Centro

Observando en un mapa, se ve claramente, que El Centro, tiene la mayor densidad de semáforos por área, y en consecuencia un grave problema de tráfico, tanto vehicular como peatonal, pues es la zona de la ciudad con más peatones, y de ella conocemos la mayoría de aceras pequeñas y sus pocos pasajes peatonales. El tráfico vehicular tiene además la mayor densidad de unidades de servicio público entre buses y taxis y un grave problema de desorden e incumplimiento a los códigos de tránsito.

La Zona Occidental

La zona occidental, tiene una densidad peatonal baja, y un tráfico vehicular alto repartido típicamente en mayoría de vehículos particulares y un número moderado de vehículos de servicio público. No hay gran densidad de semáforos, pero si hay gran alternatividad en las vías, es decir, para un mismo desplazamiento



hay buen número de variantes en las que se puede distribuir el tráfico. Dicha zona tiene problemas de tráfico, pero no tan graves ó generales, sino puntuales como alguna intersección ó alguna glorieta en la avenida 80.

El Poblado

Finalmente, la zona del poblado, presenta varios síntomas complicados. Tiene la mayor densidad de vehículos de la ciudad, y dicho cúmulo es casi totalmente conformado por vehículos particulares. El transporte público en el poblado es muy bajo, y su mayoría son taxis, más no buses, busetas ó colectivos. La densidad peatonal también es muy baja, y lo más grave es que la alternatividad en las vías, es generalmente muy baja ó nula. La saturación de las vías en El Poblado es una constante, y el buen manejo de los semáforos se torna indispensable para mejorar la calidad de vida en ésta zona; más, cuando casi todas las intersecciones presentan éste elemento de control.

Funcionamiento y operación de los Semáforos en Medellín

Los semáforos en Medellín son manejados por controladores de tráfico de la firma Holandesa *Peek Traffic*. Cada controlador está instalado en un gabinete gris en alguna esquina de la intersección y contiene una tarjeta que maneja un sistema de potencia para las luces, una memoria interna para las secuencias de tiempos, y el control en general para coordinar 8 grupos de señales. Un grupo de señales, es el conjunto de señales proveniente de un segmento en una intersección, es decir, una vía en un sólo sentido. Un grupo de señales puede ser entonces las señales de las luces roja, amarilla y verde de un semáforo de una sola vía, o también las señales de las luces roja y verde de un semáforo peatonal. Debe anotarse que un grupo de señales puede provenir de varios semáforos, pero éstos funcionarán *siempre* con los mismos tiempos. Si alguna intersección requiere más de 8 grupos



de señales, entonces requiere más de un controlador; Ejemplo: Avenida las vegas con calle 10.

Cada controlador es alimentado por la red eléctrica domiciliaria y está comunicado con una oficina central vía modem. En dicha oficina, las señales de los controladores de la gran mayoría de intersecciones de la ciudad, son agrupadas y procesadas por un computador, que tiene un software para visualizar en un mapa digital de Medellín, el estado de todos los semáforos en tiempo real. Desde el mismo software además, los controladores, determinan los ciclos y los planos de los semáforos, según la programación que asigne el encargado. El programa, permite el funcionamiento del semáforo en tres modos; aislado, por demanda y coordinado.

Modo Aislado

Un controlador maneja una intersección en modo aislado, cuando el semáforo no depende de ninguna otra intersección. Esto implica que el semáforo seguramente estará en una posición geográfica lejana a los demás, que no necesita ninguna sincronización, y que no presenta graves problemas de congestión.

Modo por demanda

El modo por demanda consiste en que el semáforo da un verde siempre que por su vía pasen carros. Esto es posible gracias a unas mallas enterradas en el asfalto que detectan el paso o la estadia de un vehículo. A partir de allí, si el sensor detecta el paso de vehículos, constante dejará el verde hasta cumplir su tiempo de verde máximo. Pero si en algún momento el tiempo de espera del sensor por el siguiente vehículo, supera el intervalo máximo llamado *gap* (predeterminado por el programador), el controlador pondrá un rojo, y dará verde en la otra vía. Si en ninguna de las vías se presentan carros en un momento dado,



ambos semáforos estarán en rojo hasta que llegue alguno y active el sensor.

Este modo implica más costos por el sensor, y además requiere de precisión en la posición del sensor y la programación del *gap*. La principal ventaja de este modo, es que garantiza que la intersección siempre se está utilizando. No obstante, es poco probable, que un vehículo pase por la intersección sin detenerse a causa de ésta en algún momento, ya que sólo podría hacerlo si se “engancha” al grupo de vehículos que mantiene el verde en el semáforo; lo que es una gran desventaja porque implica demoras y contaminación.

Modo coordinado

El modo coordinado consiste en que un controlador maestro (remoto), dispone una base de tiempo para varias intersecciones, y los semáforos dan verde según el maestro les envíe la señal de *offset* que será programada por el encargado. En este caso, cada intersección debe tener la misma duración del ciclo, ó la señal del ciclo debería tener una frecuencia múltiplo de la frecuencia de las demás intersecciones que comparten la misma base de tiempo; de lo contrario no sería posible la sincronización. Esto implica, que si todas las intersecciones sincronizadas no manejan el mismo volumen de tráfico, es posible que alguna intersección se vea subutilizada en algún momento mientras espera un flujo vehicular. Por lo tanto, se debe distinguir si es más importante mantener cada cruce despejado constantemente, o prima la sincronización de la avenida.

Es también importante anotar, que el sistema es bastante inestable; y se presentan comúnmente dos tipos de fallos. Cuando un controlador pierde su modo coordinado, pasa por defecto al modo aislado, dañando así la sincronización del grupo. Además, un controlador puede apagarse para protegerse de fallas eléctricas, éste sólo se prende nuevamente cuando un



operario lo detecta y lo inicializa desde la central de control. (No hay alarma sonora sino visual, en un mapa que no es observado con frecuencia). Otros términos importantes son el concepto de ciclo y plano.

Un ciclo es el paso de una base de tiempo para un grupo de controladores coordinados (sincronizados), o una secuencia completa de señales en un controlador de una intersección aislada.

Un plano es un conjunto de ciclos iguales en el cual funciona un controlador determinada parte del día, según las condiciones del flujo por cada uno de sus afluentes. Los semáforos que operan en modo por demanda, tienen ciclos variables durante todo el día y por lo tanto no tienen un plano definido.

A continuación presento el mapa de funcionamiento de los semáforos en gran parte del sector de El Poblado, junto con los tiempos reales de duración de los ciclos y los modos de funcionamiento. (Fuente: oficina central de semáforos, Ingeniero Guillermo Gutiérrez)

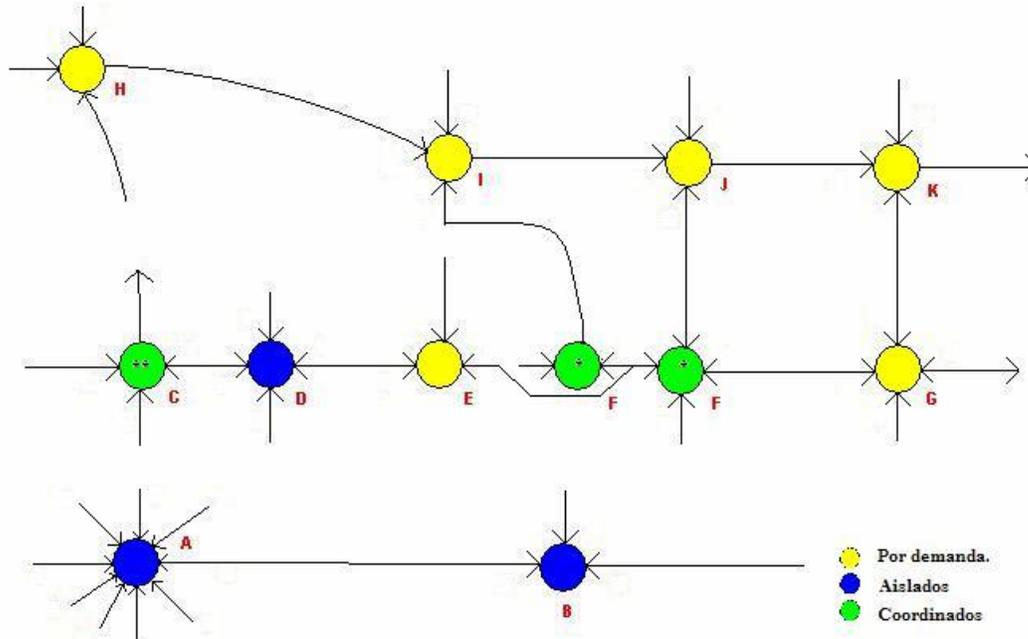


Figura 1. Mapa parcial de intersecciones y sus modos en El Poblado.

El mapa anterior comprende la mayoría de intersecciones ubicadas en la Avenida las Vegas (Cra. 48), la Avenida El Poblado (Cra. 43) y la Transversal Inferior (+/- Cra 32); y entre las calles 10 (intersecciones A, C y H) y 12s (loma de los Balsos, intersecciones G y K). Como vemos, la transversal inferior, funciona totalmente con semáforos por demanda. Podemos asegurar que hay una gran probabilidad de que si una persona pretende recorrerla desde Las Palmas hasta San Lucas, tendrá que parar mínimo 5 ocasiones (las del mapa más la de la loma del Campestre). La avenida El poblado, presenta sincronizaciones parciales solamente, y está constantemente saturada. Y la avenida las vegas, presenta saturación generalmente. Debe anotarse que el controlador B representa dos controladores que están sincronizados entre las calles 1Sur y 2Sur, entre la urbanización el Remanso y la Clínica las Vegas. Igualmente aunque no aparece en el mapa el semáforo peatonal de Eafit



presenta congestión constante por el mal uso de las bahías entre particulares, conductores de buses de transporte público y conductores de busetas escolares que prestan servicio al colegio San José de las Vegas.

Los semáforos aislados o coordinados, tienen la posibilidad de funcionar en diferentes planos durante el día, pero sólo el controlador B opera en tres diferentes. Los demás operan siempre en el mismo plano, sin importar la hora.



2. BASES TEÓRICAS

El capítulo que se presenta a continuación, tiene como objetivos, hacer un compendio de la investigación de los modelos más importantes, y sustentar la consecución de un conjunto de reglas y ecuaciones sobre las que el simulador fundamenta su funcionamiento.

2.1 TEORÍA Y RESEÑA DE MODELOS DE TRÁFICO VEHICULAR

Para poder llevar a cabo la realización del simulador, y el control del mismo, fue necesario, entender diferentes modelos de tráfico vehicular, o flujo vehicular. Se puede afirmar que según la investigación, o según el problema planteado y gracias al carácter estocástico y multivariable del tráfico vehicular, alrededor del mundo se han desarrollado modelos del flujo vehicular de todas las formas posibles e imaginables. A partir de allí, se determinó que el flujo puede tener dos enfoques: macroscópico y microscópico, y que en general todos los modelos deben ser regidos por las mismas variables fundamentales: *velocidad, densidad y flujo*, y por relaciones o ecuaciones entre dichas variables, similares en su forma. No obstante, hay quienes precisan bastante más en el nivel de profundización de los modelos. Para entenderlo mejor, se presenta la siguiente ilustración:

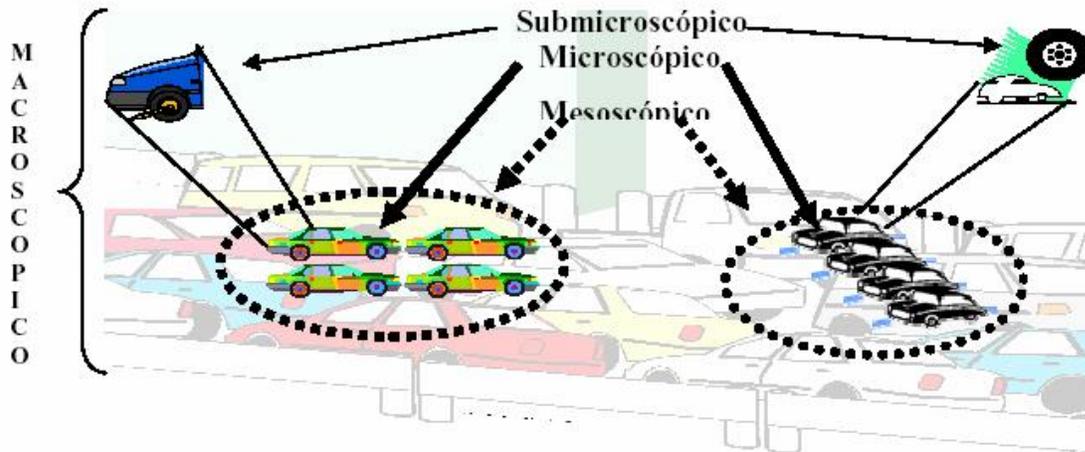


Figura 2. Descripción del grado de profundidad de los modelos de tráfico

Fuente: GONZÁLEZ, Juan Manuel ... et al. ¿Cómo mejorar el flujo vehicular por medio de la simulación?. Saltillo Coahuila, México : Escuela Nacional de Optimización y Análisis Numérico, 2003. p 2.

El capítulo que presento a continuación, tiene como objetivos, hacer un compendio de la investigación de los modelos más importantes, y sustentar la consecución de un conjunto de reglas y ecuaciones sobre las que el simulador fundamenta su funcionamiento.

✚ Modelos microscópicos:

Los modelos microscópicos buscan describir el comportamiento de un ser humano al volante de un automóvil cuando es influenciado por los diferentes estímulos y obstáculos típicos de una vía. Es importante tener en cuenta, que si se describe el comportamiento de cada carro dentro de un sistema en todo momento, entonces podría simularse de manera casi perfecta el tráfico vehicular ya que todo lo que pase dentro del modelo sería predecible y modelable. No obstante, dichos modelos tienen un enorme costo de realización, y para ser simulados requieren un gran costo computacional. Además generalmente estos modelos son concebidos en un ambiente de disciplina, donde la reacción



de un conductor ante un estímulo será casi siempre la misma, y es descrita con gran precisión en términos de posición, velocidad y aceleración. Los modelos microscópicos de tráfico, necesitan una enorme cantidad de datos específicos, y pueden llegar a ser lo suficientemente complejos como para perder capacidad de simular o explicar correctamente el tráfico. Además exigen información que generalmente no es adquirible, o medida fácilmente.

Los modelos microscópicos tienen en cuenta diferentes valores de tamaños y características para cada elemento. A continuación, se muestran enunciados de algunos de los principales modelos:

*Modelos del vehículo siguiente*¹

Fueron desarrollados buscando estimar el comportamiento de los vehículos en un flujo de tráfico. Es decir, estimar la respuesta del vehículo siguiente con respecto al comportamiento del vehículo que viaja adelante (vehículo precedente).

Modelos de la General Motor

Todos los modelos desarrollados por la General Motors se basan en el mismo principio.

Respuesta = función (Sensibilidad, Estímulo)

La *Respuesta* está siempre representada por la aceleración o desaceleración del vehículo siguiente y el *Estímulo* por la velocidad relativa entre el vehículo precedente y el vehículo siguiente. La diferencia entre los 5 modelos está en como se representa la *Sensibilidad*.

¹ DEXTRE, Quijandria Juan; CARRASCO, Luis Freddy. Modelo de simulación de tráfico vehicular. Trujillo, Perú: Pontificia Universidad Católica de Perú, 2000. p 3.



- *Primer modelo:* Desarrollado por Clander R.², Herman E. y Montroll E. Utiliza un valor constante de sensibilidad.
- *Segundo Modelo:* Ahora la Sensibilidad tiene uno de dos estados de acuerdo a la distancia entre los vehículos. Para una corta distancia entre vehículos, a_1 será usado. Para una distancia larga entre vehículos, a_2 será usado, con $a_1 > a_2$. Esto significa que los conductores son más sensibles a distancias cortas con respecto al vehículo siguiente que a mayores distancias.
- *Tercer Modelo:* Toma en cuenta la distancia de separación entre los dos vehículos. Para la sensibilidad se tiene un valor constante a_0 y la distancia de separación entre los vehículos es incluida para reflejar cómo el valor de la sensibilidad se incrementa cuando los vehículos están cerca y cómo disminuye cuando la distancia de separación se empieza a hacerse cada vez más grande.
- *Cuarto Modelo:* Incorpora la velocidad del vehículo siguiente. Si la velocidad del tráfico aumenta, el conductor del vehículo siguiente va a estar más sensible a la velocidad relativa entre él y el vehículo delantero.
- *Quinto Modelo:* Este modelo puede representar el comportamiento del flujo del tráfico asumiendo que todos los conductores tienen el mismo comportamiento y que todos los vehículos tienen las mismas características, dado que estos parámetros no son considerados en el modelo.

Modelo de Gipps del vehículo siguiente

² CLANDER R., HERMAN E. y MONTROLL E. Traffic Dynamics : Studies in car Following. En : Operational Research. S.l. no.2 (1958) ; p.16.



Un nuevo modelo del vehículo siguiente fue desarrollado por P. Gipps³, destinado a utilizarse en una simulación en computador.

Este modelo estima la respuesta del vehículo siguiente basado en el supuesto de que cada conductor establece límites a su aceleración y desaceleración.

Se supone que el conductor del vehículo siguiente no excede su velocidad de viaje deseada. En el caso de una aceleración libre, la velocidad primero se incrementa y luego la aceleración se hace cero hasta alcanzar la velocidad deseada, es decir, hasta alcanzar una situación de equilibrio.

✚ Modelo de Conservación vehicular⁴

Especialmente diseñado, para simulación de flujo en autopistas de varios carriles. Se basa en la ecuación de conservación vehicular, enunciada a partir del siguiente gráfico:

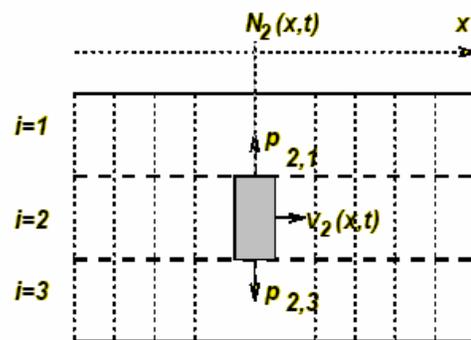


Figura 3. Modelo de conservación vehicular de autopista con carriles discretos.

Fuente: ÁLVAREZ Icaza, Luis. Simulación y control tráfico vehicular. México : UNAM, 2005. p.5

³ GIPPS P., A behavioural car-following model for computer simulation. En: Transportation Research. S.I. (1981) ; p 105

⁴ ÁLVAREZ Icaza, Luis. Simulación y control tráfico vehicular. México: UNAM, 2005. p.5



$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \{V(x,t)N(x,t) + P(x,t)N(x,t)\}$$

Donde:

x : Posición

$N(x,t)$: Densidad

t : Tiempo

$V(x,t)$: Velocidad

$P(x,t)$: Razón de cambio de carril

✚ Modelos Macroscópicos:

Estos modelos tienen un enfoque muy diferente, pero buscan dar solución al mismo problema, los congestionamientos ó exceso de tráfico vehicular.

Los modelos macroscópicos no tienen en cuenta características específicas de los automóviles, y generalmente promedian todos los datos o variables cuyo comportamiento estadístico permite promediar. Buscan establecer análisis sobre volúmenes de tráfico, y dar respuestas bien aproximadas sobre los congestionamientos, las demoras, los tiempos promedio en el sistema, entre otras.

Ha sido ya demostrado, que aproximaciones al flujo vehicular por modelos similares a los hidrodinámicos de primer o segundo orden, solo aportan pequeños detalles para la observación del tráfico. Se ha abordado también el tráfico vehicular de forma macroscópica, como un problema de asignación dinámica de flujos, usando técnicas de optimización y control óptimo, no obstante, todo eso requiere en la práctica un comportamiento ideal y obediente de los usuarios de las vías. (En ese sentido, esta aproximación se parece bastante a la desarrollada en este trabajo).

Veamos algunos enunciados de los modelos consultados:



✚ Modelos de asignación de equilibrio⁵

Han mostrado alguna certeza teórica. De ellos se conocen dos tipos:

- Equilibrio del usuario: Basado en el principio de Wadrop que afirma que “los tiempos de viaje en todas las rutas realmente utilizadas, son menores o iguales que los que requeriría un usuario en cualquier ruta no utilizada”. Por lo que, un sistema gobernado por este modelo, asignará entonces usuarios a las rutas hasta encontrar un equilibrio, de manera tal que para cada usuario, una vez todas las rutas estén asignadas, será imposible cambiar su ruta, sin incrementar el costo del viaje.
- El modelo de optimización del sistema, que es algo similar al anterior, busca minimizar el tiempo total de viaje de toda la red (similar a este trabajo), pero es meramente teórico, pues implica que cada usuario debe respetar una ruta asignada (no necesariamente la mejor) por el sistema, de manera tal que la optimización se lleve a cabo.

✚ Modelo de Nagel-Schreckenberger⁶

Este es uno de los tantos modelos basados en la conocida relación parabólica entre el flujo φ y densidad ρ . Esta relación que tiene a la velocidad como tercera variable, podríamos considerarla como la más importante en cualquier análisis de tráfico vehicular, y a menudo es escrita así: $\varphi = \rho v$

Pero dado que la velocidad es un parámetro que puede variar según muchos aspectos en una vía, los modelos de tráfico

⁵ LOZANO, Angélica; TORRES, Vicente; ANTÚN Juan Pablo. Tráfico vehicular en zonas urbanas. México : UNAM, 2002. p 37.

⁶ RODRIGUES, Áttila L.; de OLIVEIRA Mário J. Continuous Time Stochastic Models for Vehicular Traffic on Highways. En : Brazilian Journal of Physics. Sao Paulo (2003) ; p.374-380.



pueden determinar diferentes familias de curvas según el caso y las leyes que lo rijan, como se ve en el siguiente ejemplo:

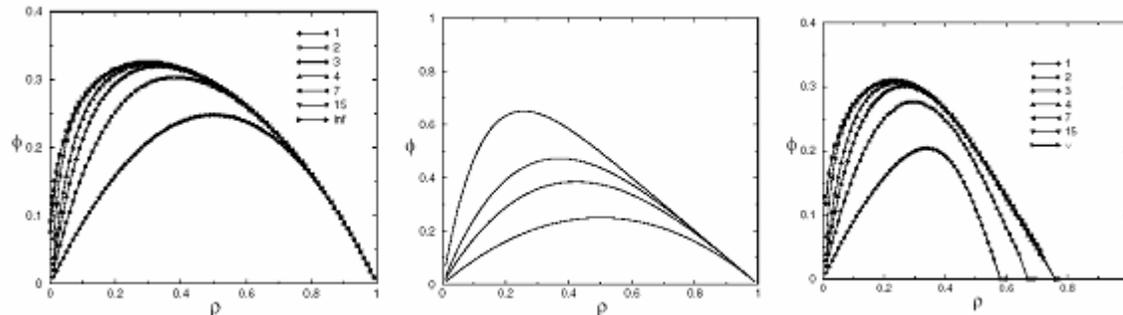


Figura 4. Variación de las familias de curvas ϕ vs ρ con la velocidad como parámetro. En el mismo modelo, variaciones “microscópicas” sobre el comportamiento de un vehículo frente a estímulos, deforman la parábola original del modelo básico.

Fuente: RODRIGUES, Áttila L.; de OLIVEIRA Mário J. Continuous Time Stochastic Models for Vehicular Traffic on Highways. En : Brazilian Journal of Physics. Sao Paulo. (2003) ; p.374-380.

🚦 *Modelo lineal de B. D. Greenshields⁷*

Este es uno de los modelos más cercanos al grupo de reglas utilizadas en el simulador, y consiste en la linealización de un conjunto de datos obtenido por el investigador, donde se establecen las diferentes relaciones parabólicas, no sólo entre la densidad y el flujo, sino también entre la velocidad y el flujo, y una relación lineal decreciente entre la velocidad y la densidad; hecho que puede ser confirmado intuitivamente, cuando pensamos que un grupo de vehículos que viaja a mayor velocidad, viaja más disperso, es decir, los vehículos conservan

⁷ GREENSHIELDS, B.D. A study in highway capacity, highway research board, Proceedings. 1935.



mayor distancia entre ellos ó, en otras palabras, forman un flujo menos denso.

La ecuación fundamental del modelo es:

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c} \right) k$$

Donde v_e : Es la velocidad media espacial (km/h)

k : Es la densidad (veh/km/carril)

v_l : Velocidad media espacial a flujo libre (km/h)

k_c : Densidad de congestonamiento según la capacidad de la vía (veh/km/carril).

✚ *Modelo logarítmico de H. Greenberg*⁸

Este es uno de los modelos que apoyado en la analogía del flujo vehicular con el flujo hidrodinámico, tuvo más resonancia en la ingeniería y el estudio del tráfico. De la combinación y discretización de las ecuaciones de movimiento y continuidad de fluidos compresibles, aplicadas al flujo vehicular, se obtienen las principales ecuaciones. Debemos anotar que el modelo, tiene gran nivel de validez especialmente en flujos congestionados, pero que falla en condiciones de flujo libre.

Las ecuaciones son:

$$\bar{v}_e = v_m \ln \left(\frac{k_c}{k} \right)$$

En las ecuaciones anteriores se conserva la notación del modelo de Greenshields, además :

v_m : Es la velocidad a flujo máximo sobre la capacidad de la vía.

⁸ GREENBERG H. An analysis of traffic flow. En : Operations Research. S.I. (1959) ; p.63.



q : Es el flujo.



✚ *Modelo exponencial de R. T. Underwood⁹*

La formulación de este modelo buscaba representar más fielmente el comportamiento del flujo libre. Es más usado para modelar autopistas y avenidas ó carreteras urbanas, donde se presenta más éste fenómeno. Tiene mucha aceptación en condiciones de flujos no congestionados. Siguiendo con la notación de los modelos anteriores, sus ecuaciones fundamentales son:

$$\bar{v}_e = v_l e^{-(k/k_m)}$$
$$q = v_l k e^{-(k/k_m)}$$

✚ *Familia de modelos de L. A. Pipes y P. K. Munjal¹⁰*

Esta familia de modelos de menor trascendencia, sujeta a n como un número real mayor que 0 , muestra como cuando $n=1$ se obtiene el modelo de Greenshields.

$$\bar{v}_e = v_l \left[1 - \left(\frac{k}{k_c} \right)^n \right]$$

⁹ UNDERWOOD, R. T. Speed, volumen and density relationships, quality and theory of traffic flow. En : Yale Bureau of Highway Traffic. S.l. (1961) ; p.41.

¹⁰ CAL, Rafael; CÁRDENAS, James. Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones. México : Universidad del Valle, 2003. p 260-280.



2.2 BASES TEÓRICAS

Probabilidad del flujo vehicular¹¹

Todo sistema de simulación o modelado de flujo vehicular debe presentar de alguna forma la generación de vehículos, o el ingreso de éstos al modelo.

Es evidente que el comportamiento del flujo en algún punto es imposible de describir determinísticamente, pero igualmente es fácil advertir que el tráfico puede ser modelado estadísticamente con cierta precisión. Para predecir los vehículos que se espera que pasen por una vía en un intervalo de tiempo, es necesario hacer una recolección preliminar de datos, por medio de aforos vehiculares.

Los aforos, son los conteos de los tipos de vehículos que pasan por un lugar en varios períodos de tiempo, que generalmente son cada cuarto de hora a lo largo de las horas de mayor congestión. Una vez se tienen dichos aforos debemos observar, que los datos, como cualquier conjunto de datos numéricos en un experimento, tienen una distribución de probabilidad estadística, y es la que ayuda a modelar y simular el tráfico correctamente.

Existen tres condiciones fundamentales en el análisis que determina cuál es la función de densidad de probabilidad que más se acerca a describir el comportamiento disperso y aleatorio del flujo.

- Un conductor sólo condiciona la posición de su vehículo respecto a otro cuando éstos están realmente cerca.
- Para cualquier flujo vehicular, la variación del número de vehículos que pasa por un punto respecto a otro punto, es independiente en un mismo intervalo de tiempo.

¹¹ CAL, Rafael; CÁRDENAS, James. Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones. Universidad del Valle, Méjico, 2003. p 284.



- Igualmente es independiente, el número de vehículos que pasa por el mismo punto en dos intervalos de tiempo.

Por las suposiciones anteriores, la distribución de probabilidad más aproximada es la distribución de Poisson.

Por lo tanto, la probabilidad de que a un punto lleguen x vehículos en un intervalo de tiempo es:

$$p(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!}$$

Donde m : Es el número de vehículos esperado en el intervalo de tiempo t .

Por lo que, también se puede reemplazar m por:

$$m = qt$$

Y así vemos mejor como la probabilidad de encontrar vehículos depende del tiempo y del flujo. Por eso, la probabilidad de no encontrar vehículos para un intervalo t dado, es decir $p(x)=0$ es:

$$p(x) = \frac{qt^0 e^{-qt}}{0!} = e^{-qt} \text{ para } t \geq 0$$

Es decir, la probabilidad de no encontrar carros decrece exponencialmente con el crecimiento del flujo q y el tiempo t .



✚ Teoría de colas¹²

La teoría de colas es una de las herramientas más comúnmente usadas en el análisis de problemas de congestión. Cualquier fenómeno de espera, en donde se presta un *servicio*, atiende las reglas y el modelo de la teoría de colas. En los modelos de tráfico vehicular, los policías acostados, las reducciones de calzadas, las casetas de peajes y los semáforos, pueden ser perfectamente tratados como una cola.

Para entender algunas de las ecuaciones más importantes, se utilizarán las siguientes variables y su respectiva notación:

λ : Representa la tasa de llegadas de vehículos a una estación de servicio.

μ : Representa la tasa media de servicio a la que se atienden los vehículos de la cola

La tasa de llegadas es también llamada *demanda*, así como la tasa de servicio es llamada *capacidad*.

La disciplina que rige una cola que simula cualquier fenómeno de tráfico vehicular, es la más común de la teoría de colas, y se enuncia como: *"El primero que llega es el primero que sale."*

La *capacidad* de un semáforo tiene, en el *flujo de saturación* su valor máximo, y será igual a μ siempre que sobre éste no se presente una cola. Es decir, si los vehículos llegan dispersos ó bajo flujo libre a la intersección con semáforo, $\lambda = \mu$; o en otras palabras, los vehículos son atendidos (salen) a la misma tasa con que llegan.

¹² CAL, Rafael; CÁRDENAS, James. Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones. Universidad del Valle, Méjico, 2003. p 300-320.



✚ *Tiempo para disipar una cola:*

Se puede entonces calcular, para un semáforo el tiempo que requiere para disipar una cola de una manera muy simple:

Sabemos que el servicio durante el tiempo de verde, deberá igualar la demanda durante el tiempo de rojo t_r y el tiempo de verde, es decir, durante todo el ciclo.

También sabemos que durante el tiempo de verde, habrá una tasa de servicio igual a la saturación mientras haya cola, es decir, en un tiempo t_d , tiempo de disipación de la cola, y en el resto del tiempo de verde t_x la tasa de servicio será igual a la tasa de llegada: $\lambda = \mu$.

Por lo tanto, un ciclo de semáforo C , se puede expresar como:

$$C = t_r + t_v = t_r + (t_d + t_x)$$

Y para disipar la cola, se debe igualar la *demanda* mientras el tiempo de rojo y el de saturación, con la *capacidad* durante el tiempo de disipación t_d así:

$$l(t_r + t_d) = m t_d$$

Por lo que:

$$t_d = \frac{l t_r}{m - l}$$

Otro parámetro importante de la teoría de colas aplicada al tráfico vehicular es el factor de utilización, y representa que tan utilizado está siendo una intersección según los tiempos de un semáforo, y se escribe como:

$$r = \frac{l}{m}$$



Y reemplazando queda:

$$t_d = \frac{rt_r}{1-r}$$

Se concluye entonces de las expresiones anteriores, que los cálculos de los tiempos óptimos para un semáforo dependen de su *capacidad* y su *demanda*.

Recordemos que en la figura 1 y su explicación posterior, el mapa del poblado mostraba que sólo 1 entre 12 controladores de semáforos en 12 diferentes intersecciones funcionaba en diferentes planos durante el día. ¿Será posible que la gran mayoría de las intersecciones del Poblado presenten los mismos patrones de *demanda* en sus diferentes afluentes durante todo el día?

✚ Bases teóricas del simulador

Al igual que cualquier otro fluido, el flujo vehicular puede definirse en términos de tres variables fundamentales como ya se dijo anteriormente: *flujo q*, *velocidad v* y *densidad ρ*. Si hacemos un acercamiento a la mínima expresión del flujo vehicular podremos visualizar fácilmente las variables y sus nombres como se muestra en la siguiente figura:



Figura 5. Relaciones de tiempo y espacio entre vehículos



Fuente: CAL, Rafael; CÁRDENAS, James. Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones. México : Universidad del Valle, 2003. p.257.

Las siguientes son las ecuaciones fundamentales del flujo vehicular:

$$v = \frac{x}{t}$$

Convertida para el flujo vehicular en:

$$\bar{v}_e = \frac{\bar{x}}{\bar{t}}$$

Donde: v_e : Es la velocidad media espacial

\bar{t} : Es el intervalo de tiempo promedio en el flujo.

\bar{x} : Es el espaciamiento promedio en el flujo.

El *flujo* es entonces el inverso del intervalo promedio:

$$q = \frac{1}{\bar{t}}$$

Y la *densidad* es el inverso del espaciamiento promedio:

$$r = \frac{1}{\bar{x}}$$

Finalmente, reemplazando en la ecuación inicial, obtenemos la conocida como *ecuación básica del flujo vehicular*:

$$q = vr$$

La ecuación anterior reviste gran importancia, y es más comprensible al analizarla desde la siguiente gráfica:

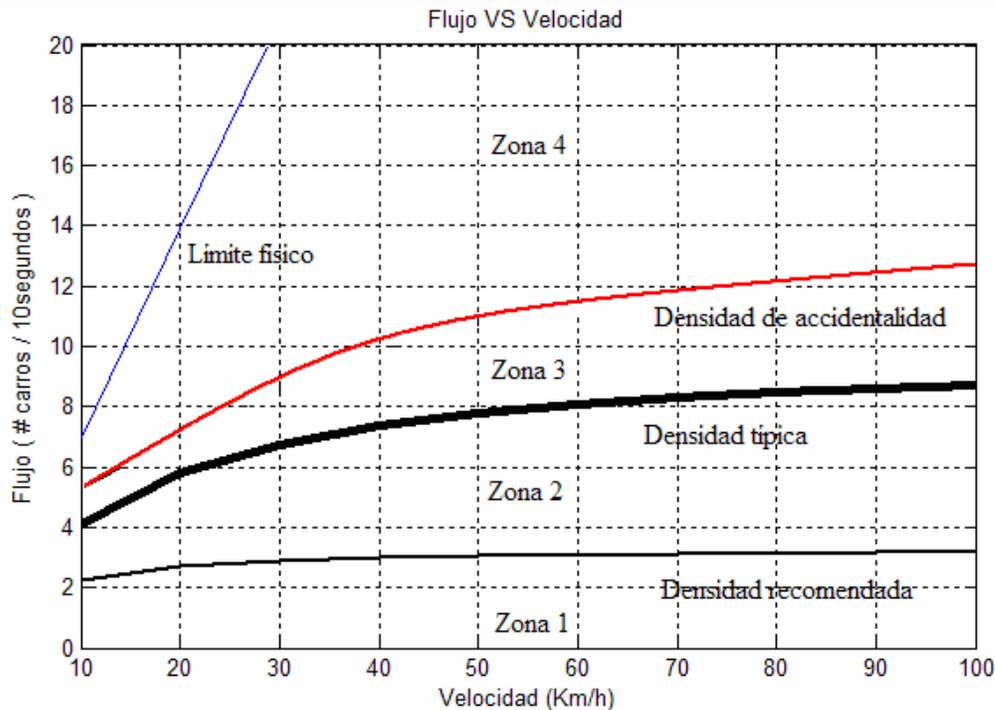


Figura 6. Gráfica de flujo vs velocidad según la ecuación fundamental del flujo vehicular $q = \rho v$.

✚ **Gráfica flujo vs velocidad:**

Cada una de las cuatro líneas de la gráfica fue obtenida a partir de la ecuación:

$$q = \frac{v}{x}$$

Teniendo en cuenta que el espacio x es quien determina la densidad de dicho flujo a cierta velocidad podemos decir, que las funciones son la familia *flujo vs velocidad* parametrizada por la *densidad*.

Además debemos modificar la expresión, para hacer cumplir el hecho de que el espaciamiento en un flujo de vehículos de una



misma densidad varía típicamente con la velocidad, es decir, a mayor velocidad, más espaciamento entre vehículos así:

$$q = \frac{v}{s+l}$$

Donde, como se ve en la figura 6, el espaciamento es la suma de la separación s y la longitud l .

Y finalmente, escribimos la separación en función de la velocidad, obteniendo:

$$q = \frac{v}{vb+l}$$

Donde b es la brecha, es decir el tiempo entre la parte trasera del vehículo de adelante y la parte delantera del vehículo perseguidor.

✚ Longitud promedio de vehículos:

La longitud promedio de los vehículos en nuestra ciudad, teniendo en cuenta el porcentaje de automóviles, motos, buses y camiones, en las zonas sometidas al estudio fue determinada según aforos de la empresa Civilec y Cia Ltda. para la oficina central de semáforos de la ciudad así:

Tabla 1. Equivalencia de vehículos en PCU

Homologación de vehículos EN pcu	
AP=Automóvil particular	1
TA=Taxi	1
BU=Bus	2.2
BM=Buseta y micro	1.5
MO=Moto	0.3
CA=Camión	2.5
BI=Bicicleta	0.2
TC=Tractocamión	3



La homologación en pcu significa la equivalencia de todos los vehículos para un mismo tamaño (siglas en inglés para: Passenger Car Unit), luego se obtienen los promedios de vehículos en aforos en varios cruces del poblado durante un cuarto de hora, así:

Cra. 43-CII. 10:

AP	TA	BU	BM	MO	CA	BI	TC
110	116	17	25	84	2	16	0

Cra. 43-CII. 4s-5s

AP	TA	BU	BM	MO	CA	BI	TC
138	89	7	25	56	1	6	0

Cra. 43-CII. 12s

AP	TA	BU	BM	MO	CA	BI	TC
109	64	8	27	41	2	4	0

Cra. 43-CII. 17s

AP	TA	BU	BM	MO	CA	BI	TC
91	44	8	17	41	2	4	0

Cra. 43-CII. 1s

AP	TA	BU	BM	MO	CA	BI	TC
148	111	8	28	76	3	13	0

Cra. 43-CII. 14

AP	TA	BU	BM	MO	CA	BI	TC
85	117	16	25	87	2	18	0

Con los datos de los aforos, se obtienen los porcentajes:

AP	TA	BU	BM	MO	CA	BI	TC
----	----	----	----	----	----	----	----



36%	28%	3.3%	7.7%	20%	0.6%	3.2	0%
-----	-----	------	------	-----	------	-----	----

La longitud de un vehículo pcu, según varias fuentes consultadas oscila entre 4 y 4.5 metros, dadas las características de nuestro parque automotor, en especial de los vehículos particulares tipo automóvil tomaremos la longitud media de 4 metros.

Para obtener la longitud ponderada, no se toman en cuenta motos y bicicletas, dado que, estos vehículos generalmente no hacen parte de las colas en los semáforos. Así los porcentajes de vehículos que si forman colas son:

AP	TA	BU	BM	CA	TC
47%	37%	4.4%	10.7%	0.8%	0%

Por lo que la longitud promedio:

$$\bar{l} = [(0.47*1)+(0.37*1)+(0.044*2.2)+(0.107*1.5)+(0.008*2.5)+(0*3)]*4mts$$

$$\bar{l} = 4.469mts \approx 4.5mts$$

Y la ecuación queda:

$$q = \frac{v}{vb + 4.5mts}$$

Una vez obtenida la ecuación, se reemplaza el valor de la brecha y queda la gráfica de la figura 1.5 claramente dividida en cuatro zonas.

La primera zona está representada en color azul claro, y está limitada por la llamada *regla de los tres segundos*. Esta regla internacionalmente conocida, sugiere que el intervalo de tiempo entre dos vehículos que transitan uno tras otro sobre el mismo carril, debe ser, a cualquier velocidad, tres segundos. Entonces si se transita a 20 km/h, la distancia entre carros debe ser 16.7 metros, y si se transita a 80 km/h (límite máximo de velocidad de las vías rápidas urbanas, y de las carreteras en nuestro país) la distancia debe ser 66.7 metros. La pregunta es: *¿alguna vez se ha visto un grupo de carros, que viajando a 80 km/h, cada vehículo conserve una distancia de casi una cuadra respecto al de*



adelante? Como se puede intuir, es realmente poco típico ver un flujo cuya densidad cumpla con la *regla de los tres segundos*; aunque en ocasiones, especialmente en condiciones de lluvia y a velocidades medias sí es observable.

La segunda zona demarcada en color azul oscuro, está limitada por una línea de valores típicos del flujo a diferentes velocidades, y se obtiene cambiando la brecha de tres segundos a sólo un segundo. Esta zona contiene los flujos que podemos denominar dispersos, especialmente en las altas velocidades, pues están entre los flujos de brecha de tres segundos, y los flujos típicos.

Por encima de los flujos típicos, se empieza a incrementar el peligro de los flujos, por ser considerados de alta densidad o congestionados. El límite de esta tercera zona es la línea de mayor accidentalidad, ya que existe una gran probabilidad de que un flujo que contenga una densidad y una velocidad muy alta, ocasione colisiones. Un caso concreto puede apreciarse en un grupo de vehículos que viajen a una velocidad media de 100 km/h, y que formen un flujo de 13 carros/10 segundos. Esto implica un brecha promedio entre cada vehículo de sólo 16 metros, lo que a esa velocidad es altamente peligroso, ya que en caso de algún imprevisto, sólo le deja al conductor menos de medio segundo para reaccionar y aún menos tiempo a los frenos para detener el auto.

Finalmente la cuarta zona, tiene un sentido meramente teórico, y está por debajo del límite físico, delineado por la línea delgada de color azul claro. Este límite implica que no existe brecha entre los carros, y que todos viajan perfectamente sincronizados y unidos entre sí. Tal vez esta zona tenga validez algún día, en que podamos controlar la distancia entre los carros de manera automática, para que sea constante a cualquier velocidad.

✚ *Gráfica, f vs t en un ciclo de semáforo:*



Para acercar más los conceptos a las necesidades del simulador, es importante analizar el comportamiento del flujo en el tiempo de verde durante un ciclo de un semáforo.

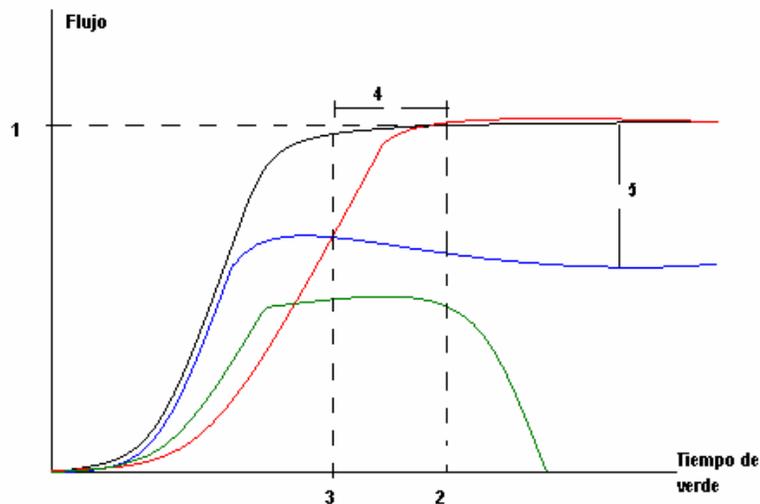


Figura 7. Gráfica flujo vs tiempo.

- 1- ϕ_{max} Flujo máximo. Limitado por el tamaño de la vía y la velocidad finita de los carros.
- 2- T_{ss} Tiempo de estabilización. El que se demora un flujo en alcanzar su valor ideal.
- 3- Tiempo de estabilización ideal, también determinado por las características físicas de la vía.
- 4- Retardo de alcance de curva ideal.
- 5- Factor de desaprovechamiento de verde.

Análisis de la gráfica

La curva negra es la curva ideal, su pendiente inicial, esta definida por los parámetros físicos de la vía. El alcance del flujo máximo dice cuando un tiempo en verde pasa el mayor número de carros por segundo. De la curva roja se puede observar, que algunas circunstancias, como el tráfico del segmento de vía contiguo, pueden retardar el alcance del flujo ideal. La curva azul



muestra el caso en que el segmento, no alcanza a aportar el flujo máximo que podría, por lo que un tiempo de verde se está desperdiciando. Y en la curva verde, se puede ver el caso no deseado, y es cuando el flujo de salida no tiene a donde ir, entonces se produce un embotellamiento. Nótese finalmente, que el total de carros que salen, es precisamente la integral de cualquiera de las curvas, y que si lo que se pretende es desocupar las vías lo más rápido posible, siempre se tratará de generar la curva ideal para cada verde en cada segmento de vía.

Deducción del simulador

Después de un estudio detallado sobre la teoría resumida en este capítulo y observaciones acerca del sistema que se pretendía simular; las primeras bases sobre el modelo se plantearon de la siguiente manera:

Se concluyó que el mejor modelo era uno donde se usaran segmentos de vía, en los que se sigue un comportamiento muy similar al de los fluidos y en los tanques, o el voltaje en los condensadores. Como casi cualquier modelo, sus variables principales serían *flujo* y el *tráfico ó almacenamiento*.

Por lo tanto, inicialmente cada segmento contaba con los siguientes parámetros y señales:



Tabla 2. Señales y parámetros del modelo inicial

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidades</i>
Tráfico almacenamiento	ó Señal	Γ	# carros
Flujo vehicular	Señal	ϕ	# carros/s
Flujo max.	Parámetro	ϕ_{\max}	# carros/ciclo
Almacenamiento max.	Parámetro	Γ_{\max}	# carros
Capacidad de dispersión	de Parámetro	c_d	# carros/(m ciclo)
Capacidad de generación	de Parámetro	c_g	# carros/(m ciclo)
Longitud	Parámetro	L	M
%Almacenamiento	Señal	$\% \Gamma$	Adimensional

Los parámetros deberían ser obtenidos estadísticamente de la toma de datos en las calles, y las variables o señales se relacionan por las siguientes ecuaciones:

- El almacenamiento de cada segmento de vía al final de un ciclo de semáforo se expresa como:

$$\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_r + \Gamma_d + \sum_{i=1}^m \Gamma s_i$$

Donde Γ_n : Es el tráfico nuevo generado en el segmento de vía según la hora y la zona de la ciudad durante el ciclo de semáforo, y se describe según la capacidad de generación de un segmento c_g así:

$$\Gamma_n = c_g \Gamma s$$

$$\Gamma_r = \Gamma_{-1} - \Gamma s$$

Donde Γ_r : Es el tráfico remanente que no pudo salir del semáforo en el ciclo anterior.

Γ_{-1} : Es el almacenamiento del ciclo pasado.

Γs : Es el tráfico del segmento.



$$\Gamma_d = c_d \Gamma_s$$

Donde c_d : Es la capacidad de dispersión de tráfico de un segmento.

- También podía expresarse el almacenamiento en función del flujo así:

$$\Gamma_s = \int_0^T f(t) dt$$

Para semejar entonces un segmento de vía terminado en una intersección con semáforo, se representó como un circuito RC (Resistencia-Condensador) activado por una señal cuadrada. Su función de transferencia:

$$V_c(s) = \frac{1}{RCs + 1} V(s)$$

Y su representación en diagrama de bloques

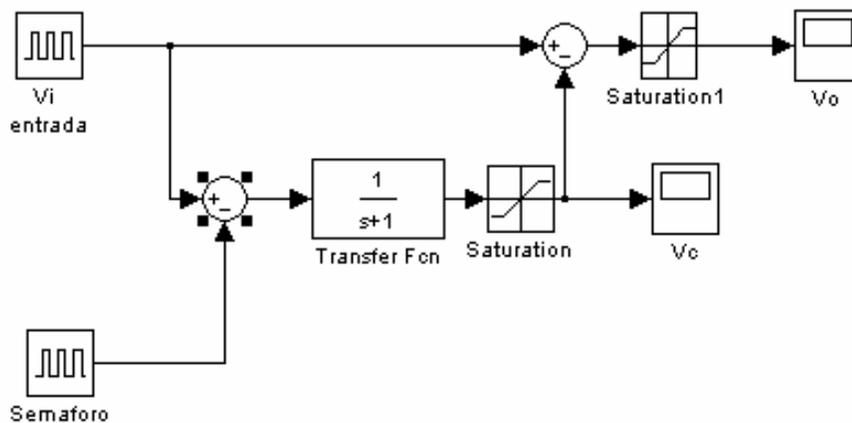


Figura 8. Representación en diagrama de bloques de la primera aproximación al modelo de segmento de vía semaforizado.



Una primera simulación se realizó en Circuit Maker, dejando los siguientes resultados:

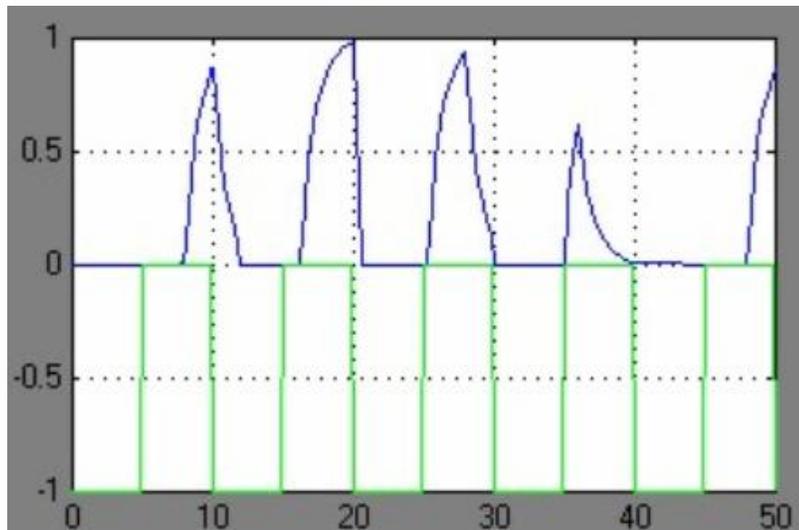


Figura 9. Resultado del primer diagrama de bloques.

En azul se ve el tráfico que se almacena en el segmento de vía, y la onda cuadrada representa un rojo cuando está en 0 y un verde cuando está en -1. Es importante también tener en cuenta que el tráfico que llega al segmento de vía es otra onda cuadrada de diferentes parámetros.

El análisis de estos resultados, trajo conclusiones y cambios al modelo, el cambio más significativo fue en el bloque básico de segmento de vía semaforizado, que era una analogía al modelo eléctrico de condensador-resistencia, donde en el voltaje del condensador se describía la forma como se almacenaban los carros (tráfico ó almacenamiento), y en el voltaje de la resistencia se veía el flujo de salida del semáforo hacia fuera. Este modelo fallaba porque cuando no había tráfico de entrada, el "condensador" se descargaba incluso cuando el semáforo estuviera en rojo. Es decir, los carros saldrían del semáforo estando en rojo.



El nuevo bloque básico de segmento de vía sería de la siguiente manera:

- Un integrador que permite ir almacenando la cantidad de carros que entran con un flujo determinado.
- El semáforo va descargando periódicamente este tráfico almacenado. La descarga se hace a una velocidad promedio constante cuando está en verde; ésta velocidad proporciona el flujo de salida de ese semáforo.
- El segmento debe respetar su capacidad máxima de almacenamiento por medio de un bloque de saturación. Cuando se alcance este máximo, el flujo de entrada debe parar mientras se desocupa el segmento.
- No puede haber flujo de salida cuando no haya carros almacenados. Para nuestro modelo, el hecho de que no haya flujo de salida cuando el almacenamiento es cero implica que no habrá almacenamiento negativo (e.g. hay -10 carros). Esto implica la necesidad de un bloque de switche.
- El flujo de salida de cada semáforo deberá ser repartido hacia los diferentes segmentos contiguos por medio de la asignación de un porcentaje de distribución. Es decir, se necesita un bloque de ganancia.
- Si alguno de los segmentos de salida de una intersección alcanza su capacidad máxima (se llena), el flujo de salida de cada semáforo o segmento que puede viajar hacia el segmento lleno debe parar, y las calles en cada semáforo comenzar a almacenar tráfico. Este es el efecto Back Propagation del taco y da origen a las señales de taco en el simulador.
- El tráfico debe ser generado de forma aleatoria semejando una distribución pobabilística de Poisson. Se crea el bloque de generación.
- Los vehículos no pueden llegar de un segmento a otro inmediatamente. Para poder observar sincronizaciones y demoras se crea el bloque de retardo entre segmentos.



Para obtener información completa acerca del simulador y sus bloques léase el Manual del usuario en el capítulo II.

2.3 ANÁLISIS SOBRE EL TIEMPO Y ESPACIO DE USO DEL SISTEMA VIAL

Después de este recorrido teórico por los principales elementos del tráfico vehicular, y el planteamiento del modelo para el simulador, se ha logrado una aproximación concreta de las variables más importantes en la búsqueda de una función que permita conocer el tiempo de uso del sistema para cualquier viaje.

Se debe hacer claridad en que, disminuir el tiempo de uso del sistema vial sin que se vea afectada la seguridad, es la meta intrínseca de este trabajo. No obstante, aunque todo conductor de alguna manera puede calcular intuitivamente un valor de la función del tiempo de uso del sistema para un viaje, dicha función está lejos de ser modelada matemáticamente. Es común decir: *"llego en quince minutos"*, pero ningún sistema en ningún lugar del mundo tiene total certeza sobre ese tiempo. Sin embargo varios aspectos no tan evidentes deben ser resaltados, después de entender los conceptos de los modelos de tráfico vehicular, y son los siguientes:

- La gran mayoría de la actividades que realizamos requieren transporte, y un gran porcentaje de la población se moviliza al menos una o dos veces al día dentro de una ciudad.
- Las ciudades no han sido diseñadas para el transporte como lo conocemos actualmente. Las ciudades nacieron para el transporte a pie o a caballo, e incluso la mayoría de los nuevos barrios no son construidos bajo planeación urbana; simplemente van naciendo de la expansión territorial.



- La densidad de vías en una zona urbana será alta mientras dicha zona sea plana, y no montañosa.
- A pesar de que una zona urbana plana, tenga buena densidad de vías por área, ninguna zona tendrá una buena densidad de avenidas por área, y éstas últimas son las responsables de la gran carga de tráfico de la ciudad.
- La falta de avenidas se debe a que éstas, siempre se necesitan después de que la ciudad está construida y no hay espacio para ellas.
- A pesar de que nunca un sector tendrá avenidas suficientes, no es matemáticamente imposible tener un buen sistema de transporte con la infraestructura vial de las ciudades de nuestro país.
- El verdadero problema está en nuestro modo individualista de movilizarnos.

✚ ¿Transporte público ó transporte particular?

Como vimos anteriormente los taxis y automóviles particulares forman el 64% de los vehículos en el poblado y los buses y microbuses sólo el 11%. Recordemos además que sólo el 13% de la población urbana tiene carro particular, y que más del 60% se mueve diariamente en transporte público. Ahora, mientras en un bus, que equivale en espacio pcu a 2.2 vehículos particulares se movilizan en promedio 20 personas, en un carro particular lo hacen 1.4 personas. Y teniendo en cuenta que el bus usa normalmente 2.5 veces más de tiempo para un recorrido que un particular, podemos afirmar que en el espacio-tiempo que un bus mueve 20 personas, sólo se mueven 7.7 personas en vehículos particulares ($1.4_{per/veh} * 2.2_{veh/bus} * 2.5_{t_veh} / t_{bus} = 7.7_{per}$).

La siguiente tabla muestra las equivalencias para tiempo y



espacio de los vehículos:



Tabla 3. Equivalencias en pasajeros, tiempo y espacio de los diferentes vehículos.

Vehículo	Promedio de pasajeros	Equivalencia en espacio (pcu)	Equivalencia en tiempo
Particular	1.4	1	1
Taxi	1.6	1	1
Bus	20	2.2	2.5
Buseta-micro	6	1.5	2
Moto	1.05	0.3	0.7
Bicicleta	1	0.2	3

Ahora se supone que en un recorrido x promedio, se trata de movilizar el mayor número de pasajeros posible, utilizando en cada medio de transporte el mismo espacio-tiempo de la malla vial. Se obtiene el siguiente gráfico:

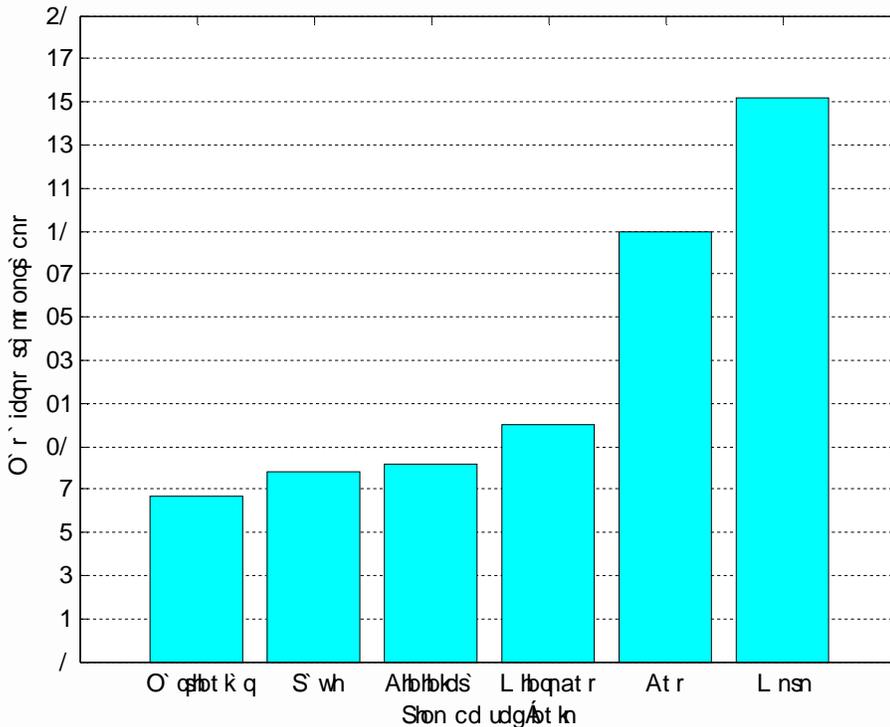


Figura 10. Número de pasajeros transportados por los diferentes vehículos para un mismo espacio-tiempo del sistema vial.

En la gráfica anterior, se puede ver, que el peor uso del espacio tiempo de un sistema vial lo realizan los vehículos particulares, y el mejor, las motos. Ha de extrañar a muchos que la bicicleta presente un mejor aprovechamiento que el vehículo particular o el taxi, y esto se debe en que en el espacio que uno sólo de estos ocupa, cabrían 5 bicicletas, a pesar de que el viaje se demore normalmente 3 veces más.

También se debe tener en cuenta, que la equivalencia de los tiempos de viaje, varía con los porcentajes de vehículos que ocupen el sistema vial, es decir, los cambios en la composición del flujo vehicular promedio de un sistema vial, cambian su tiempo de uso, ya que pueden volverlo más ágil para algunos y





más torpe para otros.

Es importante además hacer el siguiente análisis: Si un sistema vial requiere el 100% de su capacidad para movilizar n vehículos particulares en un intervalo de tiempo t , necesitaría los porcentajes de su capacidad para movilizar otros tipos de vehículos según indica la siguiente gráfica:

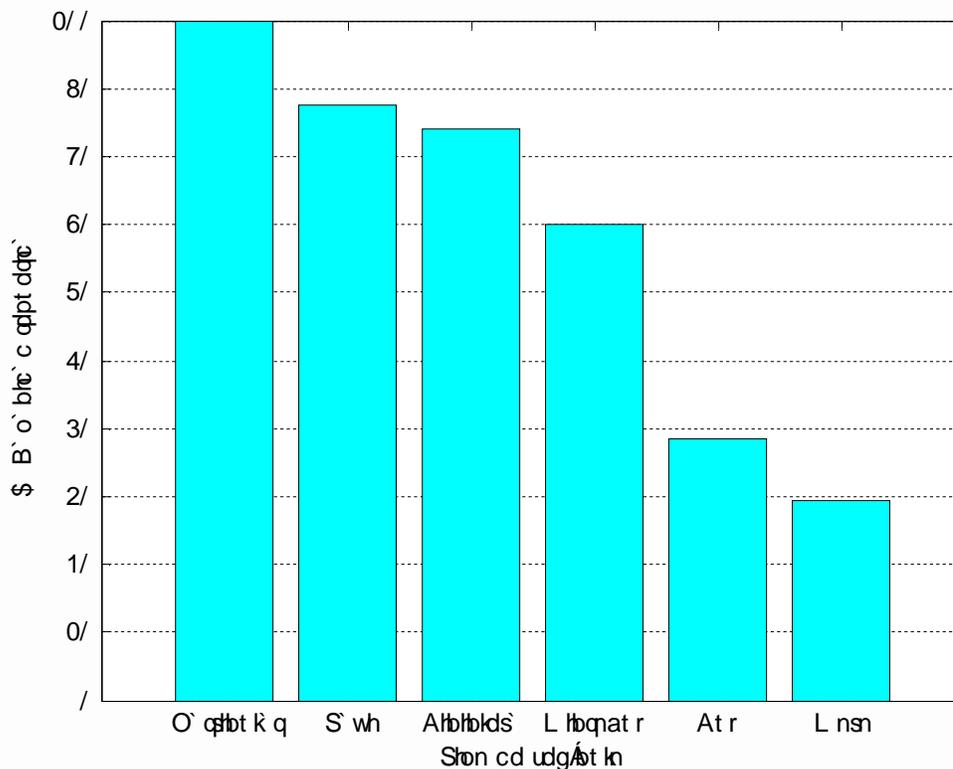


Figura 11. Capacidad vial requerida por los diferentes vehículos.

Como último análisis de éstos resultados, se ve que aquellos que usan el transporte público son contribuyentes al buen desempeño del sistema de transporte, más no quienes usan el vehículo particular; tal como se indica en el siguiente gráfico de uso del sistema vial de la avenida El Poblado en horas pico:

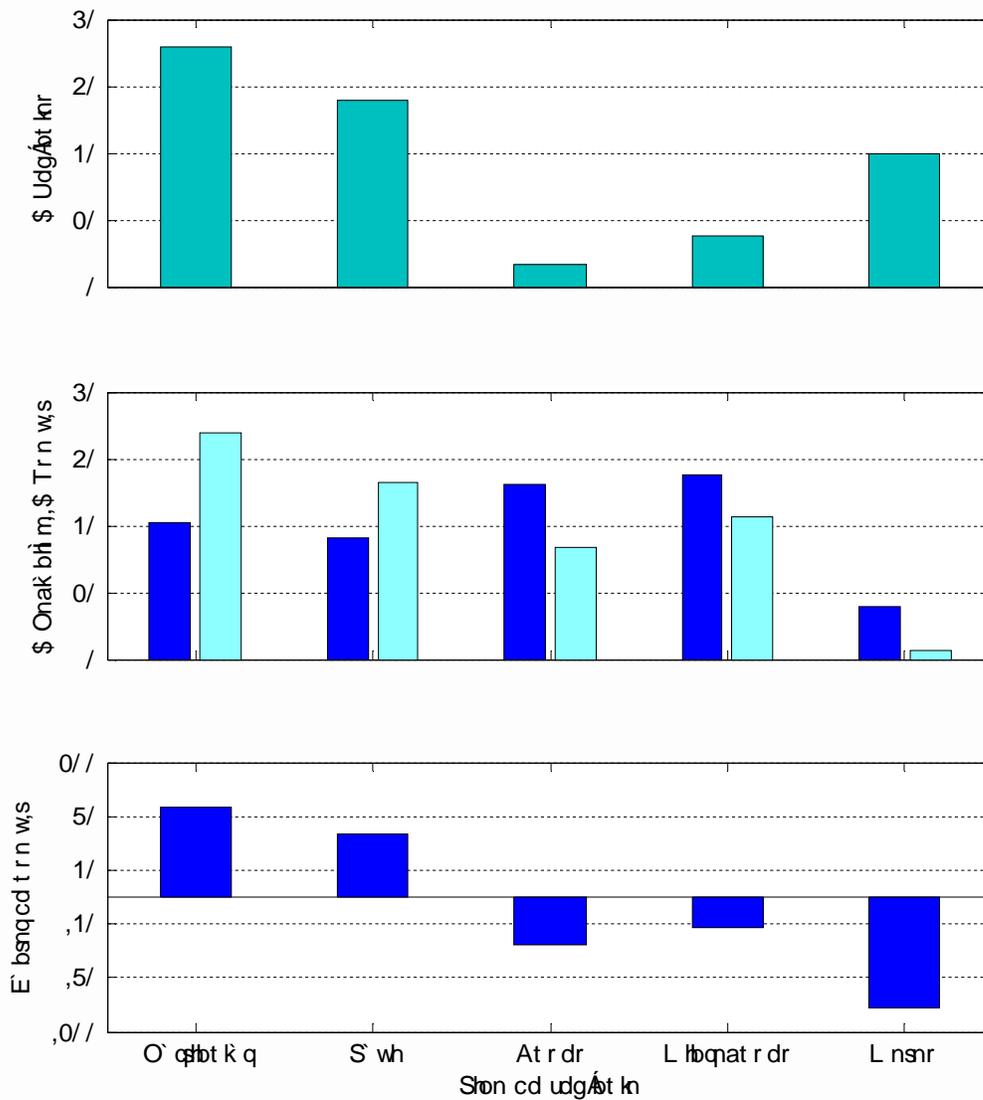


Figura 12. Uso del espacio tiempo (x-t) de la avenida El Poblado según tipos de vehículos

Haciendo la interpretación para la columna de vehículos



particulares se tiene que:

- Representan el 36% de los vehículos que usan la avenida.
- Son propiedad del 20% de la población que se transporta, y dicho porcentaje usa el 34% de la capacidad (x-t) de la avenida.
- Usan un 60% más de los que les correspondería, si a cada usuario se le asignara una fracción igual del espacio tiempo en la avenida.



3. SIMULACIÓN

En el siguiente capítulo se define el simulador y se enseña como debe ser configurado y usado.

3.1 DESCRIPCIÓN PARAMÉTRICA DEL FLUJO VEHICULAR EN EL POBLADO PARA EL SIMULADOR

Siendo consecuentes con lo descrito en el capítulo anterior, para modelar el tráfico vehicular del poblado, se hace necesario dividir el sistema en segmentos de vía, y caracterizarlos según parámetros y variables.

Segmentos de vía

Para realizar una simulación acertada de cualquier sistema vehicular, es fundamental aproximar sus elementos de la manera más precisa posible, por lo tanto cada segmento de vía será determinado por el siguiente conjunto de datos:

ID

El ID o número de identificación tiene la función de ayudar a quien configura el sistema a la diferenciación de los segmentos. Aunque dicha función parece trivial, no debe desestimarse ya que en sistemas de grandes dimensiones, la configuración del simulador se torna en una tarea dispendiosa y minuciosa. Además, el ID le indica al programa cuales son los parámetros de cada segmento, y una mala configuración de este parámetro implica necesariamente el mal funcionamiento del simulador.



✚ Factor de forma:

El factor de forma busca aproximar de manera simple el cálculo de la capacidad de almacenamiento de cada segmento. Ya que no todas las vías tienen el mismo número de carriles a lo largo de su recorrido, el factor puede representarse como un arreglo de números que aproxima el número de carriles que tiene el segmento en toda su extensión así:

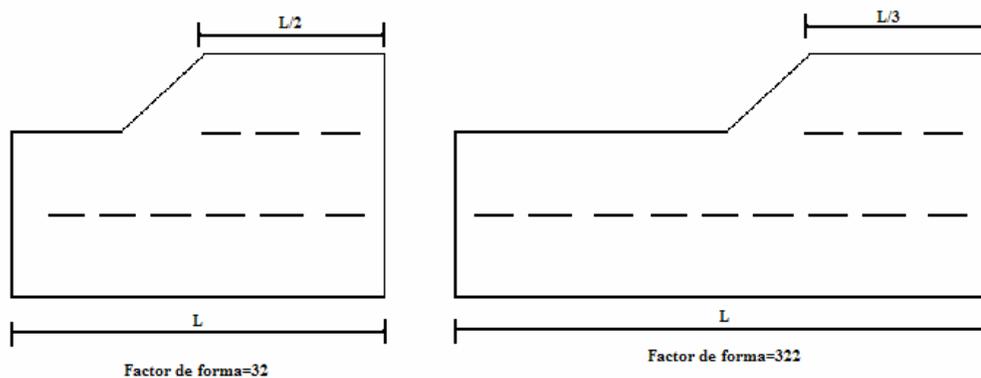


Figura 13. Factor de forma de diferentes segmentos de vía.

✚ Flujo máximo:

Es el número de vehículos máximo promedio que sale del semáforo en un intervalo de 10 segundos. No sólo varias medidas deben tomarse sobre este parámetro, sino tener en cuenta que depende del tipo de tráfico, la inclinación de la vía, el número de carriles de salida y finalmente de la hora del día; puesto que la distancia entre la salida de un semáforo y el almacenamiento del segmento siguiente en algunos casos es muy corta especialmente en hora pico, y si un vehículo acelera al ver la luz verde, no lo hará con tanta intensidad si tiene que parar cerca nuevamente por el tráfico de en frente.



✚ Almacenamiento:

Es una variable de cada segmento, y es una de las principales señales del simulador. Indica el número de vehículos detenidos que se encuentran en un segmento de vía terminado por un semáforo. Es importante entender que incluso en tiempo de luz verde y mientras todos los vehículos deban estar en movimiento es posible que el almacenamiento sea mayor que cero; ya que en el simulador, los vehículos no aceleran, simplemente cambian su velocidad instantáneamente.

Siempre que un vehículo esté detenido dentro de un segmento de vía, se cuenta como almacenado. En consecuencia siempre que un vehículo esté en movimiento hace parte del flujo, sin importar la luz del semáforo en ese momento para ambos casos.

✚ Porcentajes de maniobra:

Las maniobras son las posibles direcciones que puede seguir un vehículo cuando sale de una intersección. Por lo general (y para el simulador) existen cuatro maniobras típicas básicas que se presentan (algunas de ellas) en la mayoría de los cruces; éstas son: *de frente, giro a la derecha, giro a la izquierda y giro en U.*

Los porcentajes de maniobra, son una de las aproximaciones más burdas del simulador. Pretenden indicar qué porcentaje del total del flujo que sale del semáforo toma una u otra dirección. A pesar de que en condiciones normales de tráfico, estos porcentajes son un promedio con poca varianza, y por tanto son buenos indicadores del reparto del flujo, el mayor problema se presenta, cuando alguna ruta se obstruye justo en el lugar donde el conductor toma la decisión de la maniobra; es decir el promedio se daña y el número de carros esperados en esa dirección cambia. Para reducir este problema, el simulador almacena diferentes porcentajes de maniobra para cada día de la semana y para 5 distintas horas claves del día.



Velocidad promedio:

Indica la velocidad promedio a la que viajarán los vehículos por el segmento. Este dato es necesario para calcular los tiempos que tardan los carros para llegar de un segmento a otro, y debe ser ingresado en km/h.

Ciclo:

El ciclo equivale al período de tiempo total en que una intersección da salida a todos los segmentos, y que se repite constantemente hasta que se determine cambiar de plano. El tiempo de duración de un ciclo es igual a la suma del tiempo de verde y el tiempo de rojo y una brecha de tiempo en el cambio de luz (para el simulador, no existe luz amarilla) de cualquiera de los segmentos de la intersección.

Duty Cycle:

El Duty Cycle es el porcentaje de tiempo de verde de un segmento respecto al ciclo total de su intersección. Así el ciclo queda dividido en fases, ya que cada conjunto de duty cycles simultáneo conforma una fase, y el conjunto de maniobras que se dan en una fase conforma un movimiento. Para poder agilizar una intersección, se debe buscar que el número de movimientos sea el mínimo posible.

Retardo:

El retardo es el tiempo que tarda en aparecer un verde desde el comienzo del ciclo en cada semáforo respecto a una referencia (todos los ciclos comienzan en la referencia de tiempo igual a cero). En los semáforos que funcionan en modo coordinado (sincronizados) dicho retardo es llamado offset, y se referencia respecto a una base de tiempo de un controlador *maestro*. En



nuestro caso, el simulador será el *maestro* de todos los semáforos del sistema y para todos correrá la misma base de tiempo; por lo que no debe confundirse el retardo con el offset. (Más sobre offsets en el capítulo de control)

✚ Longitud:

La longitud de un segmento (ayudada por el factor de forma) busca establecer la capacidad de almacenamiento del mismo. Se puede saber que en un carril de longitud l , caben: $l/(\bar{l} + \bar{s}_e)$ es decir: se divide la longitud del segmento entre la suma de la longitud promedio de un vehículo y la separación promedio entre vehículos. La longitud promedio de un vehículo fue calculada en el primer capítulo. De la misma manera se calculó la separación promedio obteniendo un valor de 1.5m, por lo que la suma es igual a 6m.

Después de conocer la cantidad de parámetros necesaria para introducir un segmento al simulador, se determinó que para simular el sistema vial del poblado, se tomarían en cuenta la mayoría de sus intersecciones con semáforos, desde la calle 10 hasta la calle 9s y desde la carrera 48 hasta la transversal inferior.

Nota: En el momento en que se inició este trabajo no había sido entregado ningún tramo de la avenida transversal 34, y algunas intersecciones fueron simplificadas para facilitar la labor de toma de datos. El modelo final para 37 segmentos sobre el cual se hace la simulación, se presenta a continuación en el siguiente mapa: (Contiene la calle 10, la calle 5, la calle 1sur Loma de los Parra, la calle 5sur Loma de los González, la calle 9sur Loma de los Balsos, la carrera 48 Avenida las vegas, la carrera 43 A Avenida el poblado, y la Transversal Inferior).

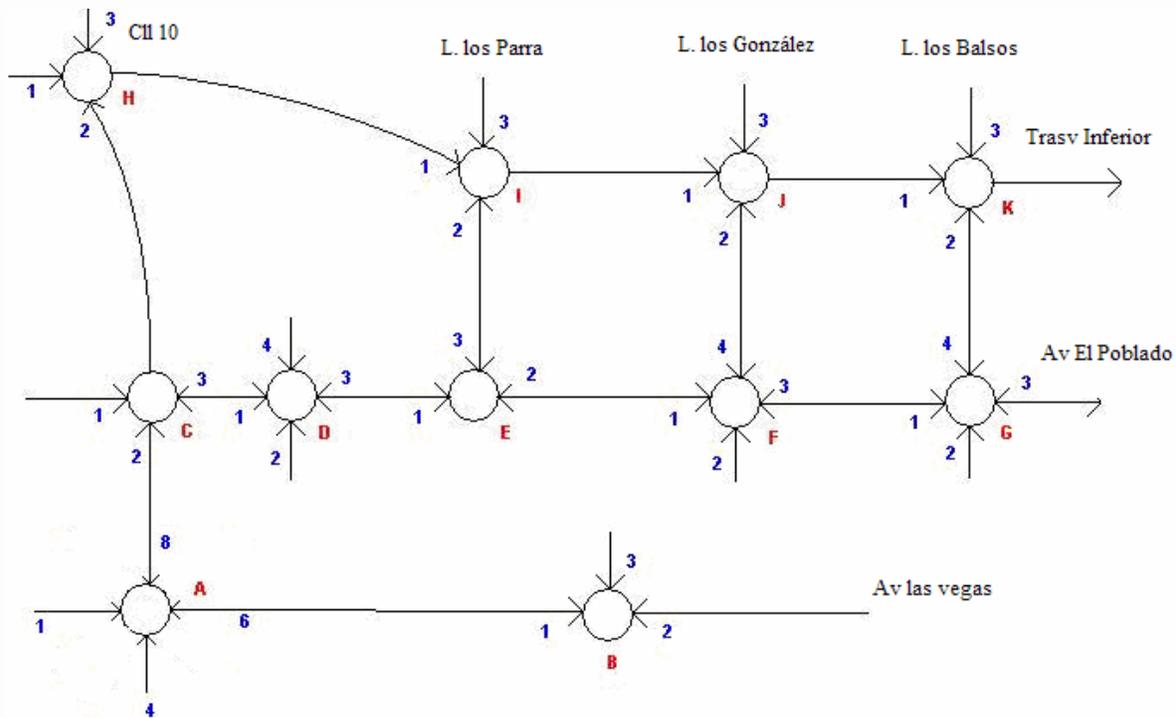


Figura 14. Segmentos e intersecciones tenidas en cuenta para la simulación del sistema vial del Poblado.

✚ Intersecciones

Las intersecciones para el simulador están conformadas por un conjunto de segmentos de vía que tienen en común un grupo de semáforos del mismo controlador. La intersección se constituye como el bloque básico del simulador, por ser el tiempo de los semáforos la señal más importante a observar, y un semáforo siempre está unido a una intersección ya sea peatonal o vehicular. Por otra parte, en la mayoría de los casos, no es práctico crear un sistema usando sólo bloques de segmentos con semáforo en vez de bloques de intersección, ya que el sistema requeriría una pantalla muy grande para ser visualizado, y el manejo de los datos no sería eficiente.

Según el mapa de la figura 2.2, las once intersecciones



seleccionadas para la simulación son:

A: Carrera 48 (Avenida las Vegas) con Calle 10. *Centro comercial Monterrey.*

B: Avenida las Vegas con Calle 1Sur. *Urbanización El Remanso.*

C: Carrera 43A (Avenida El Poblado) con Calle 10. *Parque El Poblado.*

D: Avenida El Poblado con Calle 5A. *Clínica Medellín.*

E: Avenida El Poblado con Calle 1Sur (Loma de los Parra). *Plaza San Fernando.*

F: Avenida El Poblado con Calles 4Sur y 5Sur (Loma de los González). *Blockbuster.*

G: Avenida El Poblado con Calle 9Sur (Loma de los Balsos).

H: Carrera 30 (Transversal Inferior) con Calle 10. *Mall Pinar del río.*

I: Transversal Inferior con Loma de los Parra. *Mall Plaza*

J: Transversal Inferior con Loma de los González. *Mall la Visitación.*

K: Transversal Inferior con Loma de los Balsos.

Generadores:

Cuando el simulador está configurado como un conjunto de intersecciones y semáforos, a pesar de haber ingresado todos sus parámetros, aun está inerte, pues no tiene carros. Los bloques generadores tienen la función de introducir vehículos al sistema y buscan semejar la forma real como éstos aparecen en las vías. La configuración de los generadores debe ser también realizada a partir de aforos y estudios sobre la zona.

Buscando hacer la mejor simulación posible, el bloque generador está parametrizado según:

ID: Que cumple las mismas funciones que el ID de los semáforos.

Día y hora: Fueron determinados 3 diferentes días según el

tráfico en la ciudad: *Lunes a jueves, Viernes y Sábados-Domingos*. Además se establecieron 5 horas diferentes para tener precisión en la simulación así: *Pico AM, AM, Pico M, PM y Pico PM*. La forma típica de los niveles de tráfico según las 5 horas se observa en la siguiente figura:

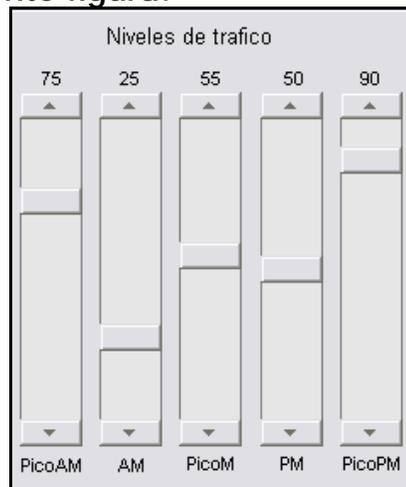


Figura 15. Niveles de tráfico típicos en las diferentes horas del día.

Modo: El modo de funcionamiento del generador, debe ser configurado dependiendo de la forma del tráfico que llega al segmento donde desemboca, ó según criterios del diseñador del sistema.

Teniendo en cuenta que la distribución de probabilidad que mejor representa la aparición de vehículos en las vías es la de Poisson, los modos configurables para el generador son:

Random: Vehículos según Poisson entre 0 y 10veh/10segundos.

Manual+random: Vehículos según Poisson sumados a una constante configurada manualmente por el diseñador.

Cuadrado+random: Una onda cuadrada de amplitud configurable manualmente sumada a un flujo aleatorio según la distribución



de Poisson. Este modo representa segmentos que reciben flujos de semáforos que no están incluidos en el sistema. Los demás parámetros de la onda cuadrada también son configurables desde Simulink.

Cuadrado: Una onda cuadrada esta vez sin la suma de un nivel aleatorio.

Constante: "Nivel de directa" constante y ajustable.

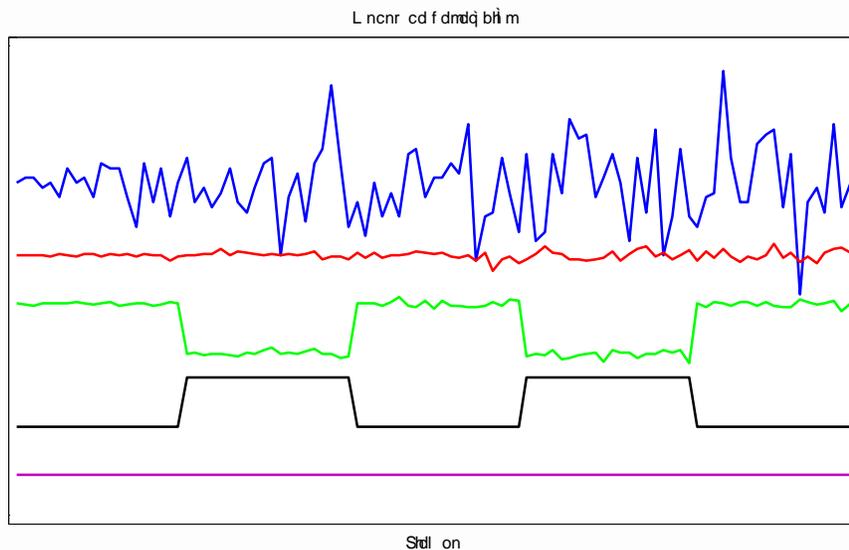


Figura 16. Modos de generación: Azul=Random, Rojo=Manual+random, Verde=Cuadrado+random, Negro=Cuadrado, Magenta=Constante.

✚ Retardadores

Ahora el simulador está casi completamente. Su principal defecto consiste en que, las señales de flujo (los vehículos) al salir de un segmento, llegan al siguiente inmediatamente. Para corregir este hecho se debe tener en cuenta que mientras los vehículos están dentro de algún segmento, están almacenados (es decir llegaron al segmento) siempre que estén detenidos. Si aún están en



movimiento, aunque estén “físicamente” dentro del segmento, no se han almacenado. Por lo anterior, el tiempo que tarda un vehículo en llegar al segmento siguiente cuando sale de un semáforo varía según el almacenamiento. Se calcula al comienzo de cada verde y es implementado por el bloque de retardo, que para mayor precisión, será llamado bloque de retardo variable.

3.2 RESUMEN DE DATOS

Según las necesidades encontradas, los datos que proveyeron la mayoría de los parámetros necesitados para la simulación del sistema del Poblado, fueron obtenidos de los siguientes aforos, conteos y tablas (Recursos propios y de la central de semáforos). Las primeras seis tablas son aforos propios.

Tabla 4. Datos L. Balsos - Av. El Poblado

CRUCE	Número de afluentes	Tiempo Total del ciclo	Hora de toma de datos					
L. Balsos - Av. El Poblado	5	115	Viernes 7:45					
	Afluentes	Dirección	Verde	Rojo	% V	% R	Taco	Flujo
1	Av. Poblado	-->N	70	45	61	39	20,31,16	31.37
2		-->S	70	45	61	39		30
3	L. Balsos	-->Or	45	70	39	61	3	5,6,10
4		-->Occ	45	70	39	61	25	28
5	Pob-N --> Bal-Or		70	45	61	39	Full=3	4
NOTAS:		El afluente 5, obstaculiza el paso del afluente 3 Sin importancia en la mañana.						



Tabla 5. Clínica-Av. Las Vegas

CRUCE	Número de afluentes	Tiempo Total del ciclo	Hora de toma de datos					
Clínica-Av. Las Vegas	4	90	Viernes 8:15 - 8:50					
	Afluentes	Dirección	Verde	Rojo	% V	% R	Taco	Flujo
1	Av. Las Vegas	-->N	60	30	66	34	18,7,10	35,32,39
2		-->S	60	30	66	34	4,4,10	19,27,25
3	Clínica (Bahías)	U hacia el -->N	23	67	25	75	4,2,3,5,6	6,2,6,5,7
4		U hacia el -->S	23	67	25	75	6,5,2	7,6,5
La bahía del afluente 3 soporta aprox 7 carros NOTAS: La bahía del afluente 4 soporta aprox 5 carros								

Tabla 6. Eafit-Av. Las Vegas

CRUCE	Número de afluentes	Tiempo Total del ciclo	Hora de toma de datos					
Eafit-Av. Las Vegas	2	82	Viernes 7:45 - 8:10					
	Afluentes	Dirección	Verde	Rojo	% V	% R	Taco	Flujo
1	Eafit	-->N	50	22	69	31	18,20,22	41.48
2		-->S	50	22	69	31	8,8,10	43,34,26
NOTAS: Los semáforos son peatonales: Los tiempos del verde varían (mín 50 y máx 70-80)								

Tabla 7. L. Parra-Inferior

CRUCE	Número de afluentes	Tiempo Total del ciclo	Hora de toma de datos					
L Parra-Inferior	3	100	Viernes 7:45					
	Afluentes	Dirección	Verde	Rojo	% V	% R	Taco	Flujo
1	Inferior	-->S	47	44	52	48	16,26,30	45.38
2		-->Or	24	85	22	78	3	3
3	L. Parra	-->Occ	17.25	82	17	83	3.5	8
4	NOTAS: El afluente 3, tiene luz amarilla para los que siguen derecho							



Sin importancia en la mañana.

Tabla 8. L. González-Inferior

CRUCE	Número de afluentes	Tiempo Total del ciclo	Hora de toma de datos					
L Gonzalez-Inferior	3	83	Viernes 8:15					
	Afluentes	Dirección	Verde	Roj o	% V	% R	Taco	Flujo
1	Inferior	-->S	29	40	42	58	9	13
2		-->Or	18	85	17	83	5	6
3	L. Parra	-->Occ	17	60	22	78	7	8
4	NOTAS:		El afluente 3, tiene luz amarilla para los que siguen derecho Sin importancia en la mañana.					

Tabla 9. L. Balsos-Inferior.

CRUCE	Número de afluentes	Tiempo Total del ciclo	Hora de toma de datos					
L Balsos-Inferior	3	76	Viernes 9:00					
	Afluentes	Dirección	Ver de	Roj o	% V	% R	Taco	Flujo
1	Inferior	-->S	27	45	38	63	8	13
2		-->Or	22	77	22	78	6.5	7
3	L. Parra	-->Occ	19	60	24	76	5	6
4	NOTAS:		El afluente 3, tiene luz amarilla para los que siguen derecho Sin importancia en la mañana.					

Las siguientes gráficas muestran los volúmenes según la hora para las diferentes maniobras. La convención es: Azul=De frente, Rojo=Derecha y Azul claro=Izquierda.

Fueron obtenidas del análisis de aforos de la empresa Civiles para la oficina de semáforos de la ciudad.

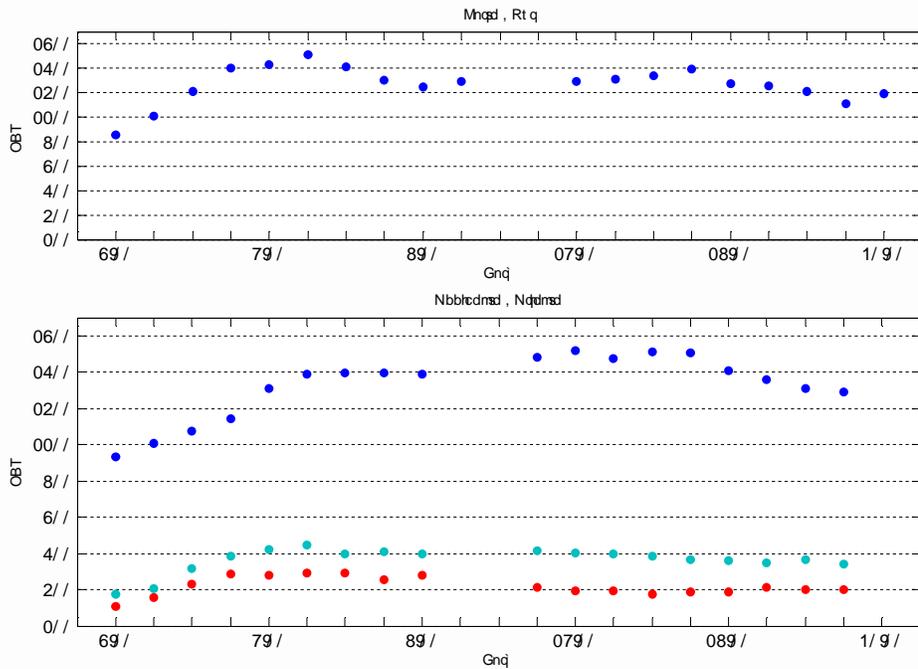


Figura 17. Dirección: Carrera 43A con Calle 10

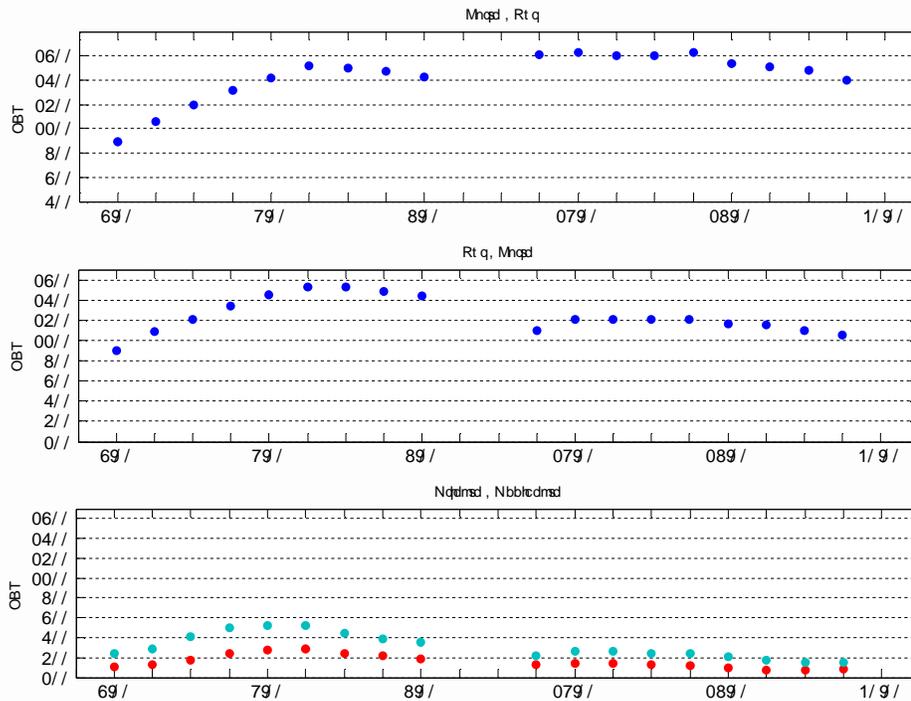


Figura 18. Dirección: Carrera 43A con Calle 1 Sur

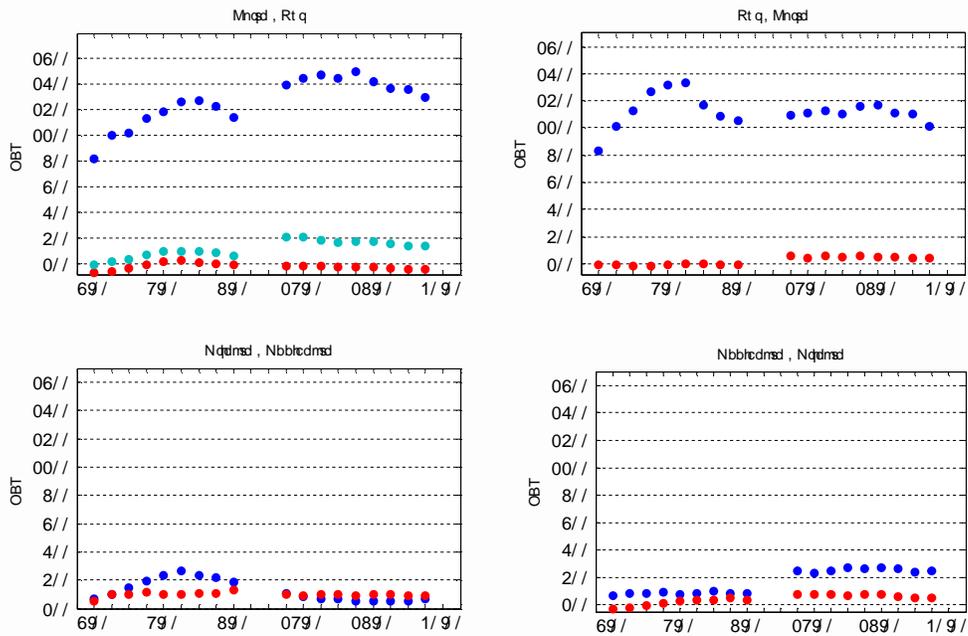


Figura 19. Dirección: Carrera 43A Con Calle 4 y 5 Sur

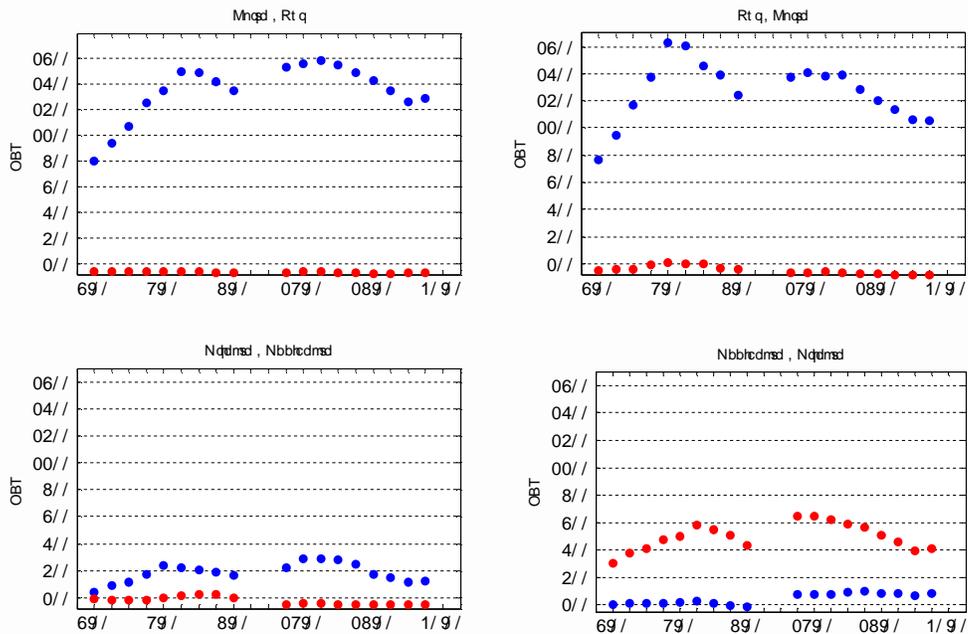


Figura 20. Dirección: Carrera 43A con Calle 9 Sur

A continuación se presenta el resultado del procesamiento de los datos, que finalmente determinó la configuración del simulador.

Tabla de valores para los segmentos del simulador:

Tabla 10. Parámetros de los segmentos del simulador.

Cruce	Segmento		Carri-les	Fluj o máx	Alm	Maniobras (%)			Tiempos			Vel Prom	
	ID	#				Frent e	Der	Iz q	Ciclo	DC	Retar do		Larg o
A	1	1	3.25	16	50	0.75	0.25		80	50	40	100	40
	2	4	2	8	25	0.5	0.5		80	50	0	70	40
	3	6	2	15	230	0.7	0.3		80	50	40	750	50
	4	8	1.4	8	40	0.65	0.2		80	50	0	200	50
B	5	1	2	9	230	1			80	69	0	750	50
	6	2	2	8	290	1			80	69	0	950	50



Cruce	Segmento		Carri- les	Fluj o má x	Alm	Maniobras (%)			Tiempos			Larg o	Vel Pro m
	ID	#				Frent e	Der	Iz q	Ciclo	DC	Retar do		
C	7	3	2	9	40			1	80	31	55	140	50
	8	1	4	16	130	1			120	50	100	410	60
	9	2	3	12	200	0.62	0.2	0.2	120	50	23	440	50
D	10	3	3	13	150	0.75	0.2		120	32	100	490	50
	11	1	2	9	150	0.8	0.2		120	65	41	490	50
	12	2	2	7	21		0.1	0.3	120	30.8	0	140	40
	13	3	2	10	75	0.8			120	65	41	250	50
E	14	4	2	7	85		0.4	0.6	120	30.8	0	280	40
	15	1	2	8	75	1			120	46	39	250	40
	16	2	2	8	67	1			120	46	39	220	50
F	17	3	2	7	175		0.4	0.59	120	48	98	500	40
	18	1	2	10	67	0.81	0.0	0.11	120	54	80	220	40
	19	2	2	7	40	0.35	0.6		120	40	28	270	40
	20	3	2	10	150	0.93	0.0		120	54	80	500	40
G	21	4	2	7	95	0.3	0.7		120	40	28	620	40
	22	1	2	12	150	0.95	0.0		120	55	60	500	50
	23	2	2	7	60	0.17	0.7	0.04	120	37	21	400	40
	24	3	2	11	255	0.95	0.0		120	55	60	250	60
	25	4	2	7	100	0.52	0.1	0.32	120	37	21	650	50
H	26	1	2	10	130	0.8	0.2		min=2 0	max= 60		150	60
	27	2	1	3	115	0.2	0.8		10	20		750	40
	28	3	1.5	5	60	0.85	0.1		10	20		400	30
I	29	1	2	9	370	0.35	0.6	0.05	20	60		1200	60
	30	2	1	3	30	0.3	0.7		20	30		200	40
	31	3	1	4	70	0.7		0.3	20	30		470	30



Cruce	Segmento		Carri- les	Fluj o má x	Alm	Maniobras (%)			Tiempos			Larg o	Vel Pro m
	ID	#				Frent e	Der	Izq	Ciclo	DC	Retar do		
J	3	1	2	10	150	0.35	0.6	0.05	20	60		500	60
	3	2	1	3	40	0.3	0.7		20	30		250	40
	3	3	1	4	120	0.7		0.3	20	30		800	30
K	3	1	2	10	135	0.3	0.5	0.15	20	60		450	60
	3	2	1	3	50	0.6	0.4		20	30		330	40
	3	3	1	4	120	0.8		0.2	20	30		850	30

Tabla de valores de los generadores para el día *lunes* y las horas *Pico AM* y *Pico PM*:

Tabla 11. Parámetros de los generadores del simulador.

Generador	Vía	Cruce	Modo	Valor	
				AM	PM
1	T. inf	Inf-10	1	3.5	5
2	CII 10 O-E	Inf-10	2	2	1.5
3	CII 10 E-O	Inf-10	2	0.5	1
4	Los Parra E-O	Inf- Parra	2	0.4	0.9
5	Los Gonz E-O	Inf-Gonz	2	2.1	2
6	Los Bals E-O	Inf-Balsos	2	2	2
7	Av. Pob N-S	Pob.-10	3	4.2	3.9
8	CII 5 O-E	Clinica Med	2	2	1.7
9	CII 5 E-O	Clinica Med	2	1.8	1.3
10	CII 4s O-E	Pob-Gonz	2	0.9	1.8
11	CII 9s O-E	Pob-Bals	2	1.9	2.5
12	Av. Pob S-N	Pob-Bals	3	5	4.2
13	Av. Veg N-S	Veg-10	3	4.5	4.6
14	CII 10 O-E	Veg-10	1	5	5.2
15	CII 10 E-O	Veg-10	3	3.5	4
16	Av. Veg S-N	Clinica Veg	3	2.5	3
17	CII 1s E-O	Clinica Veg	2	1.9	2.2



18	Los Parra O-E	Inf- Parra	2	1.2	2
----	---------------	------------	---	-----	---



3.3 MANUAL DE USO DEL SIMULTRAF

Este manual busca darle funcionalidad y versatilidad al SIMULTRAF. Éste, es una especie de "*Blockset*" diseñado en Simulink (Matlab) para crear sistemas de tráfico vehicular, que simulen el comportamiento de cualquier conjunto de *vías* e *intersecciones* semaforizadas en una zona urbana.

Un simulador de tráfico vehicular como este, busca especialmente, hacer el mejor uso posible de una malla vial urbana con problemas de tráfico, recordando que sobre el sistema, se tiene control por medio de semáforos, señales, o medidas como el pico y placa.

Observar el comportamiento del tráfico es bastante complejo, ya que es un fenómeno de grandes dimensiones. Para esto, si se toman medidas correctamente en una malla vial, ésta puede ser parametrizada y simulada por el SIMULTRAF, con el propósito de observar allí, posibles mejoras o medidas necesarias para el sistema vial.

Con el SIMULTRAF y el análisis apropiado de la información allí obtenida se busca específicamente:

- Determinar la capacidad de volumen de tráfico que una zona de una ciudad puede manejar. A partir de eso hacer planeación urbana, tomar medidas de pico y placa, entre otras.
- Mejorar los tiempos de los semáforos implicados en el sistema, dando la mejor solución posible al flujo vehicular sobre la malla vial existente.

3.3.1 Bloques del SIMULTRAF. El simulador contiene cuatro bloques básicos, y un bloque general, así:

1. *Semáforo*

Para el simulador, llamaremos *semáforo* no sólo al elemento de control con luces, sino también a todo el segmento de vía que él

precede, y sobre el cual los vehículos se detienen cuando esperan por una luz verde. Es decir, un *semáforo* es un segmento de vía con un semáforo. Este segmento de vía empieza donde termina el *semáforo* siguiente o donde la vía se divide, es decir, donde el diseñador del simulador considere que los carros no paran mientras el semáforo está en rojo. Veamos un ejemplo ilustrado:

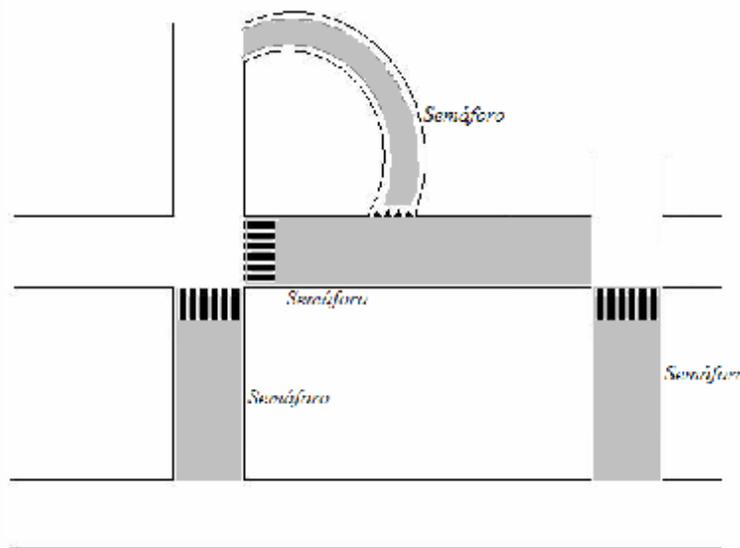


Figura 21. Ejemplos de semáforos en el SIMULTRAF

El bloque de *semáforo* para el simulador es:



Figura 22. Bloque semáforo.

En su interior funciona como un integrador, que según su capacidad de almacenamiento (manejada por el bloque *relay*), integra una señal que representa el flujo de vehículos en el tiempo, y de acuerdo a una señal de control (verde o rojo), resta



ese almacenamiento provocando un flujo vehicular de salida. Cada semáforo es identificado por una constante ó ID, para poder ser parametrizado desde la interfaz del usuario. Internamente el semáforo muestra lo siguiente:

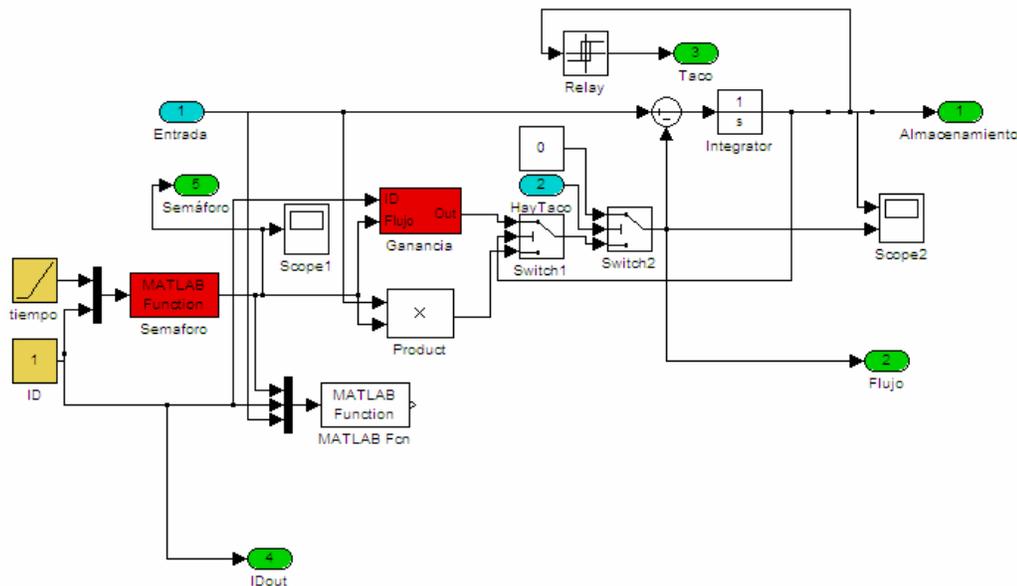


Figura 23. Bloque semáforo (interior).

2. Maniobra

El bloque de maniobra, toma el flujo total de salida de un *semáforo* y lo reparte en las diferentes direcciones hacia donde pueden ir los vehículos, es decir, representa las maniobras posibles a realizar cuando se pasa por una intersección. Esta representación es estadística y fracciona el flujo total, en flujos parciales por cada una de las maniobras. Las maniobras posibles típicas en un semáforo son: *De frente*, *Giro a la derecha*, *Giro a la izquierda*, y *Giro en U*.



Figura 24. Bloque de Maniobras.

3. *Generador*

El bloque *Generador* tiene la función indispensable de poner vehículos en circulación dentro del sistema. Esto se lleva a cabo por medio de una señal en el tiempo que representa el flujo vehicular en $[\# \text{ carros} / 10 \text{ segundos}]$ y debe ser configurado desde la interfaz gráfica para que los flujos vehiculares sean aproximados a los reales.

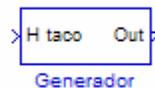


Figura 25. Bloque Generador.

El interior del bloque *Generador* consta de un ID para poder asignarle los parámetros que lo configuran. Una base de tiempo que entra a una función generadora de onda cuadrada para simular los flujos que tienen esa forma en el tiempo. Y un generador de números aleatorios de distribución de Poisson para asemejar el carácter estocástico del flujo vehicular. Estos elementos se combinan en la *función de tráfico* para fijar un *modo* de funcionamiento del *Generador*. Finalmente el bloque *Product* se encarga de controlar la salida del *Generador* dependiendo de la señal *H Taco* que indica un taco adelante e impide que el generador ponga flujo en el sistema.

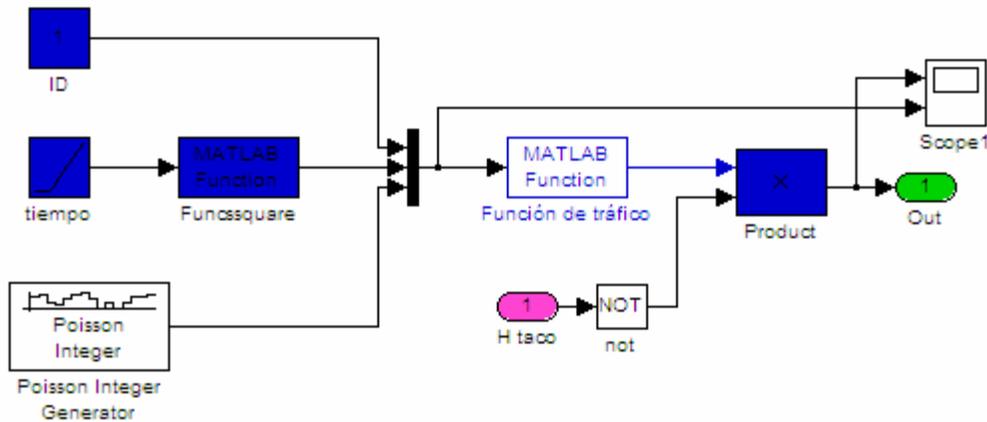


Figura 26. Bloque generador (interior)

4. Retardador

Para que el simulador presente fidelidad con el sistema real, es necesario que entre cada cruce, exista un retardo, pues si bien, los *semáforos* para el modelo son contiguos, y no existe espacio entre ellos, lo que debemos tener en cuenta es el tiempo que tarda un vehículo en detenerse, mientras llega a la siguiente luz roja. Ese tiempo, como puede intuirse fácilmente, varía, según el almacenamiento que presente el *semáforo* de llegada así: Si el *semáforo* de llegada está lleno suponemos que los primeros vehículos llegarán en un tiempo muy corto, el que les tarda cruzar la intersección; mientras que si está vacío, ese tiempo será máximo, pues la distancia recorrida es la mayor posible en dicho caso.

Por lo tanto el bloque *Retardador* pone un retardo variable según el almacenamiento del *semáforo* de llegada.



Figura 27. Bloque Retardador.

El interior del bloque consiste en un bloque de retardo variable propio de Simulink y un bloque que llama a la función que calcula la variación del retardo.

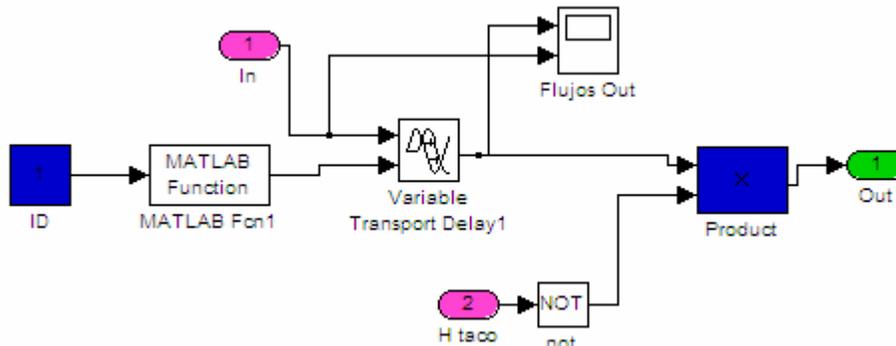


Figura 28. Bloque Retardador (Interior).

5. Intersección (General)

Hasta aquí, conformar un sistema en el SIMULTRAF puede ser bastante engorroso, ya que una *intersección* conformada por varios semáforos podría ser muy compleja de conectar, y además necesitaría mucho espacio en pantalla. Para simplificar y estandarizar una *intersección* ó cruce en el simulador, está el bloque general *Intersección*:

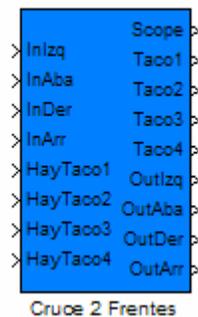


Figura 29. Bloque general Intersección.



Pero este bloque, al tener la ventaja de ser general, se compensa con la desventaja de tener que ser configurado internamente en sus parámetros y conexiones para poder convertirse en cualquier tipo de cruce, de 2 a 4 *semáforos*.

La configuración para la cuál fue diseñado es la de un cruce típico de cuatro semáforos así:

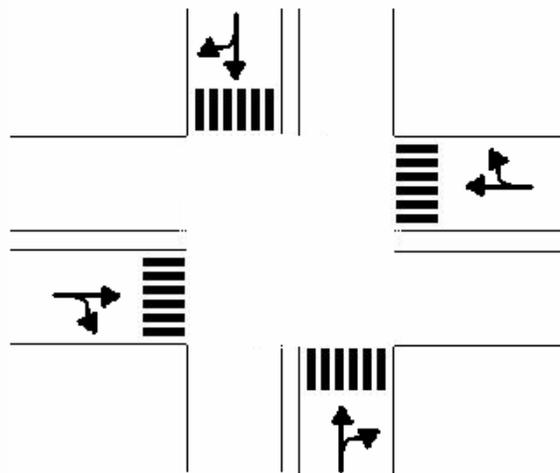


Figura 30. Intersección típica de cuatro semáforos y sus maniobras.

Si una intersección necesitara más de 4 semáforos, se deberán agregar tantos bloques *semáforo* como sean necesarios.

3.3.2 Cómo conectar y configurar un sistema en SIMULTRAF. A continuación se da la lista detallada de pasos a seguir para establecer un simulador de una zona urbana deseada.

1. Elaborar un mapa. Para mantener un orden en general en los diferentes parámetros, se califica como indispensable hacer un dibujo con el mapa del sistema vial que va a ser simulado (especialmente para sistemas de más de 10 semáforos). En la figura 10, vemos un ejemplo de un dibujo completo en el que se observan las siguientes características:



- Realizar el mapa aproximado al plano geográfico real de la zona.
- Sin importar las coordenadas geográficas, según la posición del dibujo, establecer una referencia con las coordenadas *Arriba*, *Abajo*, *Izquierda* y *Derecha*.
- Indicar claramente las direcciones de las vías entre cada *intersección*.
- Nombrar las *intersecciones* con letras en orden.
- Numerar los *semáforos* de cada *intersección* empezando con el de la izquierda y en sentido anti-horario.
- Establecer la existencia de retardos (R).
- Establecer la existencia de generadores (G) y numerarlos.
- Haga una lista de maniobras, de cada *semáforo* en cada *intersección* o indíquela en el mapa.

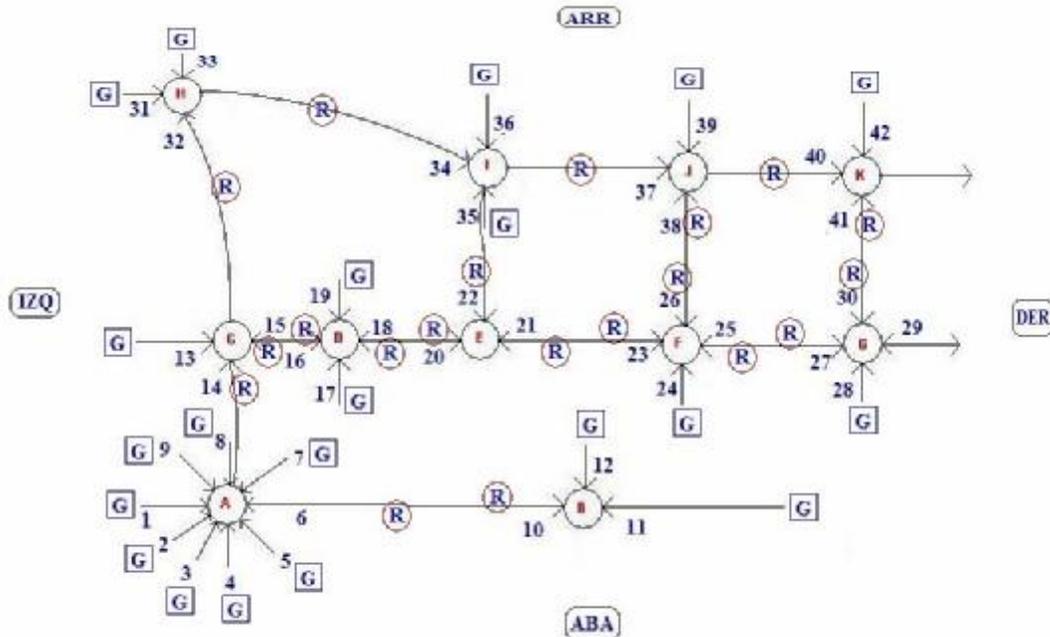


Figura 31. Mapa sector del poblado, de calles 10 a 9Sur, Av Las Vegas, Av El poblado y Transv. Inferior. (modelo aproximado).



Para facilitar la explicación a seguir, cada paso será ilustrado para el siguiente ejemplo que no se refiere a ningún sistema real en especial:

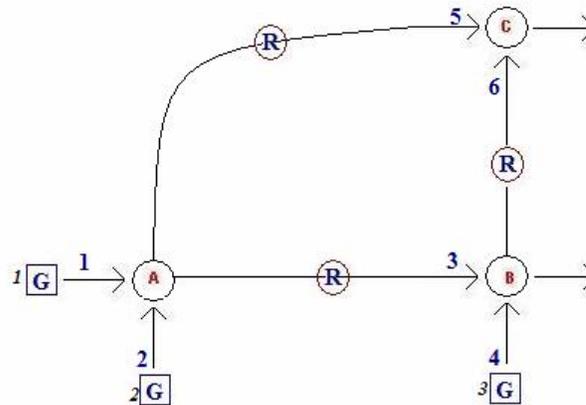


Figura 32. Ejemplo del manual.

2. Abra una hoja en blanco en Simulink y ponga el número de bloques de *intersecciones* que necesita, distribuidas por la pantalla como en el mapa. Nombre las *Intersecciones* de acuerdo a su mapa.

NOTA: Recuerde que los bloques del "Blockset" no deben ser modificados, es decir, nada en los archivos de los bloques debe ser modificado, ni parámetros ni conexiones. Cuando vaya a añadir algún bloque a su modelo, copie y pegue con precaución de no modificar el archivo original.

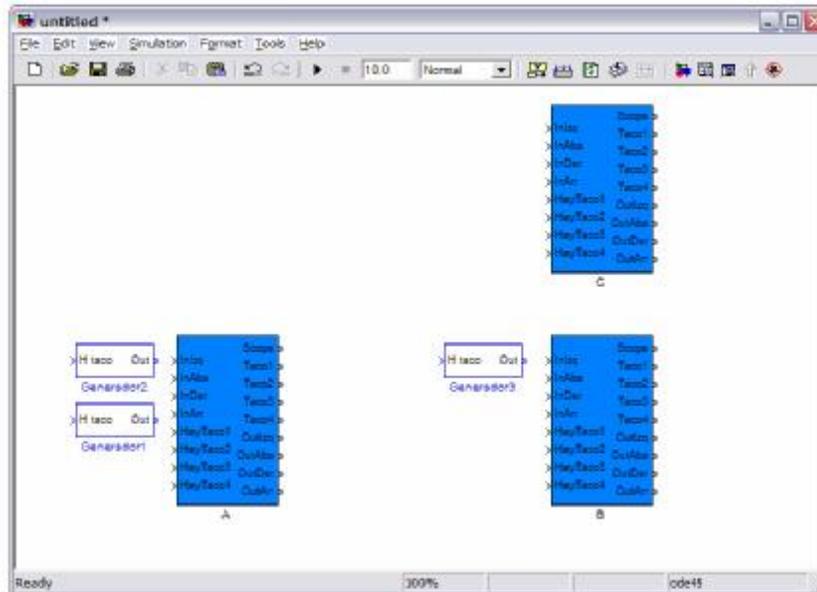


Figura 34. Paso 3.1

3.2. Ponga el número de bloques *Retardador* necesarios a la izquierda del bloque *intersección*.

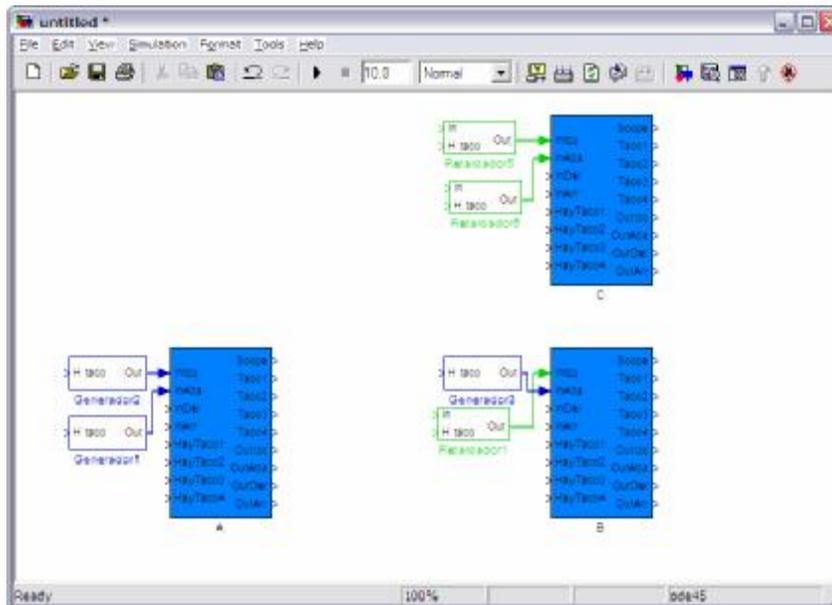


Figura 35. Paso 3.2

3.3. Conecte las entradas y salidas de la *Intersección*.

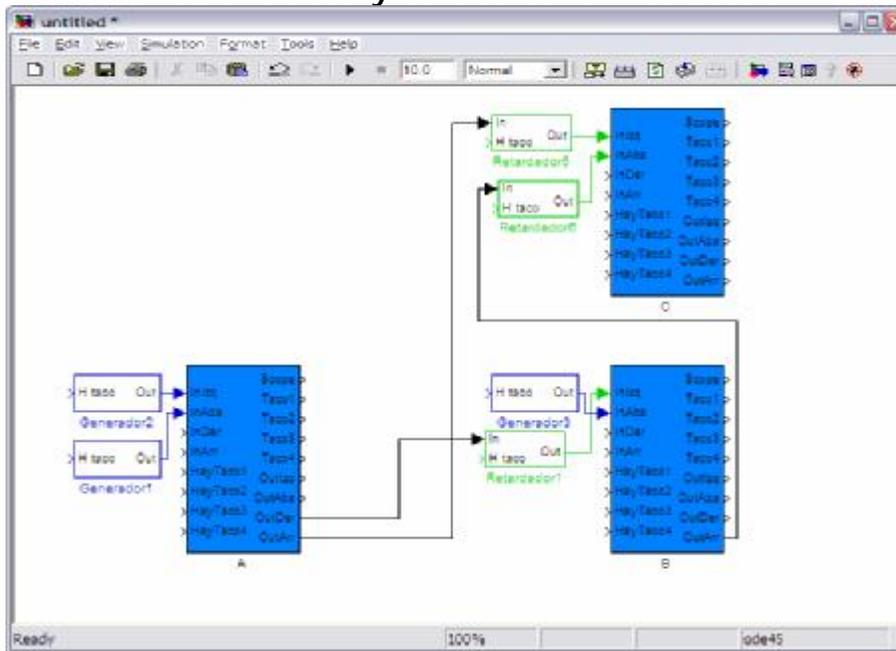


Figura 36. Paso 3.3

3.4. Ubique el scope "Semáforos" dentro de cada *Intersección*, y asigne un nombre distinto para los datos de cada cruce, así: Haga doble click en el *scope* para ver el gráfico, luego pulse el menú de "*Parameters*" del *scope*, y luego en la pestaña de *Data History*, escriba en el campo "*Variable name*" el nombre de la *Intersección*: *crucea*, (por defecto), ó *cruceb*, etc...

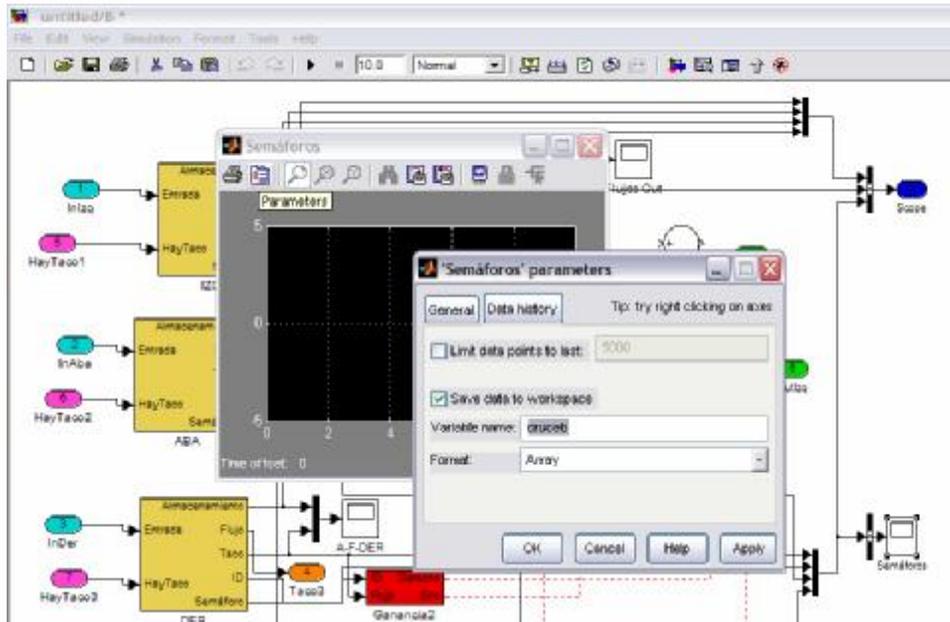


Figura 37. Paso 3.4

3.5. Borre los bloques *semáforo* y su bloque *Maniobra (Ganancia)*, que sobran.

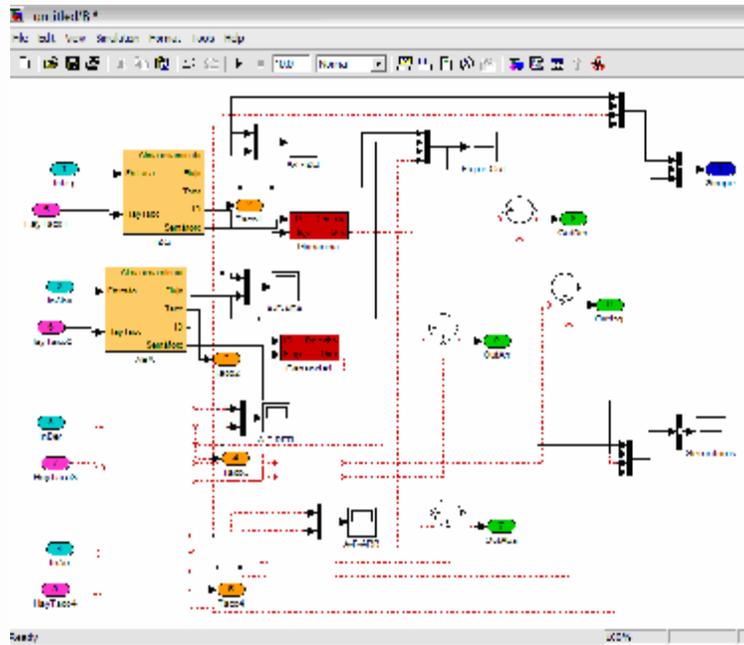


Figura 38. Paso 3.5

3.6. Asigne los ID de cada bloque semáforo dentro de cada cruce.

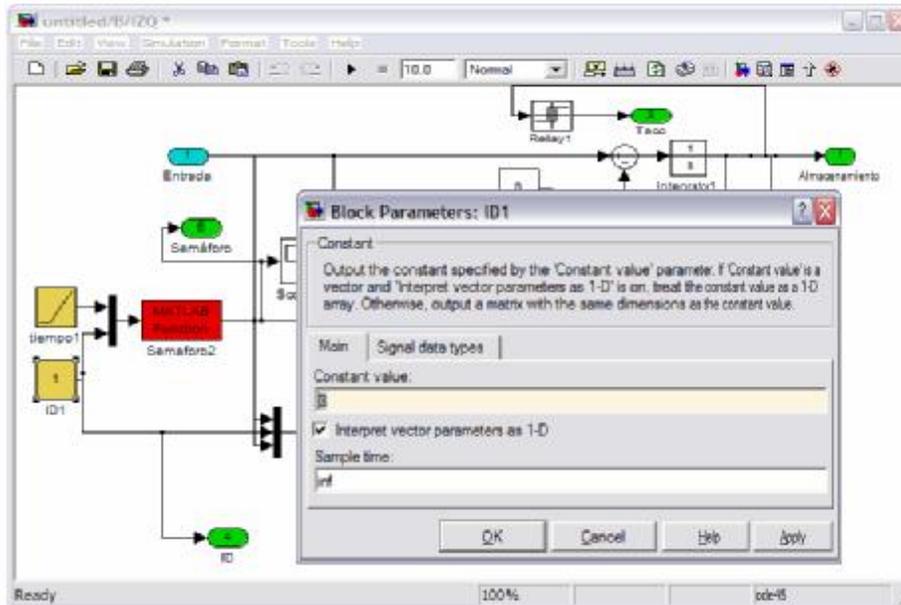


Figura 39. Paso 3.6

3.7. Conecte los sumadores y las salidas de las intersecciones internamente. Según las posibles maniobras realizables en cada *semáforo* de la *intersección*, las salidas de ésta (*OutIzq*, *OutAba*, *OutDer* y *OutArr*) tendrán flujos ó fracciones de flujo de uno ó varios *semáforos*. Para sumar dichos flujos, son necesarios los sumadores. Conéctelos de acuerdo a lo que indica el mapa del sistema y su lista de maniobras.

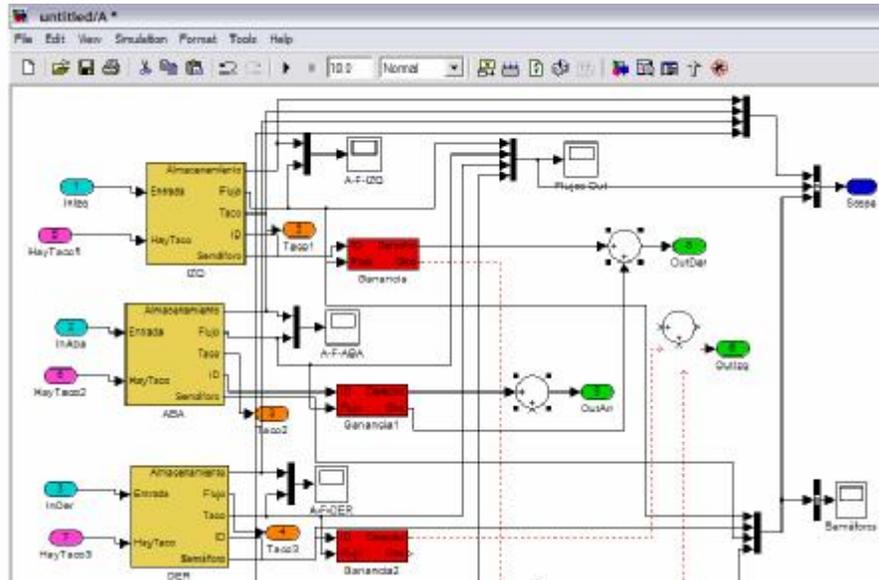


Figura 40. Paso 3.7

NOTA (sobre conectividad del bloque de maniobra) Si algún semáforo necesitara representar un mayor número de maniobras posibles, debería usarse un nuevo semáforo en paralelo con los mismos parámetros, para conectarle otro bloque de ganancia y así ajustar las demás posibles maniobras faltantes.

3.8. Ubique el bloque *Relay* dentro de cada semáforo. Determine los valores del bloque *Relay* según la capacidad de almacenamiento del semáforo así: Si la capacidad de almacenamiento es X entonces en el bloque de *Relay* se hace: Switch on point= X , y Switch off point= $X-10\%X$ (El switch off point mínimo recomendado es 10, ó *aproximadamente* el 10% del almacenamiento, ya que indica cuando apagar la señal de taco).

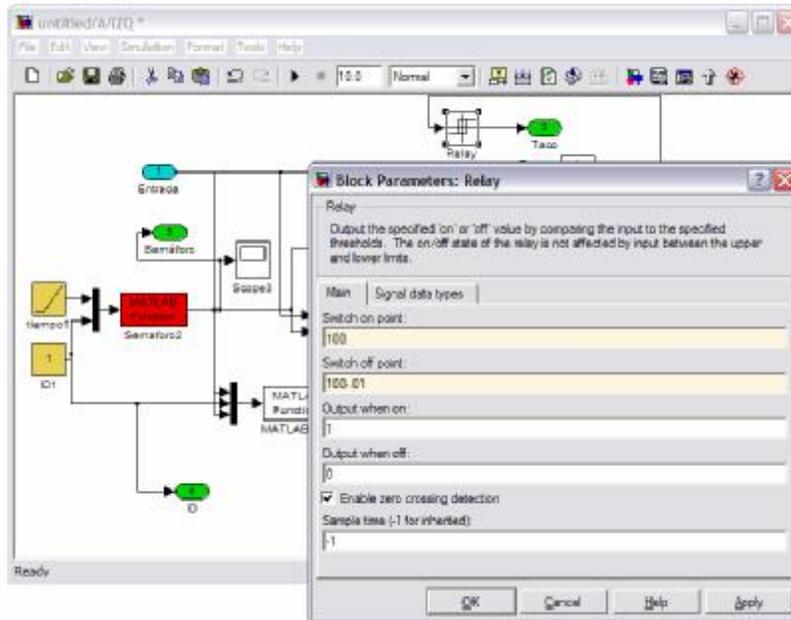


Figura 41. Paso 3.8

3.9. Conecte el bloque *Osciloscopio* a la salida "Scope" de cada Intersección.

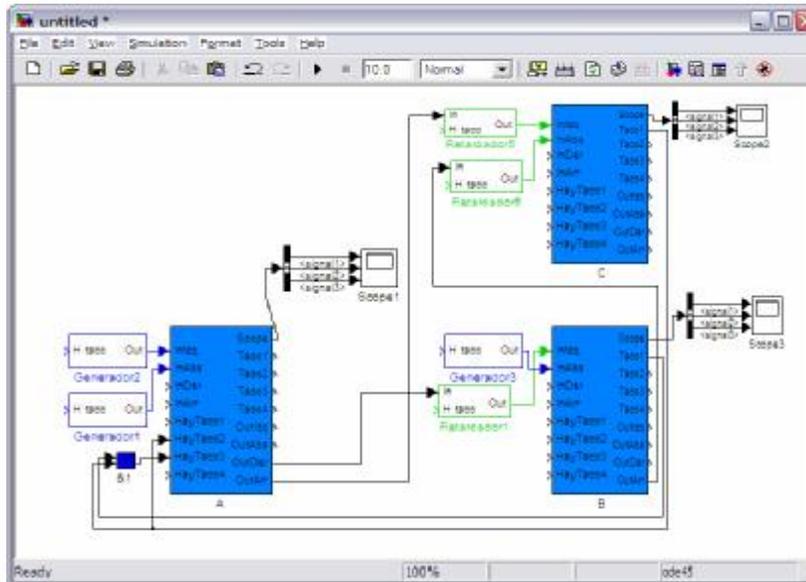


Figura 42. Paso 3.9

3.10. Conecte las entradas "HayTaco" con las salidas "Taco" así: Una señal "Taco" indica que un *semáforo* alcanzó su máxima capacidad de almacenamiento, por lo tanto, no es posible que el sistema le siga enviando vehículos; así que todos sus *semáforos* afluentes deberán parar de enviar vehículos, y para eso reciben la señal por las entradas "HayTaco". Veamos:

Para el ejemplo del manual, el *semáforo1* puede ser obstruido por el *semáforo3* (su señal de taco es Taco1/B), y el *semáforo2* por el *semáforo3* y el *semáforo5* (su señal de taco es Taco1/C), este segundo caso necesita una compuerta Or (Bloque Operaciones).

Las señales de "HayTaco" de los bloques de retardador y generador, se conectan directamente de las señales de "Taco" correspondientes a la entrada donde llegan.

Por lo anterior la conexión se verá así:

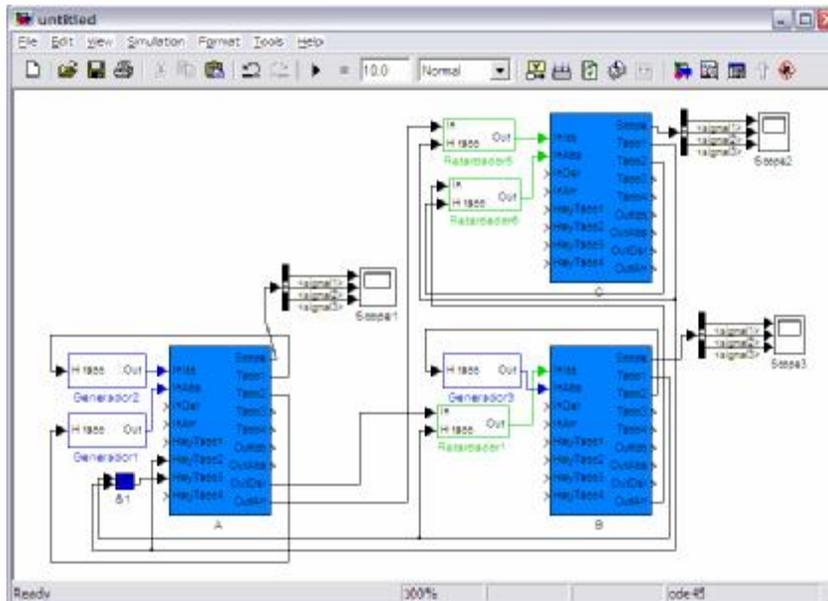


Figura 43. Paso 3.9

4. Asigne los ID a los *generadores* según el mapa.
5. Asigne los ID a los *retardadores* según el *semáforo* donde llegan.
6. Grabe todos los datos de su sistema con la interfaz gráfica *Principal*.

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Duty cycle desproporcionado

Durante la simulación es típico encontrar algunas intersecciones con uno de los problemas más comunes que acarrea no usar diferentes planos en los controladores durante el día. Este problema es el descuadre evidente del DC; es decir, un segmento tiene más tiempo de flujo que otro llevando al segundo a un exceso de almacenamiento. En varias intersecciones del simulador se presentó este hecho, pero debe tenerse en cuenta,



que muchas veces es deseable, ya que la vía que tenga el congestionamiento puede ser de menor importancia que a la que se le da prioridad en el DC.

Un caso típico en las calles de nuestra ciudad, son los giros en U, que a ciertas horas presentan mucha más congestión que durante el resto del día, ocasionando largas filas, y obstruyendo un carril entero de una vía importante.

Caso del simulador:

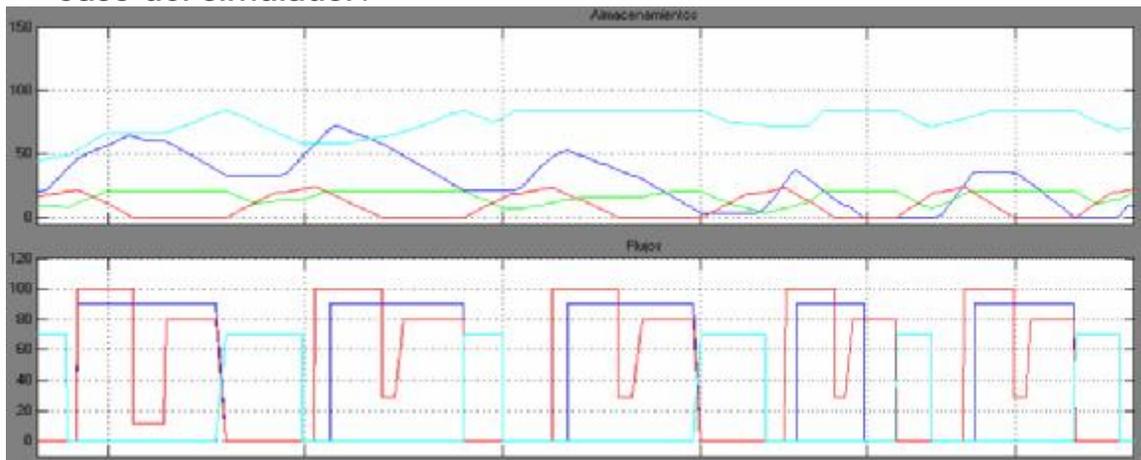


Figura 44. Duty cycle desproporcionado.

El semáforo rojo, presenta poco almacenamiento y su flujo no es completo, es decir, no salen tantos carros como el tiempo de verde lo permite, ya que la forma de su señal de flujo no es cuadrada como la mayoría de las azules. Lo anterior indica que, los semáforos azules, especialmente el azul claro, requiere más tiempo de verde, mientras el rojo nunca usa completamente su tiempo de verde.

Desperdicio de verde por congestionamiento

Muchas veces, el funcionamiento de los semáforos con tiempos supuestamente adecuados puede verse afectado por un



congestionamiento en alguna de las vías hacia donde van los vehículos. Por lo que, si una vía tiene un verde, y debe evacuar carros, no podrá hacerlo pues éstos no tienen a dónde ir. Ese hecho en la vida real, ocasiona constantemente la obstrucción de las intersecciones propagando el taco no sólo sobre la vía que está llena, sino sobre las demás que llegan al cruce. La solución debe ser, no dar el verde al segmento que no tiene una ruta de salida despejada, o que los semáforos funcionen en modo coordinado. Este problema también es observable desde el simulador:

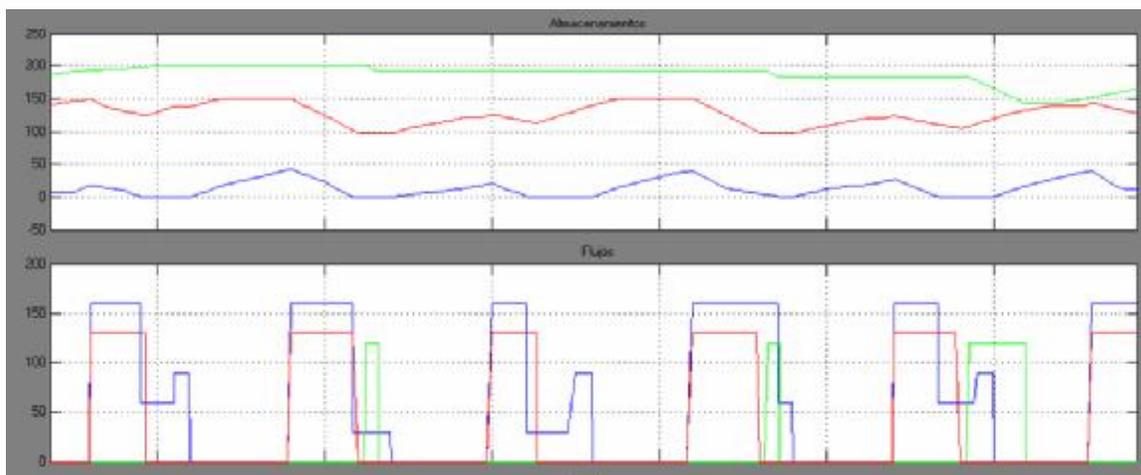


Figura 45. Desperdicio de verde por congestionamiento.

El segmento del semáforo verde, llega a su máxima capacidad de almacenamiento de 200 vehículos, y su tiempo de verde equivale a todo el tiempo en que no hay flujo del semáforo rojo. No obstante, el flujo verde sólo emplea una pequeña fracción de ese tiempo en cada uno de los ciclos, ya que la vía hacia donde va el flujo está llena. Ese tiempo puede ser aprovechado, dando luz verde al semáforo de color rojo que también está en sus límites de capacidad y necesita desalojar los vehículos.

✚ *Mala movilidad*



Se tomaron medidas sobre el número de carros que salían en un carril de un semáforo durante su tiempo de verde, y se separaron los datos por intervalos de 10 segundos. En el mismo segmento de la misma intersección, durante menos de 25 minutos se presentaron 4 comportamientos que podríamos calificar de indisciplina en el manejo del vehículo. Los comportamientos fueron: Dos buses descargando pasajeros sobre un carril transitable, un particular parqueado sobre el mismo carril, y un carretillero empujando su carreta de chatarra y reciclaje. Las siguientes gráficas, muestran a la izquierda, los flujos presentados sin anomalías, y a la derecha, los flujos de los cuatro casos anteriormente mencionados.

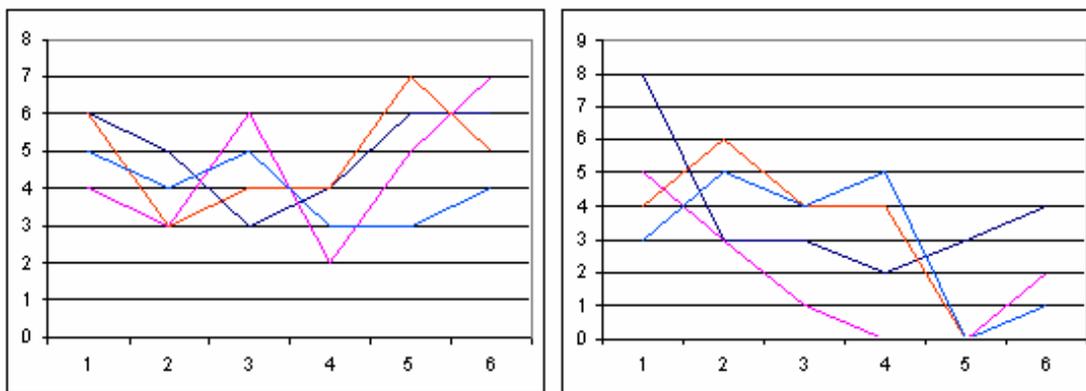


Figura 46. Flujos típicos (izquierda) y flujos obstruidos (derecha).

Al comparar el total de vehículos que pasaron el semáforo en las diferentes situaciones, y teniendo en cuenta que la indisciplina se presentó en 4 de 12 ciclos de semáforo; concluimos que hubo una reducción de salida de vehículos del 63%.

Para probar los datos experimentados en el simulador, se comprobó que en condiciones normales, en la hora *PicoM*, ninguno de los segmentos del simulador quedó bloqueado por alguna congestión significativa, ni dicha congestión se propagó,



en un tiempo equivalente a 1 hora real. Al reducirse los flujos de salida de todos los semáforos del sistema al 63%, durante varias simulaciones se comprobó que el congestionamiento se propaga típicamente en un tiempo de 15 a 22 minutos.

✚ Retardos descuadrados

Para tener certeza sobre la correcta configuración de los parámetros de los tiempos de los semáforos, en la interfaz gráfica *Principal*, en la pestaña de gráficos, el gráfico *Tiempos por cruces*, muestra las señales de cada semáforo agrupadas por intersecciones y separadas según sean calles o carreras. En la siguiente figura, la segunda intersección tiene una carrera (en verde) y dos calles (en rojo y en azul). Se observa claramente como el final del verde del semáforo azul ocupa una porción del tiempo de rojo del semáforo verde. Eso implica que tanto la carrera como la calle tendrían unos segundos de verde simultáneamente.

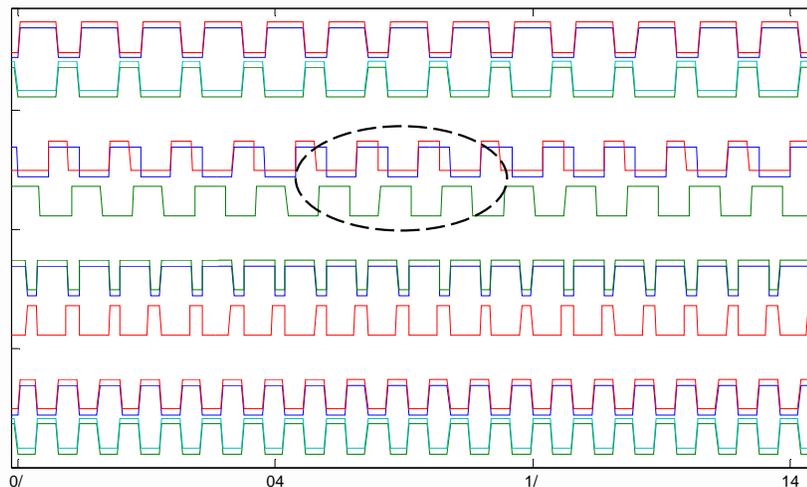


Figura 47. Retardos descuadrados.

✚ Carreras vacías y Calles llenas



En cualquier situación donde se presentan unos segmentos llenos y otros parcialmente vacíos, es importante analizar la prioridad de cada segmento y el total de vehículos que se están almacenando. Aunque siempre que algún segmento se llena, queda a criterio del ingeniero vaciarlo o no; el simulador ayuda a tomar la decisión gracias a que muestra el número de vehículos reales que hay en cada segmento. Un ejemplo claro se ve en la siguiente figura:

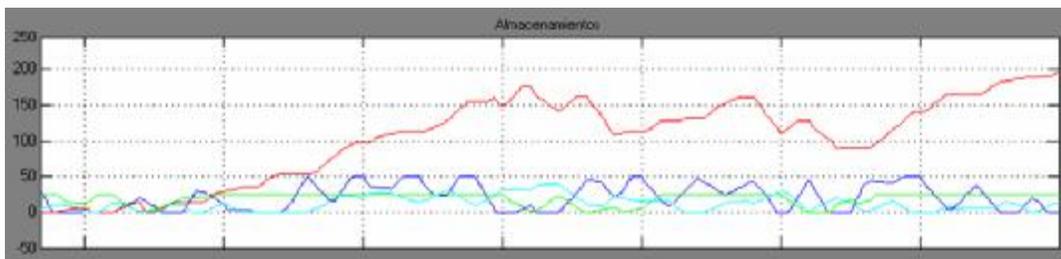


Figura 48. Carreras vacías y calles llenas.

El semáforo azul y el verde son calles que alcanzaron sus respectivas capacidades de almacenamiento de 50 y 25 vehículos. No obstante, aunque ambos estén llenos la mayoría del tiempo, la suma de los vehículos que retienen no alcanza el almacenamiento del segmento rojo, que está parcialmente vacío, pero agrupa más de 150 vehículos.

⚡ Segmentos autosuficientes

Sabiendo que algunos segmentos reciben un promedio de vehículos en un intervalo de tiempo, y que este promedio tiene generalmente poca varianza, es posible que en alguna hora típica de congestión, algún segmento tenga la capacidad de mantener un almacenamiento bajo, y que en cada ciclo, el verde asignado le sea suficiente para vaciarse por completo. A ese respecto, el simulador mostró siguiente caso:

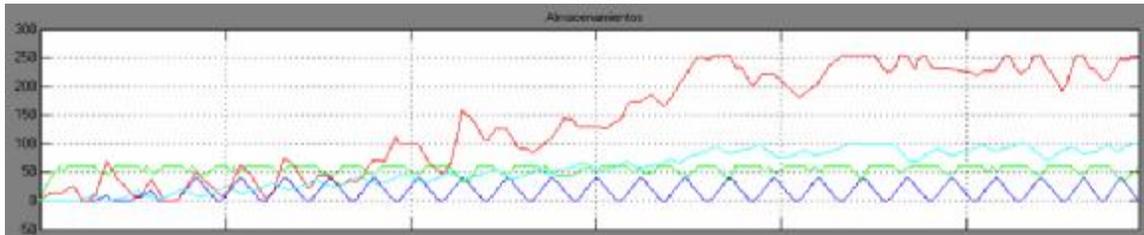


Figura 49. Segmentos autosuficientes.

El almacenamiento del segmento representado por el color azul, siempre llega a vaciarse completamente después de cada verde.

✚ Necesidad de funcionamiento por planos

Para el simulador, la transversal inferior tiene 4 segmentos en dirección Oriente-Occidente, en la Calle 10, la loma de los Parra, la loma de los González y la loma de los Balsos. Estos segmentos, a pesar de ser cortos (de poca capacidad de almacenamiento), presentan normalidad durante la mayoría del día excepto a una "hora". En la hora *PicoAM*, todos presentan congestión. Dado que el congestionamiento es a una sola "hora" del día, el verde que les corresponde debería ser más largo, sólo para el tiempo de congestión, esto implica la necesidad del funcionamiento por planos.

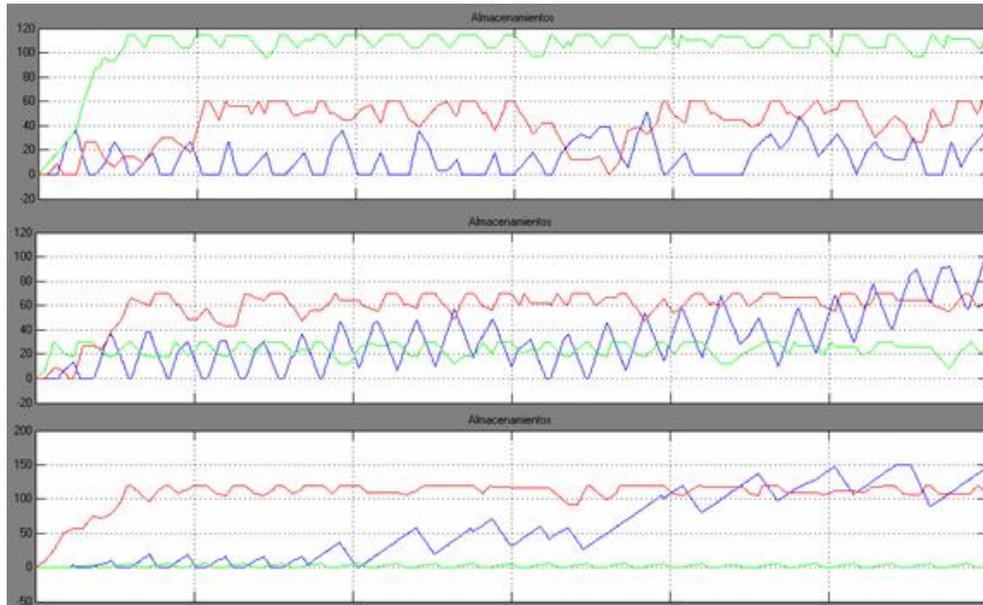


Figura 50. Necesidad de planos.

Tres de las cuatro vías mencionadas muestran sus almacenamientos en éstos gráficos, la cuarta se ve en el siguiente caso de análisis, y en todas se ve el segmento rojo congestionado.

Cambios en los sentidos de las vías

Aunque los cambios en los sentidos de las vías, generan incomodidades inicialmente, el usuario se acostumbra, y terminan por ser (generalmente), buenas soluciones para problemas de congestionamientos. El simulador también muestra un caso en el que esta medida puede tomarse, incluso por algunas horas del día, como es el caso de la carrera 7^a en Bogotá, que a partir de las 5 de la tarde sólo puede transitarse en sentido Sur-Norte.

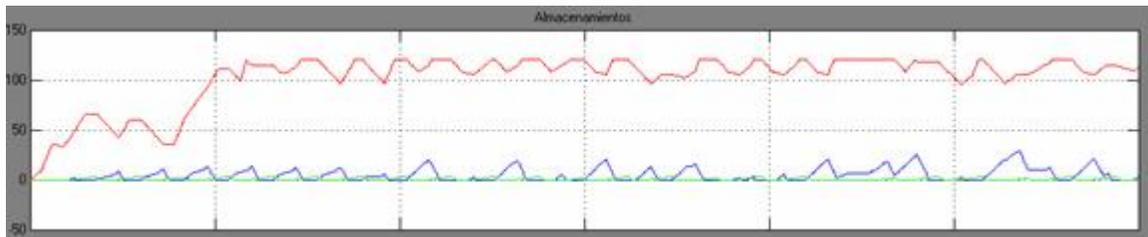


Figura 51. Posibilidad de cambio de sentido de las vías.

El almacenamiento en color verde, muestra el uso de la loma de los Balsos en sentido Occidente-Oriente, mientras que el almacenamiento en sentido Oriente-Occidente, se ve en color rojo. Es evidente que hay una enorme desproporción en la demanda entre ambas direcciones sobre la misma vía, por lo que podría pensarse en que la vía quedara en un solo sentido.

Semáforos peatonales

Aunque el simulador no incluye ningún semáforo únicamente peatonal, es decir, aquellos que no involucran intersecciones vehiculares, sino que alguna vía es atravesada por un paso peatonal que opera con un semáforo vehicular. Estos semáforos están configurados típicamente para ser accionados por pulsador, y operan con tiempos límites máximos y mínimos para la luz verde y roja. Así, cada vez que un peatón pulsa, el controlador espera a que se cumpla el mínimo de verde para los vehículos, y luego los detiene. Igualmente si ningún peatón pulsa, el controlador cuenta un tiempo máximo y detiene los vehículos. En el caso del poblado, fueron estudiados dos semáforos peatonales: El de la salida de la universidad Eafit en la avenida Las Vegas, y el de la nueva transversal 34 con la calle 10 A.

El de la avenida las vegas, presenta un buen funcionamiento en las horas de cambio de clase de la universidad, ó a en la hora de salida del colegio San José de las Vegas. Durante cerca de 30 minutos, se hace evidente la necesidad del semáforo, y bastantes peatones se ven beneficiados para cruzar fácilmente. No obstante



durante cerca de una hora, el semáforo permanece poniendo rojos para los vehículos, con tal frecuencia que genera congestión, y pasan muy pocos peatones. Detener el tránsito normal por algunos segundos, puede no ser un problema, siempre que la avenida no esté congestionada, sin embargo, cuando se forman largas filas, las demoras inducidas al tráfico no son de unos pocos segundos, sino que se convierten en minutos. Además, no parece ser justificable, que se detengan un promedio de 20 ó más vehículos (según la hora) para que uno ó dos peatones crucen la calle, y más si pensamos que en los 20 vehículos hay buses, y entre ellos pueden transportan cerca de 50 personas.

El de la calle 10 A, es bastante extraño, pues fue observado por más de 30 minutos durante las horas de la tarde y no pasó ningún peatón. Sin embargo sí se detuvieron cerca de 15 vehículos en cada ciclo.

Además de los retrasos evidentes que provoca un semáforo peatonal al flujo vehicular, cualquier detención al tráfico aumenta la contaminación:

La Aristotle University of Thessaloniki, en Grecia, desarrolla continuamente el sistema COPERT (*Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport*). El COPERT se ha convertido en una de las herramientas más usadas en el mundo para el cálculo de emisiones contaminantes en los sistemas de transportes. Según éste, cada vehículo tiene diferentes tasas de emisión según características como cilindraje, catalizador, tipo de combustible, entre otras. No obstante, las diferentes sustancias contaminantes tienen factores de contaminación calculables según la siguiente gráfica:

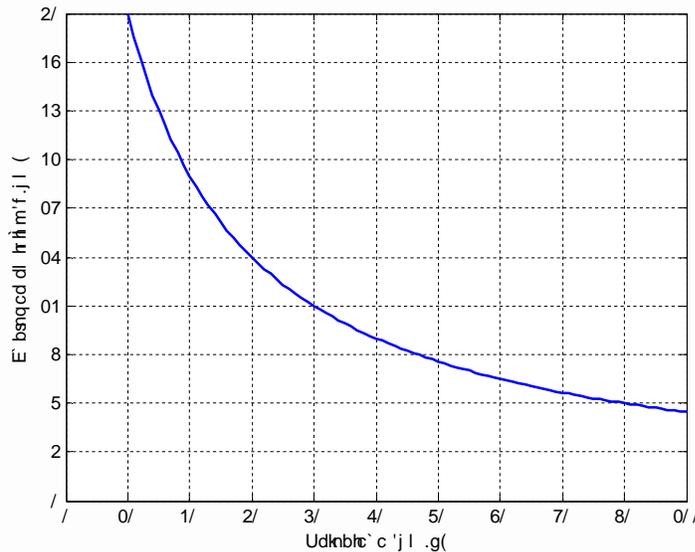


Figura 52. Factor de emisión de monóxido de carbono (CO) vs velocidad.

Fuente: ROUVEIROLLES, Pierre. Road transport emission inventory, Renault, Sao Paulo, 2002. p 19. [on line]. <http://www.cleanairnet.org/lac> [consulta: Dic 2005]

Como es lógico, las emisiones típicamente se reducen con el aumento de la velocidad. Por lo tanto, cuando un vehículo pasa por un semáforo peatonal sin detenerse, no sólo ahorra tiempo, sino combustible, y con esto reduce la contaminación. De acuerdo con los valores de las ecuaciones del sistema COPERT, se obtiene el siguiente gráfico:

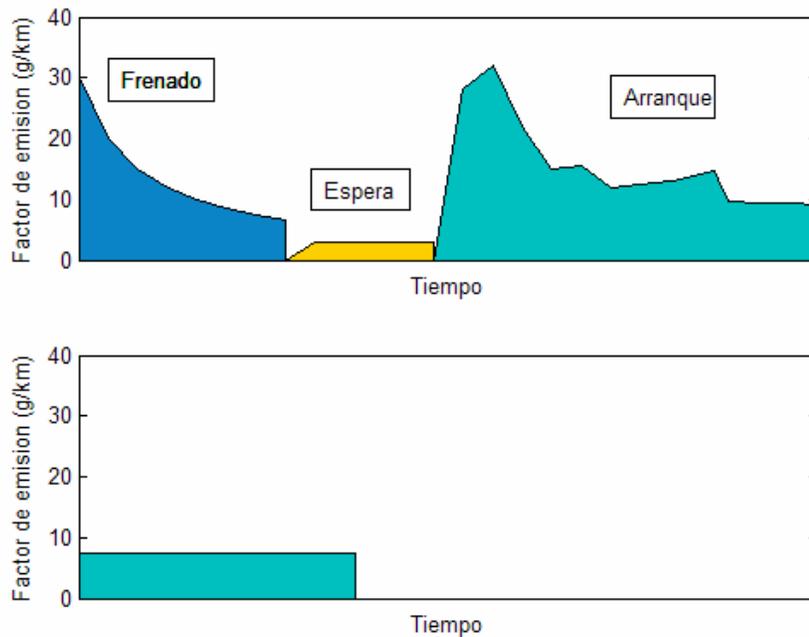


Figura 53. Factor de emisiones de monóxido de carbono (CO) parando en un semáforo (arriba), ó sin parar (abajo).

La cantidad de contaminación, será proporcional al área bajo la curva del factor de emisiones. Como el tiempo de espera del semáforo, es diferente en cada caso, a partir de la gráfica se calcula la variación de emisiones contaminantes para un carro que se detiene un tiempo muy reducido, respecto del que no se detiene. El resultado es que el carro que se detiene aumenta sus emisiones contaminantes aproximadamente un 442%.

Sabiendo que en un día pueden llegar a detenerse miles de carros por un rojo de un semáforo peatonal innecesario, es evidente que hay un exceso de contaminación inducido por el mal manejo de los tiempos de los controladores por parte de las autoridades.

4. SISTEMA DE CONTROL

4.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DIFUSO

La lógica difusa, ha sido históricamente una alternativa intuitiva a los problemas poco descriptibles por medio de la lógica binaria tradicional. Este problema fue llamado por los expertos: *The Real World Vagueness*, y explicado como: *"The development of fuzzy logic was motivated in large measure by the need for a conceptual framework which can address the issue of uncertainty and lexical imprecision"*¹³. Es decir, ante la imposibilidad de tratar la incertidumbre de muchos problemas científicos y de ingeniería con lógica binaria, nace la lógica difusa.

Un ejemplo típico de lógica difusa es analizar la validez de una sentencia o una proposición cualquiera del lenguaje cotidiano. La proposición "Un Renault Clio es potente": En lógica binaria, debe definirse un límite para determinar si es o no es potente. Mientras que en lógica difusa, se puede hablar de conjuntos de vehículos *poco, medianamente, y muy potentes*. Y según sea el caso, se le puede asignar al Renault Clio un grado de pertenencia a cada conjunto.

Las pertenencias de un elemento a un los diferentes conjuntos, pueden ser descritas por funciones llamadas *funciones de membresía*. A partir de la visión

¹³ CASTRILLON, Jerónimo. Sistemas de inferencia difusa. Memorias de diplomado en computación inteligente. Medellín : UPB, 2005. p.8.

difusa de los problemas, nacen los sistemas de inferencia difusos *Fis* (*Fuzzy inference system*). Un *fis* está compuesto por:

- Una base de reglas, basadas en la forma *si enunciado entonces enunciado*.
- Un mecanismo de inferencia para derivar conclusiones difusas.
- Una interfaz de *fusificación*, para convertir las señales reales, en difusas.
- Una interfaz de *defusificación*, para convertir las señales difusas, en reales.

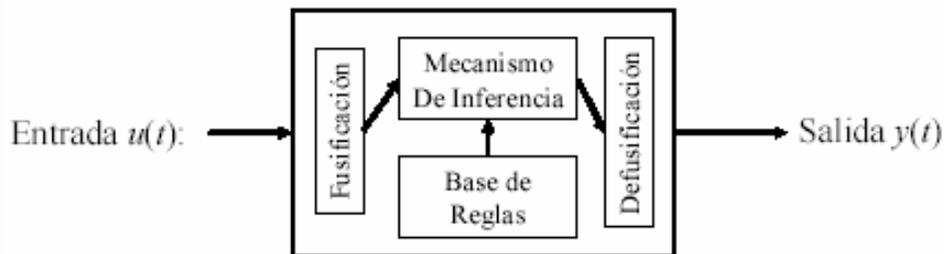


Figura 54. Descripción gráfica de un *fis*.

Fuente: CASTRILLON, Jerónimo. Sistemas de inferencia difusa. Memorias de diplomado en computación inteligente. Medellín : UPB, 2005. p.16.

El control difuso es una de las mayores aplicaciones de los sistemas y la lógica difusa. Un controlador difuso, que tome decisiones en un sistema en lazo abierto, es considerado como un controlador no lineal sin dinámica interna.

Finalmente, una de las características más importantes, es que el control difuso no requiere necesariamente de un modelo matemático, sino de un experto que implemente sus conocimientos al control en forma de reglas de implicación difusa.



4.2 APROXIMACIÓN DIFUSA A LOS SEMÁFOROS

Determinar los tiempos de los semáforos, es una tarea compleja, más si se piensa en hacerlo de forma benéfica para un sistema de muchas intersecciones, y no hacerlo para cada intersección individualmente. Los cálculos clásicos de los tiempos de los semáforos, son basados en los reportes de aforos de los segmentos de un cruce, y cuidando no obstruir vías cercanas por el uso de ciclos muy largos.

Pero las técnicas clásicas sobre cálculo y control de semáforos, demuestran tener amplias limitaciones, ante dos factores muy actuales: El crecimiento del tráfico, y el nacimiento de técnicas sobre control de flujo, y de semáforos por medio de inteligencia artificial.

Las técnicas más comunes, o más reconocidas por sus resultados, tanto en simulación como en control de tráfico, son entre muchas otras, Autómatas celulares, programación dinámica, aprendizaje por refuerzo, algoritmos de evolución y controladores difusos.

Cada uno de los métodos hace una aproximación diferente, y en general, la mayoría de las investigaciones reportan el uso de ambientes simulados para probar la efectividad del tratamiento o control implementado.

Para el control difuso, típicamente se usan los almacenamientos, los flujos y las densidades, o alguna combinación de éstas variables como entradas para el sistema.

La fusificación se lleva a cabo, transformando los valores de estas variables en funciones de membresía a valores como *bajo medio* y *alto*.

La base de reglas para una intersección puede ser genérica, pero



si se piensa en un sistema de varios cruces, es necesario implementar reglas únicas según cada caso; ya que las variables que determinan la validez de la regla, no se encuentran en ningún otro sistema vial, y generalmente, quien determina las reglas, deberá ser el experto del tráfico en la ciudad, persona que seguramente sabrá mucho del tráfico en un lugar, pero no sabrá en de los problemas de muchos otros sistemas.

El mecanismo de inferencia, debe adaptarse y experimentar su funcionamiento, según sean escogidas las formas de las funciones de membresía. Cualquier cambio en las formas, los valores y el pre-procesamiento de las variables alterará los buenos resultados que el sistema pueda inferir del conjunto de reglas.

Y finalmente, la defusificación, siempre deberá ser analizada por el experto, pues por más completo que sea un sistema difuso, nunca contendrá todo el conocimiento de quien lo diseñó. La intención es que los resultados de la defusificación, contengan valores reales de las variables temporales de los semáforos (*Ciclo*, *Duty Cycle* y *Retardo*), y que dichos resultados no sean fácilmente predecibles ni observables por el experto, no obstante, el *fis* puede sugerir cambios que resulten peligrosos para la estabilidad del sistema.

4.3 CONTROL DIFUSO APLICADO A TRÁFICO VEHICULAR

Para demostrar la capacidad del control difuso en manejar intersecciones sencillas, o situaciones típicas de las vías urbanas, se expone a continuación el siguiente ejemplo.

Uno de los mayores problemas del congestionamiento es su propagación rápida por toda la red vial. Sería razonable pensar que si un segmento en una avenida se llena, el taco se propague únicamente hacia los segmentos precedentes de la avenida, no



obstante, el taponamiento de las intersecciones de cada uno de los segmentos propaga el congestionamiento en las vías que cruzan la avenida, y rápidamente éste se extiende por toda la zona urbana. Un ejemplo común se observa en la siguiente figura:

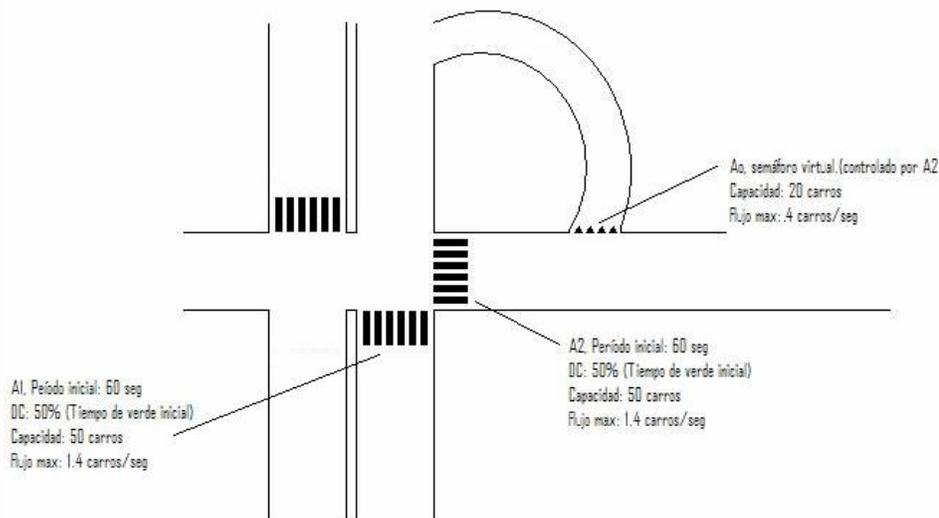


Figura 55. Sistema vial para control difuso.

En el ejemplo de la figura, los vehículos del segmento A1 no pueden girar a su izquierda inmediatamente, deben tomar la oreja (Ao), para buscar salida por el segmento A2. La oreja, funciona como un semáforo virtual, ya que aunque no tiene indicador de luces es controlado por el semáforo de A2. Así, si muchos vehículos quieren tomar la oreja mientras el segmento A1 está en verde, es muy probable que la intersección esté obstruida cuando el verde pase al semáforo del segmento A2; provocando un *loop* de congestionamiento, que en teoría no podría resolverse.

El simulador se ha configurado para mostrar el cruce del ejemplo así:

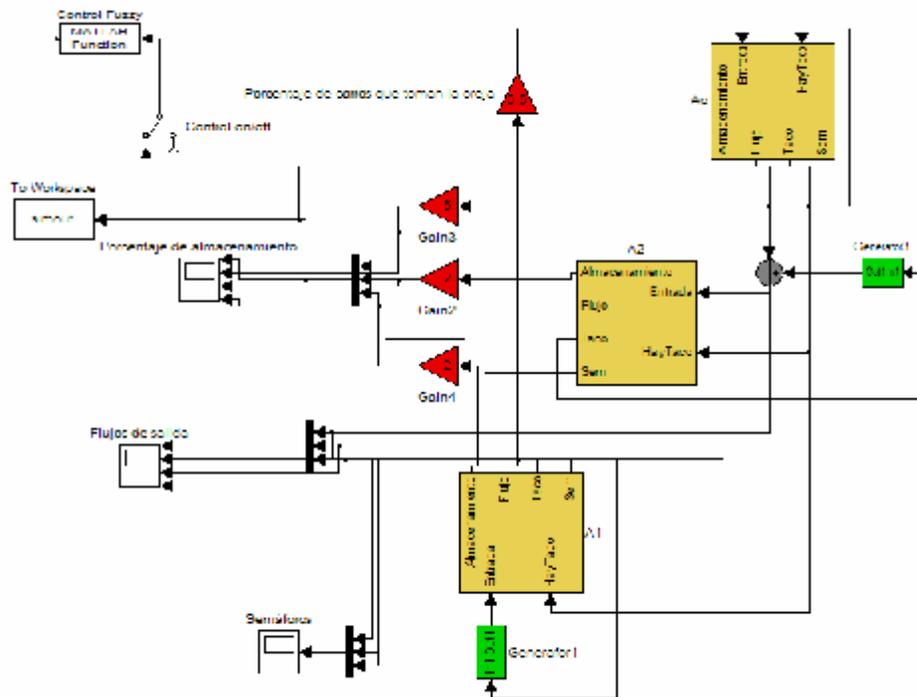


Figura 56. Simulación del ejemplo para control difuso.

El bloque de *Matlab fuction* llama la función *evalfis* para cambiar los tiempos de los semáforos según la salida del *fis*.

A continuación se presenta la gráfica obtenida para los porcentajes de almacenamiento de cada semáforo con los tiempos calculados por el control clásico, es decir, tiempos fijos:

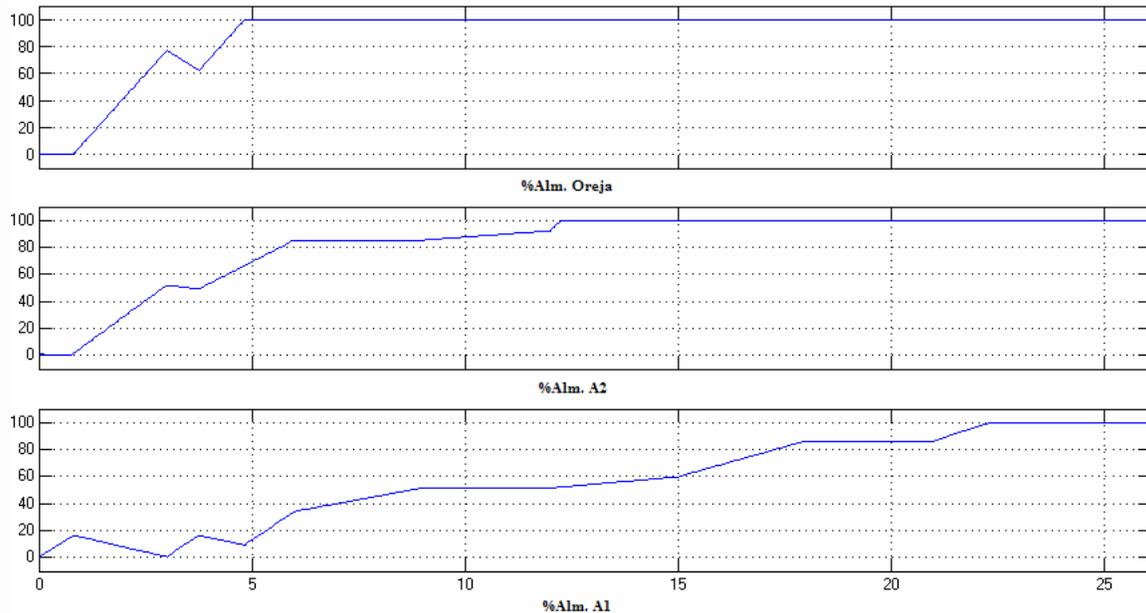


Figura 57. Congestionamiento de los tres segmentos controlados con tiempos fijos calculados clásicamente.

Al ver la inminente necesidad de mantener la intersección libre para el buen funcionamiento del cruce; se realizó un control difuso con las siguientes características:

- Tres entradas: Cada uno de los porcentajes de almacenamiento.
- 14 reglas conectadas con método *and* del *producto*.
- Implicación por método del *producto*.
- Agregación por método del *máximo*.
- Defusificación por método del *centroide*.
- Dos salidas con funciones de membresía *gaussianas*: *Duty Cycle*, y *Período*.

La principal función del conjunto de reglas consistía en mantener el almacenamiento de la oreja por debajo del 80%.

La evaluación del *fis* se lleva a cabo al final de cada rojo del



segmento A1, es decir al comienzo de un ciclo para toda la intersección, y la acción de control es tomada en el mismo momento, es decir; los ciclos se adaptan constantemente a la necesidad real de la intersección, y es poco probable encontrar ciclos iguales durante la acción del control.

Los resultados se observan en la siguiente gráfica:

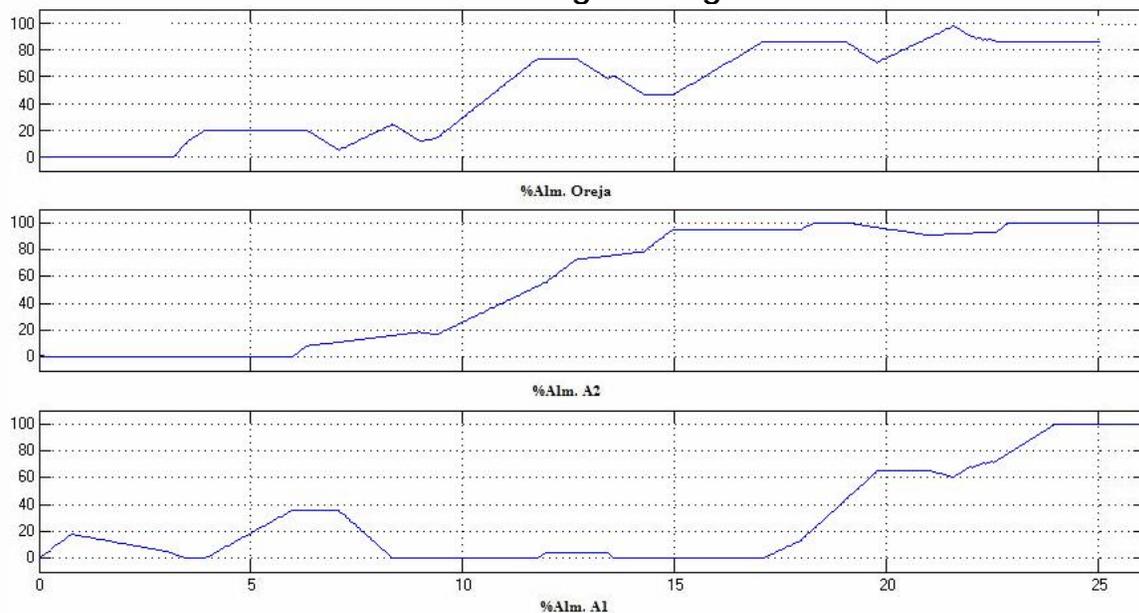


Figura 58. Resultados del control difuso sobre los almacenamientos porcentuales de los segmentos.

El número total de vehículos que salen de la intersección en el mismo período de tiempo (250 segundos) se incrementa en 388%. Este porcentaje simplemente explica que el control difuso puede mejorar una intersección, pero en un sistema real de varias intersecciones, debe tenerse en cuenta, que la solución para una puede significar un problema para otra. Lo que quiere decir que no se debe esperar que el control difuso incremente el flujo vehicular de un sistema de manera exagerada.



4.4 CONTROL DIFUSO PARA LAS INTERSECCIONES DEL SIMULADOR

Bajo los mismos métodos usados en el ejemplo anterior, se busca entonces dar solución a los tiempos de cada una de las 11 intersecciones del modelo del simulador en la zona del Poblado.

Los diferentes cruces poseen la característica en común de que pueden ser evacuados en dos movimientos: uno para las carreras y otro para las calles. Pero se diferencian en el número de segmentos que varía entre 3 y 4.

Suponiendo una intersección de 4 segmentos, se pretende que cada entrada tenga 3 funciones de membresía: *bajo*, *medio* y *alto*, según el nivel de almacenamiento de los segmentos. Las salidas del sistema serían nuevamente el *Período* con tres funciones de membresía en los mismos 3 niveles, y el *Duty Cycle* con sólo dos funciones: *Carreras* y *calles*, que implicarían un verde más largo para unas o para otras.

Si se pretende hacer una regla para cada una de las posibles situaciones complejas, se necesitarían 67 de ellas, para cubrir todos los casos en que al menos uno de los segmentos presentará nivel *alto*. Tal control sería bastante engorroso de configurar, y tendría poca capacidad de interpolación sobre la superficie de decisión.

Por lo tanto se desarrollaron varios controles con diferentes conjuntos de reglas, tratando de reducir el número de reglas y de aumentar la efectividad del control. A continuación se presenta el control definitivo, de tipo *mamdani*, con el que se obtuvo mejor desempeño:

El control consta de:

I. 6 Entradas

- Almacenamiento de Cra en sentido N-S.
- Almacenamiento de CII en sentido O-E.
- Almacenamiento de Cra en sentido S-N.
- Almacenamiento de CII en sentido E-O.
- Porcentaje de almacenamiento entre calles y carreras.
- Total de almacenamiento de la intersección.

II. 2 ó 3 Funciones de membresía

Los almacenamientos tienen tres niveles: *bajo*, *medio* y *alto*. La entrada %carreras vs %calles tiene sólo las dos funciones necesarias. La siguiente figura muestra el toolbox de Matlab para visualizar las funciones de membresía:

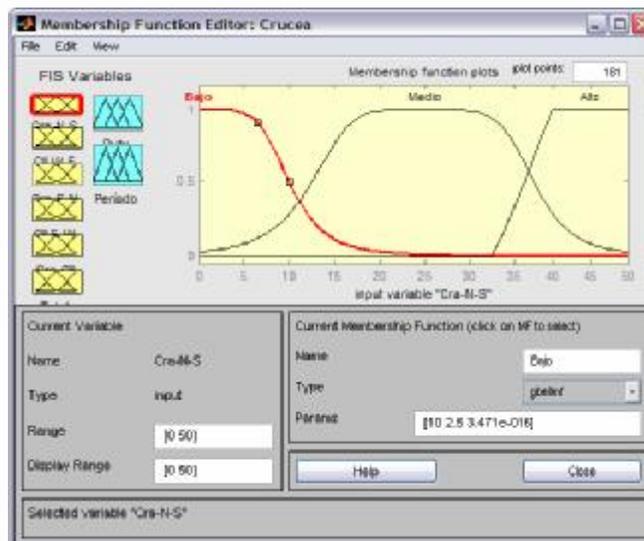


Figura 59. Funciones de membresía de la entrada 1 Cra N-S.

III. Conjunto de 11 reglas

En la correcta determinación de las reglas recae el éxito del control. El conjunto de reglas con mejores resultados se presenta a continuación:



1. If (Cra-N-S is Alto) and (CII-W-E is not Alto) and (Cra-S-N is not Alto) and (CII-E-W is not Alto) then (Duty is Carreras) (1)
2. If (Cra-N-S is not Alto) and (CII-W-E is Alto) and (Cra-S-N is not Alto) and (CII-E-W is not Alto) then (Duty is Calles) (1)
3. If (Cra-N-S is not Alto) and (CII-W-E is not Alto) and (Cra-S-N is Alto) and (CII-E-W is not Alto) then (Duty is Carreras) (1)
4. If (Cra-N-S is not Alto) and (CII-W-E is not Alto) and (Cra-S-N is not Alto) and (CII-E-W is Alto) then (Duty is Calles) (1)
5. If (Cra-CII is Cra) then (Duty is Carreras) (1)
6. If (Cra-CII is CII) then (Duty is Calles) (1)
7. If (Total is Bajo) then (Período is Bajo) (1)
8. If (Total is Medio) then (Período is Medio) (1)
9. If (Total is Alto) then (Período is Alto) (1)

Figura 60. Conjunto de reglas definitivo para el control.

Las primeras cuatro reglas evitan que cada uno de los segmentos se llene totalmente, buscando mantener despejadas la intersecciones vecinas. Las últimas 5 reglas buscan que tanto el *DC* como el *Período* (ciclo) se adapten constantemente al volumen de tráfico de los segmentos en la intersección.

IV. Métodos para la inferencia

- Conectores *and*: Producto.
- Implicación: Producto.
- Agregación: Máximo.
- Defusificación: Centroide.

V. 2 Salidas

Duty Cycle y Período. Ambas salidas están en porcentaje, respecto a un valor típico asignado en el simulador, ya que el simulador debe tener en cuenta los valores máximos y mínimos de referencia para los tiempos de los semáforos, con el fin de que los resultados del control difuso, no entorpezcan el desempeño del sistema.

4.5 CONTROL DE AVENIDAS

Siendo las avenidas, o vías principales, los ejes del buen funcionamiento de cualquier sistema vial, deben ser objeto de estudio del control a implementar. Hasta este punto, si bien puede concretarse el buen funcionamiento individual de cada intersección sobre una vía arteria del sistema, el conjunto que



éstas conforman puede tener un comportamiento muy inferior al pretendido.

Como es evidente, el máximo rendimiento de una avenida se obtiene cuando sus semáforos funcionan en un modo coordinado, configurado correctamente. Sin embargo lo que primero debe determinarse es la necesidad de que una vía sea o no sincronizada, puesto que no siempre las sincronizaciones son convenientes, especialmente en aquellos casos donde los segmentos que cruzan la avenida en cuestión, son lo que aportan el mayor volumen vehicular al sistema. El control a implementar sobre cada una de las avenidas del sistema (Av Las vegas, El poblado y Transversal Inferior), deberá proporcionar al analista la información necesaria para determinar la necesidad de la sincronización y los tiempos de retardos entre los semáforos que llamaremos *offsets*.

Para la sincronización de una avenida deben tenerse en cuenta varios aspectos:

- Es ideal que cada tiempo de verde sea lo más ajustado o lo mas corto posible, en cada semáforo para no desperdiciar intervalos esperando un grupo de vehículos retrasado, por lo tanto, se buscará que los verdes se propaguen por la avenida en la misma dirección de los vehículos, es decir; que el primer verde en activarse sea del primer semáforo que los vehículos encuentran a lo largo de la avenida. Por convención, se llamará este hecho como un *offset positivo*, y habrá un *offset negativo*, cada vez que un semáforo adelante ponga un verde antes que un semáforo precedente en una sincronización.
- De igual modo, se busca mantener el nivel de almacenamiento de cada segmento de la avenida en un valor deseado. Este valor debe calcularse buscando la conveniencia de la intersección a la que el segmento pertenece, y después de cada ciclo sincronizado debe mantenerse aproximadamente constante.



- Se buscará además propiciar, que los grupos de vehículos esparcidos en los segmentos de la avenida en un momento dado, se conviertan en el menor número de grupos posible, para así mover más cantidad de vehículos en un solo tiempo de verde.

- Para reducir el número de grupos esparcidos en la avenida, el *offset* entre segmentos buscará por medio de cálculos de velocidades y distancias promediadas, *enganchar* los vehículos de tal manera que si un grupo encuentra al siguiente, ambos queden en movimiento y no se presenten retardos.

Con el fin de cumplir con lo mencionado anteriormente, se desarrolló un algoritmo para calcular los *offsets* dinámicamente. Esto quiere decir que la avenida se mantendrá perfectamente sincronizada, pero cada cruce deberá adaptar sus ciclos constantemente para poder entrar en la sincronización y el funcionamiento bajo un plano estático quedaría descartado. Incluso, el funcionamiento de controladores coordinados tampoco sería posible, pues la sincronización cambia para cada nuevo ciclo.

✚ Cálculo dinámico de *offsets*

La situación presentada en el siguiente gráfico, es extensible a una avenida de cualquier número de segmentos, y sirve como punto de partida para entender el cálculo dinámico de los *offsets*:

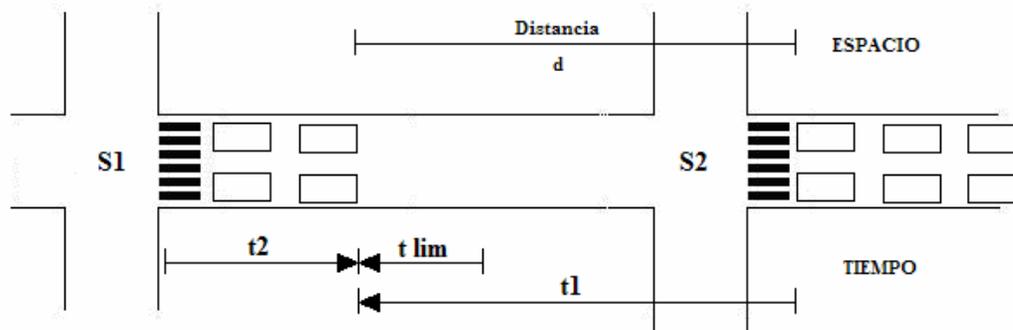


Figura 61. Variables para el cálculo dinámico de offsets.

En la figura anterior:

t_1 : Es el tiempo que tardan los vehículos del semáforo 2 (S2) en llegar a lugar donde está el último vehículo de S1, viajando a la velocidad promedio del segmento, parámetro introducido por el diseñador en el simulador.

t_2 : Es el tiempo que tarda la luz verde en causar el arranque del último vehículo que espera en la fila, calculado con la constante de propagación que es aproximadamente 1 segundo por vehículo.

t_{lim} : Es el tiempo límite que separa los vehículos procedentes de S2 de los que están en S1, de manera tal que éstos últimos tengan tiempo de arrancar y no hagan detener al grupo que los persigue. Este tiempo es el responsable de *enganchar* los grupos de vehículos, y para una velocidad de 60 km/h es de 5 segundos aproximadamente.

Con las variables anteriores, el *offset* adecuado será calculado por la siguiente ecuación:

$$offset = t_1 - t_{lim} - t_3$$

Si el *offset* es positivo, indica que S2 ve el verde en $t=0$, y S1 ve el verde en $t=offset$ (Situación ideal).

Si el *offset* es negativo, indica que S1 ve el verde en $t=0$, y S2 ve



el verde en $t=offset$.

4.6 CONTROL GENERAL

La tercera etapa del control diseñado para el simulador, consiste en un algoritmo que pretende almacenar el historial de resultados de las dos etapas inferiores descritas anteriormente, para proporcionar un análisis al diseñador acerca de las rutas principales del sistema, y de los cambios más importantes en los tiempos de los semáforos que deben ser realizados.

Esta última etapa del control, opera según tres funciones que llaman a tres algoritmos diferentes:

- Un algoritmo de reconocimiento de rutas principales, que indica aquellas rutas más usadas en el sistema según el día, la hora y el número de segmentos deseados.
- Un algoritmo de análisis estadístico sobre las salidas de los controles de las capas inferiores. El algoritmo califica los datos con un grado de veracidad según la varianza del historial de datos.
- Y finalmente un algoritmo que calcula los tiempos de los semáforos, gracias al cual, cambiar un parámetro en algún tiempo, no significa la desestabilización del sistema. Para entender esto, se debe tener en cuenta, que tanto el *período*, como el *duty cycle* y el *retardo*, dependen entre si, y cambiar uno de ellos implica calcularlos nuevamente. Además un cambio en una intersección puede afectar a las intersecciones vecinas, por eso, este algoritmo, verifica que esto no se presente y después lleva a cabo la acción de control por medio del cambio del parámetro.



5. CONCLUSIONES

Modelar el tráfico vehicular, ya sea desde una aproximación microscópica o macroscópica es un reto actual de los investigadores sobre el tema en el mundo. Un modelo muy complejo puede representar con mucha exactitud el tráfico, pero tendrá un costo computacional muy alto si pretende ser implementado en simulación. Por lo tanto, con un conjunto de reglas básicas puede lograrse una buena aproximación, con la cual es posible concretar un simulador; que sin un enfoque muy complejo del tránsito y con bajo costo de procesamiento puede llegar a simular sistemas medianamente complejos, y proporcionar valiosa información al respecto.

La composición del parque automotor del sistema de transporte de una ciudad como Medellín, obliga al colapso y la insuficiencia de la red vial, por buena que sea. Ya que las vías son un bien público, el transporte debe procurar el buen uso equitativo de ellas. Éste uso adecuado se da con transporte en vehículos como buses, mientras que en vehículos particulares se presenta un abuso del sistema. Así, es entendible que medidas como el pico y placa representen un acercamiento al modelo de transporte ideal, siempre y cuando estén acompañadas del mejoramiento de la calidad y el aumento en la cantidad del transporte público. El concepto de transporte público debe desasociarse con la idea de ser el transporte para los bajos estratos sociales.



El funcionamiento y la configuración de los semáforos en Medellín, está fundamentado en herramientas precarias y en actualizaciones poco frecuentes de los datos. Las propuestas diseñadas en este trabajo, muestran alternativas para el manejo del sistema de semáforos con recursos accesibles, apoyados en teorías de flujo vehicular, simulación computacional y control difuso; y aunque no representan una solución definitiva, deberían ser considerados para probar su efectividad con el sistema real.

La efectividad de la configuración de un controlador de un semáforo en una intersección es bastante reducida cuando se opera el semáforo en forma clásica ya que su buen funcionamiento depende de tres factores de suma importancia.

- Primero: La actualización constante de los datos. Para esto, se puede aumentar la frecuencia de los aforos, o el uso de cámaras de vídeo y el aumento del número de sensores.
- Segundo: La precisión de una acción de control determinada a partir de los datos sobre volúmenes de tráfico en la intersección. Teniendo en cuenta que esta acción es calculada bajo aproximaciones, podemos calificarla como una decisión difusa, y puede resultar más acertada cuando es determinada por un control difuso.
- Tercero: La sincronización que presente la intersección con todas sus intersecciones vecinas. Ya que no es posible que el buen funcionamiento de las intersecciones individualmente derive en el buen funcionamiento del sistema completo.



La sincronización de una avenida, es una de las mejores soluciones a problemas graves de congestionamiento en una zona urbana. Sin embargo, la sincronización con tiempos de retardo (*offsets*) fijos sólo tiene buenos resultados en condiciones de muy bajo nivel de tráfico, ya que cuando los almacenamientos aumentan la sincronización con *offsets* fijos se convierte en la causa de peores problemas como el taponamiento de intersecciones. La alternativa de los *offsets* calculados dinámicamente, se convierte en una buena solución, siempre y cuando se tengan en cuenta las restricciones que impone la avenida sobre dichos retardos.

El comportamiento de las variables de tráfico en condiciones típicas presenta la estabilidad adecuada para poder hacer aproximaciones y promedios en el simulador. El principal problema se presenta cuando alguna perturbación atípica aparece; a causa de indisciplina en la conducción, violación a los códigos de tránsito, ó vehículos varados por falta de mantenimiento. Cualquier pequeña anomalía, desemboca generalmente en grandes congestionamientos, especialmente si se presenta en horas pico, y en esas condiciones, los volúmenes de tráfico y las variables que normalmente se promedian, presentan alta varianza. Para determinar los comportamientos del tránsito en condiciones anormales, hace falta un modelo macroscópico y una simulación de alto costo computacional.

La configuración de un controlador en un plano fijo durante horas de congestionamiento, puede ser la solución más simple y menos efectiva en busca de buenos niveles de flujo. Normalmente, los semáforos son configurados dando prioridad a los movimientos más usados y a las maniobras de mayor demanda. No obstante, es normal encontrar excesos de almacenamiento en carriles de maniobras como giros en U ó giros a la izquierda especialmente en horas pico. Estos excesos provocan el taponamiento y el buen desempeño de la intersección y en general del grupo de vías cercano. Para prevenir este hecho, por medio del simulador se



puede prever sacar el controlador del plano en el que funciona, por sólo un ciclo, para descongestionar la maniobra problemática y así no propagar el taco de ese carril a las demás intersecciones.

Los semáforos peatonales mal ubicados y con poca demanda, se convierten en la forma en que las autoridades incentivan la indisciplina del transeúnte, y en un foco de contaminación y congestión desproporcionada para el resto de la ciudadanía. Por eso es necesario reevaluar su configuración, para darle prioridad al peatón sólo en las horas en que realmente se necesita, y en otros casos buscar diferentes soluciones, como puentes ó túneles peatonales.



BIBLIOGRAFÍA

ADALFE, Rodolfo; Los semáforos y el control dinámico del tránsito. Editorial: Representaciones y servicios de Ingeniería, 1976.

ÁLVAREZ Icaza, Luis. Simulación y control tráfico vehicular. México : UNAM, 2005. 35 p.

CAL, Rafael; CÁRDENAS, James. Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones. México : Universidad del Valle, 2003. 527p.

CASTRILLON, Jerónimo. Sistemas de inferencia difusa. Memorias de diplomado en computación inteligente. Medellín : UPB, 2005. 80 p.

CLANDER R., HERMAN E. y MONTROLL E. Traffic Dynamics : Studies in car Following. En : Operational Research. S.I. no.2 (1958) ; p.41-43.

DEXTRE, Quijandria Juan; CARRASCO, Luis Freddy. Modelo de simulación de tráfico vehicular. Trujillo, Perú: Pontificia Universidad Católica de Perú, 1990. 10 p.

ERLANDSSON, Lennart; BAUNER, David. Clean Air Workshop 2003. [On line] Rio de Janeiro : Clean air net, 2005. <<http://www.cleanairnet.org/lac>> [Consulta: Diciembre de 2005]



GIPPS P., A behavioural car-following model for computer simulation. En : Transportation Research. S.I. (1981) ; p.105-111.

GONZÁLEZ, Juan Manuel ... et al. ¿Cómo mejorar el flujo vehicular por medio de la simulación?. México : Escuela Nacional de Optimización y Análisis Numérico, 2003. 6 p.

GREENBERG, H. An analysis of traffic flow, operations research. S.I. : s.n., 1959.

GREENSHIELDS, B.D. A study in highway capacity, highway research board, Porceedings. S.I. : s.n., 1935.

LOZANO, Angélica; TORRES, Vicente; ANTÚN Juan Pablo. Tráfico vehicular en zonas urbanas. México : UNAM, 2002. 45 p.

MARTINEZ, Abel. Nuevo procedimiento para el cálculo de los ciclos semafóricos. En : Revista Ingeniería Civil. S.I. Vol. 041, no.0001 (1990) ; p.63-69.

MUNJAL, P. K. y PIPES, L. A. Propagation of On-ramp density perturbations an unidirectional and tow and three lane freeways. En : Revista Transportation Research. S.I. Vol. 5, Nro. 4 (1971) ; p.15-26.

PIPES, L. A. Car following models and the fundamental diagram of road traffic. En : Revista Transportation Research. S.I. Vol. 1, Nro. 1 (1967) ; p.45-52.

RODRIGUES, Áttila L.; de OLIVEIRA Mário J. Continuous Time Stochastic Models for Vehicular Traffic on Highways. Sao Paulo : Universidad de Sao Paulo, 2003. 380 p.



ROUVEIROLLES, Pierre. Road transport emission inventory, Renault. [On line] Sao Paulo : s.n., 2002. <<http://www.cleanairnet.org/lac>> [Consulta: Diciembre de 2005]

TOLEDO, B. A. ... et al. Tráfico vehicular como sistema complejo. [On line] Bogotá : Chile : Departamentos de física de las universidades de Chile, y Universidad de los Andes, 2005. <<http://sgi.otalca.cl/file/4taJornada/resumenes.pdf>> [Consulta : Marzo 2005]

UNDERWOOD, R. T. Speed, volumen and density relationships, quality and theory of traffic flow. En : Yale bureau of highway traffic. S.l. (1961) ; p.23-29.

WIERING, Marco ...1 et al. Intelligent traffic light control, Technical report. Paises Bajos : Utrech University, 2004. 31 p.



ANEXOS



ANEXO A

Datos del trabajo de grado.

1. Involucrados:

Daniel Jaramillo Ramírez

Terminó décimo semestre de Ingeniería Electrónica en la UPB.

Contacto: jaramillodaniel@gmail.com

Ricardo Jaramillo Mejía

Secundaria: Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín.

Universitaria: Ingeniero Mecánico de la U.P.B. en 1970.

Master en Ingeniería Mecánica, mayo de 1975.

Univ. de Michigan. Graduado con honores.

Especialización en Diseño de Máquinas y Análisis de fallas.

Trabaja independiente en Ricardo Jaramillo & Cia.

2. Modalidad:

Diseño y/o desarrollo de prototipo y/o producto.

3. Tema del Proyecto:

El tema del trabajo es el tráfico vehicular, más precisamente, el control del tráfico por medio de semáforos. El trabajo consta de tres partes.

La primera, es un compendio y/o formulación de una teoría de tráfico que permita establecer según parámetros de un sector urbano, el comportamiento de su tráfico vehicular.

La segunda parte será la creación de un simulador de tráfico en simulink (Matlab), que permita visualizar el comportamiento del tráfico, por medio de gráficos. Además, el simulador tendrá total adaptabilidad para simular cualquier situación vial que pueda presentarse en cualquier ciudad.



Y la tercera etapa del trabajo, será la implementación de un control difuso en el simulador, entre los semáforos del Poblado, con datos reales y proyecciones estadísticas basadas en la teoría de la primera parte del trabajo. Este control estará encargado de mostrar cual es la mejor solución a los atascos vehiculares, y en general a la movilidad en ese sector de la ciudad.

La división del tiempo de trabajo será de la siguiente manera:

Tipo trabajo	Teórico		Simulación		Control
	Búsq/Estudio	Desarrollo	Recolección de datos	Simulador	
%	15	15	10	30	30

Área	Control difuso	Tráfico vehicular	Estadística	Programación
%	30	25	20	25

4. Antecedentes:

La población mundial crece, pero el planeta no, y es por eso que podemos afirmar fácilmente que problemas de transporte siempre existirán y más en las ciudades. Manejar en Medellín, y en cualquier parte del mundo, cada vez es más difícil. Y más aun cuando el sistema vial no es el adecuado, está mal controlado y subutilizado. Estas afirmaciones, nacen después de manejar un tiempo en las calles, de observar el funcionamiento desastroso de los semáforos, de sufrir las incomodidades de los tacos o el pico y placa, y de hacer algunas averiguaciones alrededor de la secretaría de tránsito y el manejo de los semáforos. Pero mayor fue mi interés en el tema, cuando mientras aprendía fundamentos de control difuso, encontré que el problema del mal uso de los semáforos se presentaba ideal para aplicar allí la extrapolación del conocimiento observable en un control difuso para encontrar de la mejor manera los tiempos de los semáforos.



Cuando hablamos de teoría de tráfico vehicular, es preciso anotar que es una rama bastante amplia, aunque no muy formal, la cual es estudio típicamente de ingenieros civiles.

Hablando más precisamente de simulación de tráfico, los avances teóricos que buscan modelar el tráfico matemáticamente, se han enfrentado a grandes retos de ingeniería, y han mostrado progreso desde diferentes enfoques y desde cualquier cantidad de lugares en el mundo, ya que el problema del tráfico es una constante en los cinco continentes. La simulación y el control de tráfico han rodeado técnicas de todo tipo. Técnicas modernas de control incluso han sido utilizadas, pero los diferentes modelos simulados encontrados, generalmente no buscan simular flujos uniformes a través de sistemas de semáforos, sino más bien, buscan descubrir *rutas* óptimas, o encontrar *comportamiento del tráfico* a partir de la descripción del comportamiento de cada individuo dentro de un flujo. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo ya ha sido ampliamente tratado, pero no en Medellín, y tampoco desde mi enfoque.

El enfoque al que me refiero nace desde una situación muy simple a la que todos los ciudadanos que manejamos cualquier automotor, nos enfrentamos diariamente. Ya que con poca observación y sentido común, es fácil descubrir que los semáforos en Medellín no funcionan bien, o para decirlo mejor no funcionan de la mejor manera. Posteriormente, enfrenté la necesidad de hacer un modelo de un sistema y un control de dicho modelo para el trabajo final de SAC, y allí comenzó el proyecto. Para ese trabajo, encontré con mis compañeros, que era necesario simplificar matemáticamente al máximo cada detalle para poder construir algo manejable desde simulink. Luego surgió la idea de ver los semáforos como un conjunto de tanques que se pasan flujos entre si, y que almacenan flujos de tránsito según las señales de los semáforos que los controlan.



El recuento de trabajos similares puede encontrarse en la bibliografía. Algunas universidades que han hecho aportes significativos en este tema son:

- Universidad Nacional Autónoma de México; Instituto de Ingeniería; Angélica Lizcano, Vicente Torres, Juan Pablo Antún.
- Pontificia Universidad Católica del Perú; Ingeniería Civil; Carlos Dextre.
- University of Texas at San Antonio; Nikos Salíngaros.
- Instituto de Física, Universidad de Sao Paulo, Brazil. Attila L. Rodrigues y Mário J. de Oliveira.
- Ciencias Computacionales, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México. Juan Manuel González Calleros.
- Departamento de Mecánica - Facultad de Ingeniería - UNNE. Chaco, Argentina. Gustavo A. Enciso.

5. Objetivos

Objetivo General:

Generar un ambiente de simulación donde sea verificable el planteamiento matemático de un modelo de tráfico vehicular, y donde pueda ejercerse un control sobre el mismo, para buscar una solución óptima para los tiempos de los semáforos.

Objetivos Específicos:

- Aproximar los principales elementos del sistema de tráfico, buscando una función que exprese el tiempo de los carros en las calles según sus variables.
- Encontrar o formular reglas empíricas que indiquen el comportamiento óptimo del tráfico en un área urbana según sus parámetros; como la densidad poblacional, la capacidad vial, la densidad de tráfico, el tipo de tráfico, el tipo de zona urbana, el número de cruces existentes, entre otros.



- Mostrar en el ambiente simulado, que la mala movilidad en la ciudad se debe en parte a la indisciplina en el tráfico, y a las malas costumbres que tienen los ciudadanos al manejar.
- Demostrar que el manejo de los semáforos (tanto vehiculares como peatonales) es deficiente, y la importancia que tiene medir el tráfico que éstos acumulan.
- Crear un simulador de tráfico genérico, que pueda usarse en cualquier ciudad y cualquier sector, por medio de bloques básicos que describan cualquier situación, puedan ser parametrizados y sólo deban ser conectados desde simulink.
- Simular el sistema de semáforos del poblado (entre calles 10 y 12 sur y la avenida Las Vegas y la transversal Inferior) mostrando flujos, tráfico, tiempos y demás variables que sean necesarias para el análisis y la búsqueda del mejor funcionamiento del sistema, es decir, para reducir el tiempo de los carros en la calles.
- Dar solución a los tiempos óptimos de los semáforos por medio de un control difuso por capas. Es decir, varios controles superpuestos con grados de jerarquía, que operen desde cada cruce, luego una avenida o ruta principal, hasta el sistema completo.
- Mostrar la capacidad del control difuso para aplicar el conocimiento adquirido por la observación del tráfico. Especialmente para proteger las intersecciones y evitar la propagación del taco.
- Encontrar cuáles variables del tráfico pueden ser simuladas estadísticamente, y cuáles deben ser medidas. Es decir, cuáles poseen poca varianza y son útiles en el simulador dado su comportamiento estocástico.
- Plantear y resolver el problema de la sincronización de semáforos según estadísticas de almacenamiento.

6. Justificación y Beneficios

De la industria automotriz, bien es sabido que posee un crecimiento aceleradísimo, y el aumento del parque automotriz



no es una excepción en nuestra ciudad, y en general en cualquier ciudad mediana o grande en el mundo que use como medio de transporte el automóvil. El problema del tráfico vehicular, claramente nos ha tocado de cerca, y aunque muchos podrían pensar que siendo sólo alrededor del 13% de nuestra población la que tiene carro particular, no es un problema grave; hay que advertir que los embotellamientos además afectan a quienes se movilizan en transporte público, y en general, entorpecen el buen funcionamiento de la ciudad, y de las actividades cotidianas de la gran mayoría de los ciudadanos. Además, un mal sistema de transporte, representa tendencia a tener una ciudad más contaminada, más desordenada y en general, con menos calidad de vida.

También se tiende a creer, (para mi erróneamente) que el tráfico es un problema incontrolable, que es simplemente el resultado del crecimiento de la ciudad más no de sus vías, y que sólo es tratable cuando existe presupuesto para construir proyectos viales de gran infraestructura.

Aunque intuitivamente, debemos aceptar que eso no es del todo falso, mi intención con este trabajo, es demostrar que hay mucho por hacer, y que la ingeniería puede aportar enormemente a resolver problemas de movilidad en cualquier ciudad. Este es ciertamente un problema de ingeniería, siempre que el planteo y la solución que propongo, involucra diferentes conocimientos que un ingeniero electrónico debe o puede poseer; como son, estadística, programación, modelado de sistemas, control difuso, entre otros.

Una vez presente los resultados, se obtendrán beneficios de diferentes tipos. Se dejarán unas bases teóricas para la planificación urbana, o el cálculo del tráfico de un sector vial. Además haré indicaciones sobre el uso correcto de los semáforos, y la forma de manejar en las vías. También mostraré, los beneficios que puede entregar a la ciudad, en cuestiones



ambientales, de movilidad y de planeación. Habrá entonces gran cantidad de beneficios sociales en mi trabajo. Por otro lado, el simulador dejará abiertas posibilidades para la evaluación del tráfico vehicular, e impulsará la búsqueda de mejores tecnologías para poner lo simulado en la realidad. Finalmente, como beneficio personal, si logro mostrar mi trabajo como útil para la ciudad ante la secretaría de tránsito (el cual, es un objetivo personal más no del trabajo), tendría un conocimiento útil aplicable en cualquier otra ciudad, y la posibilidad de ofrecer un servicio como ingeniero.

7. Alcances

El alcance real de proyecto, sería dejar unas bases teóricas acerca de cómo modelar el tráfico de forma sencilla, para controlar los semáforos sin entrar en detalles de modelos complejos, y poner en evidencia el mal funcionamiento del sistema vial a través de la capacidad y observación de las variables en el ambiente simulado, así como sus posibles soluciones de sincronización, y demás técnicas de control de conjuntos de semáforos. Después de allí, este proyecto, podría ser presentado a la secretaría de tránsito de Medellín para mostrar la necesidad de corregir el uso de las calles y los semáforos de nuestra ciudad. Incluso podría ser motivo de inspiración para que otras ciudades dentro o fuera del país lo implementen. Pero nuevamente advierto, que lo anterior es sólo una posibilidad de hasta dónde podría llegar, más no parte del trabajo.

7. Presupuesto y recursos necesarios

TABLA DE RECURSOS NECESARIOS	Participación (miles de pesos)				Implica desembolso	
	Estudiante	Servicios U.P.B.	Patrocinio	Donación	Si (Nuevo)	No (Existente)
Fotocopias y bibliografía	20				20	
Internet, llamadas y fax larga distancia	40				40	

TABLA DE RECURSOS NECESARIOS	Participación (miles de pesos)				Implica desembolso	
	Estudiante	Servicios U.P.B.	Patrocinio	Donación	Si (Nuevo)	No (Existente)
Recurso Presupuestado						
Transporte y estadía en otras ciudades	40				40	
Servicios de cómputo (30h @ 5k\$/h)	150				150	
Licencias <i>Software</i>	400				400	
Trabajo Estudiante/Asistente (620h @ 6.5k\$/h)				4030		4030
Trabajo Director (30h @ 40k\$/h Magister)				800		800
Imprevisibles (10%)	65			483	65	483
SUBTOTALES (Por columna)	715	0	0	5313	715	5313
TOTALES			6028			6028

9. Financiación

La totalidad de los gastos del proyecto correrá por cuenta de aportes personales.

10. Cronograma y Ocupación

Actividad/Mes	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Ocupación (horas)
1. Búsqueda bibliográfica								128
2. Toma de datos								48
3. Diseño del simulador.								156
4. Diseño del control								168
5. Redacción del trabajo de grado.								120
6. Revisión de los jurados.								--
Horas totales								620
	Número de integrantes		1	Horas por estudiante				620



ANEXO B.

Carta de aprobación del director.



ANEXO C.

Artículo publicable.

[Ver anexo haciendo clic acá](#)