

Evaluación de la eficiencia del programa de tránsito “cruces uno por uno”, en la ciudad de Orizaba, Veracruz, México, mediante microsimulación

M.C. Constantino Gerardo Moras Sánchez

*Instituto Tecnológico de Orizaba
Departamento de Ingeniería Industrial
Orizaba, Veracruz, México
t_moras@yahoo.com.mx*

M.C. Iris Ojeda Morales

*Universidad Popular de la Chontalpa
Departamento de Ingeniería Industrial
Cárdenas, Tabasco, México
iris_ojeda@yahoo.com.mx*

Resumen

Orizaba es la única ciudad del Estado de Veracruz donde se ha establecido el programa de “cruces uno por uno”, para el control del tráfico vehicular en cruces de calles. Éste generó gran controversia desde su implantación por tratarse de un programa nuevo dentro del estado.

Mediante la técnica de simulación y usando el software de simulación Promodel, considerando diferentes tasas de llegada a un sistema de cruces, se analizó la eficiencia del programa de “cruces uno por uno”, y dos programas de control de tráfico alternos: semáforos y calles con preferencia.

Introducción y relevancia

Se realizó un estudio detallado de las acciones que desempeña un conductor al transitar por las calles (tiempos de aceleración, frenado, tiempos de cruce y vuelta en las intersecciones de calles), las cuales fueron simuladas y validadas, por lo que afirmamos que los resultados obtenidos en este proyecto de investigación parecen ser representativos de la realidad.

Además, la relevancia social de esta investigación en Orizaba se hace patente pues se consideró en el estudio de simulación la repercusión económica para los conductores que operan sus vehículos, bajo los programas de tránsito estudiados. Los resultados obtenidos redundan en beneficio de cualquier ciudad del país, ya que pueden servir de referencia para que éstas tomen decisiones que mejoren la afluencia vehicular.

En base a los resultados obtenidos se establece que, para el control del tráfico vehicular, sin considerar el costo de operación del vehículo, el programa “cruces uno por uno” resulta óptimo para un volumen de tráfico bajo. A medida que el tráfico aumenta el programa de calles con preferencia es el recomendado; pero si el tráfico se incrementa considerablemente, el programa de semáforos es el más adecuado.

Definición del sistema “cruces uno por uno” a simular

Cuando un conductor llega a un cruce marcado como “uno por uno”, debe detenerse. Si llegó al cruce primero que el conductor de la calle perpendicular, tiene preferencia en el paso; si no fue así, debe ceder el paso y después avanzar. Si un conductor transita a lo largo de varios cruces “uno por uno”, debe detenerse en cada cruce, para observar si puede o no avanzar, que si bien hace su recorrido más seguro, le implica invertir tiempo en cada uno de ellos y por lo tanto a lo largo de toda su trayectoria.

Por lo anterior expuesto, resulta interesante y necesario hacer el análisis de la eficiencia de los tres programas de control de tráfico citados, considerando una trayectoria que incluya varios cruces “uno por uno”. Para tal efecto se consideró un sistema de seis cruces que se muestra en la figura 1. Note que el mencionado sistema consta de siete accesos de entrada: uno a una calle principal y seis accesos transversales a la misma.

En la figura 1 las flechas indican el sentido de circulación de las calles. Debe observarse que a lo largo de la calle principal el recorrido es en un sentido, así como en las calles secundarias. Esto permite que tenga coherencia el paso de los vehículos “uno por uno”.

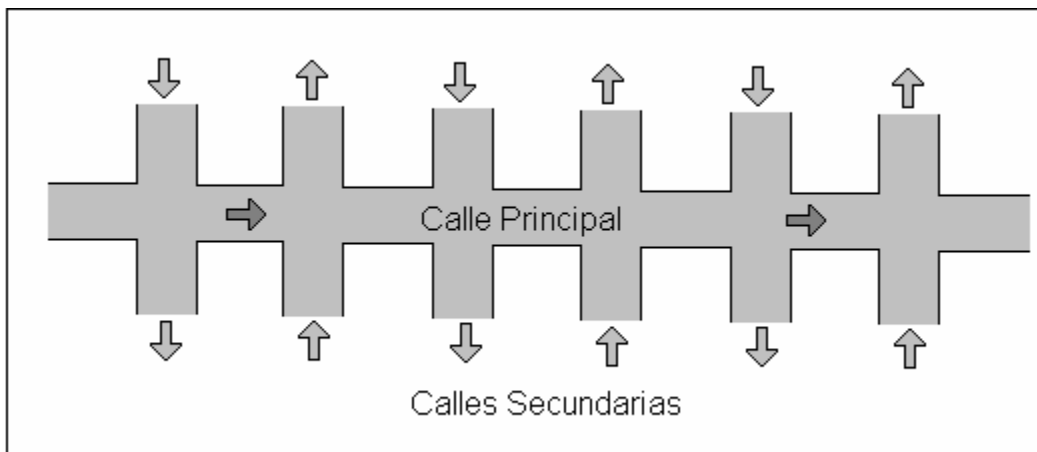


Figura 1. Sistema de cruces simulado.

Es necesario aclarar que el sistema de cruces mostrado anteriormente se empleó en una primera fase para evaluar el aspecto operacional de cada uno de los programas de control de tráfico estudiados, más no se trató de modelar una calle particular de la ciudad de Orizaba. En una segunda fase del estudio, se simuló el mismo sistema para los casos particulares de horas de tráfico vehicular normal y por separado en horas pico, con datos reales recolectados en Orizaba.

Descripción de las alternativas

Las características particulares de los programas alternos simulados de control de tráfico, además del “uno por uno”, son:

Semáforos. Se consideró que entre cruces, los semáforos están coordinados por medio de un sistema progresivo de “ondas verdes”, es decir, existe un desfase en el tiempo entre el encendido de los verdes de los semáforos (Cal y Mayor y Cárdenas 1994).

Calles con preferencia. Se supuso que la preferencia la tienen los conductores que transitan en la calle principal mostrada en la figura 1.

Medidas de desempeño

Las medidas de desempeño para evaluar la eficiencia del programa de “cruces uno por uno” en comparación con las alternativas de semáforos y calles con preferencia son:

- Tiempo promedio de permanencia de los vehículos en el sistema.
- Tiempo promedio de espera de los vehículos en el sistema.
- Costo total de operación por vehículo.

Recolección de datos

Hay un gran potencial de aplicaciones útiles de modelos de microsimulación para el análisis de problemas de tráfico complejos en áreas urbanas. La microsimulación es útil debido a que permite analizar la complejidad e incertidumbre involucrada en la operación de redes urbanas de tráfico (Akçelik y Besley, 2001).

El estudio de la aceleración y desaceleración asociados con los cambios de velocidad de los vehículos, son esenciales para el análisis de costos de operación, así como para el estudio de las demoras implicadas por las líneas de espera (Akçelik & Associates, 2002).

El modelar la aceleración y desaceleración de vehículos individuales es clave en relación a la precisión de los modelos de microsimulación. (Akçelik y Besley 2001).

Para el objetivo de esta investigación se recolectaron dos tipos de datos:

- 1) Tiempos entre llegadas de los vehículos a los cruces marcados como “uno por uno”.
- 2) Tiempos de movimiento de los vehículos, los cuales incluyen: aceleración, frenado, cruce y vuelta, al transitar por las calles.

Los tiempos en 1) fueron necesarios ya que la evaluación de los programas de control de tráfico en estudio debía hacerse considerando las diferentes tasas reales de llegada de los vehículos a los cruces marcados como “uno por uno” en la ciudad de Orizaba. La recolección de estos datos se realizó considerando los tiempos entre llegadas de los vehículos, en horas de tráfico normal y por separado en horas pico.

La recopilación de los datos, tanto en horas de tráfico vehicular normal como en horas pico, se hizo durante una semana, eligiendo las horas en el día mediante un muestreo aleatorio simple (Munich y Ángeles, 1988).

Respecto a los datos mencionados en 2), estos tiempos se recolectaron considerando diferentes secciones en las calles, definidas para construir modelos de microsimulación para modelar el movimiento de los vehículos a través del sistema de cruces estudiado. En la figura 2 se muestran las secciones definidas para simular los “cruces uno por uno” y semáforos. En la figura 3 se muestran las secciones definidas para simular calles con preferencia.

Se tomó el tiempo necesario para que los conductores de los vehículos recorrieran cada una de las secciones mostradas en las figuras 2 y 3.

Cabe mencionar que estos tiempos fueron incorporados en la construcción de todos los modelos de simulación de este estudio.

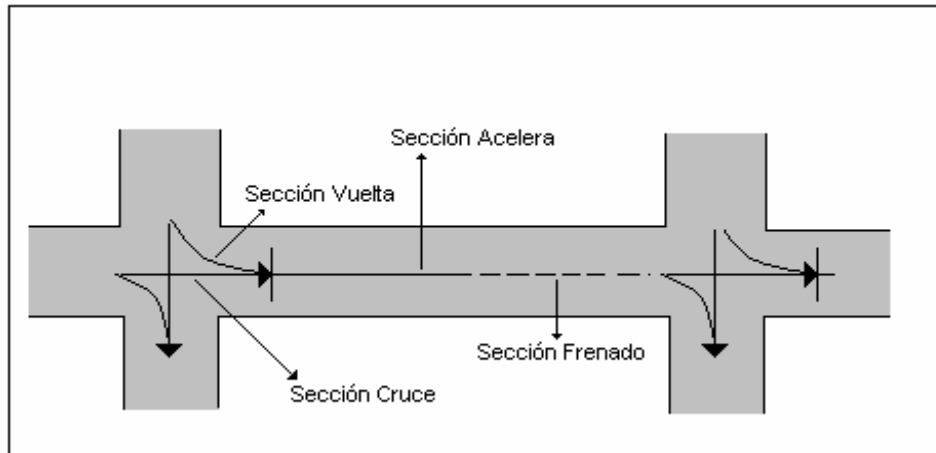


Figura 2. Identificación de las secciones para la toma de tiempos para el sistema de "Cruces uno por uno" y Semáforos.

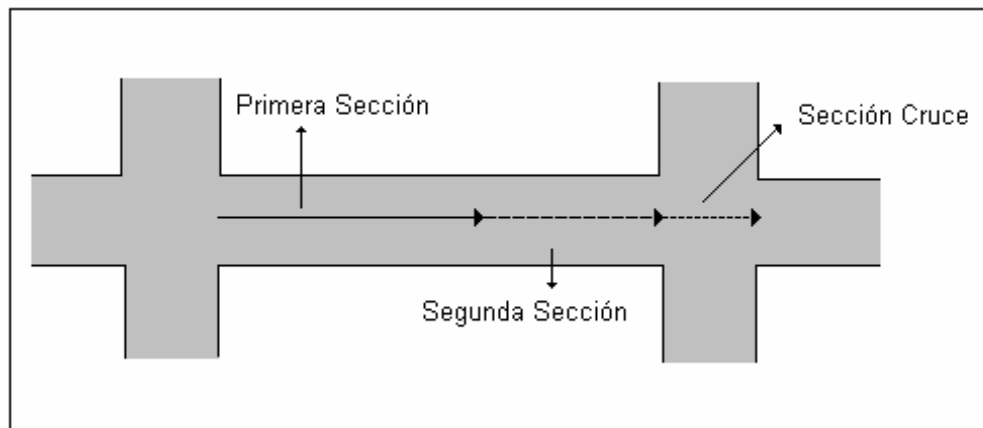


Figura 3. Identificación de las secciones en una calle con preferencia.

Análisis de los datos

Los datos reales recolectados se sometieron a las pruebas de bondad de ajuste (Walpole y Myers, 2000): a) Kolmogorov-Smirnov, b) Ji-cuadrada y c) Anderson-Darling, usando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, empleando el software Stat:fit. Se concluyó que ningún conjunto de datos se había ajustado a una distribución de probabilidad teórica conocida; por lo tanto, en los modelos de simulación se emplearon funciones empíricas de probabilidad, para todos los tiempos reales recolectados.

Construcción de los programas de computadora

Se construyeron tres modelos de simulación usando el programa ProModel, incorporando los datos reales observados y analizados:

1. Modelo de "cruces uno por uno".
2. Modelo de semáforos.
3. Modelo de calles con preferencia.

Validación de los programas de computadora

Para cada programa de control de tráfico simulado, se aplicó la prueba estadística t-apareada (Law y Kelton, 2000) para comparar los resultados obtenidos de la simulación con los datos reales y así validar los modelos de simulación. Las medidas de desempeño que se emplearon para validar cada modelo de simulación, se describen a continuación:

1. Cruces uno por uno: Tiempo promedio de movimiento en la sección "frenado".
2. Semáforos: Tiempo promedio de movimiento en la sección "frenado", cuando el semáforo indicaba la señal verde.
3. Calles con preferencia: Tiempo promedio de movimiento en la "segunda sección".

La conclusión fue que los tres modelos de simulación habían sido válidos.

Diseño de experimentos

Para determinar el número óptimo de corridas de los modelos de simulación, se empleó la fórmula (Law y Kelton, 2000):

$$n^*(\beta) = \min \left\{ i \geq n; t_{i-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{s_n^2}{i}} \leq \beta \right\}$$

donde:

n= número de corridas piloto.

i= número de corridas ($i > n$).

β = máximo error absoluto permitido.

s^2 = varianza.

t= valor de tablas de la distribución t-student.

$n^*(\beta)$ =número total de corridas requeridas en base a un error absoluto β .

Al aplicar la fórmula anterior, fijando un error β de 0.020 minutos, se obtuvo que el número óptimo de corridas fue de 12.

Corrida de los programas de computadora

Cada uno de los tres modelos de simulación se corrió 12 veces durante un periodo de 10 horas.

Análisis de resultados

Para evaluar la eficiencia de los programas de control de tráfico "cruces uno por uno", semáforos y calles con preferencia bajo diferentes tasas de llegada y hacer un análisis comparativo entre los mismos, se construyó como primera fase del estudio, un modelo llamado modelo básico. El modelo básico incluye los datos reales observados y analizados sobre aceleración, frenado, etc.; sin embargo, es importante señalar que este modelo no incluye datos que se hayan recolectado en cuanto a tasas de llegadas de vehículos a los cruces, debido a que se hizo un análisis de sensibilidad de los modelos de simulación construidos ("cruces uno por uno", semáforos y calles con preferencia), considerando diferentes tasas de llegadas de vehículos a los cruces, para hacer comparaciones en la eficiencia de los citados modelos de simulación.

Posteriormente, como una segunda fase del estudio haciendo algunas modificaciones al modelo básico, se dio lugar a otros dos modelos: uno considerando el tráfico vehicular en horario normal, y el otro en horario pico, ambos en Orizaba, incorporando en estos dos últimos modelos las tasas de llegadas reales, además de todos los otros datos reales.

Modelo básico

El modelo básico asume que la tasa de llegada de los vehículos por hora a cada uno de los siete accesos al sistema de cruces simulado (figura 1) es el mismo.

A continuación se muestran gráficamente algunas de las medidas de desempeño que se emplearon para evaluar la eficiencia de los programas de control de tráfico estudiados, al variar la tasa de llegadas en vehículos por hora.

En la figura 4 se muestra el tiempo promedio que los vehículos permanecen en el sistema, el cual incluye el tiempo desde que los vehículos llegan, se trasladan, esperan y salen del sistema.

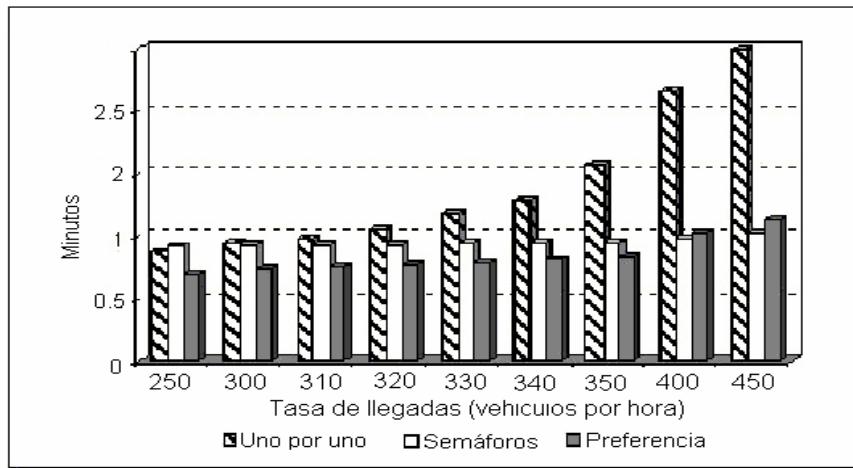


Figura 4. Tiempo promedio de permanencia en el sistema.

En la figura 5 se muestra el tiempo promedio de espera en el sistema. Este tiempo incluye el tiempo que los vehículos esperan en las colas, así como el tiempo que un conductor debe esperar a tener derecho de paso al llegar a un cruce.

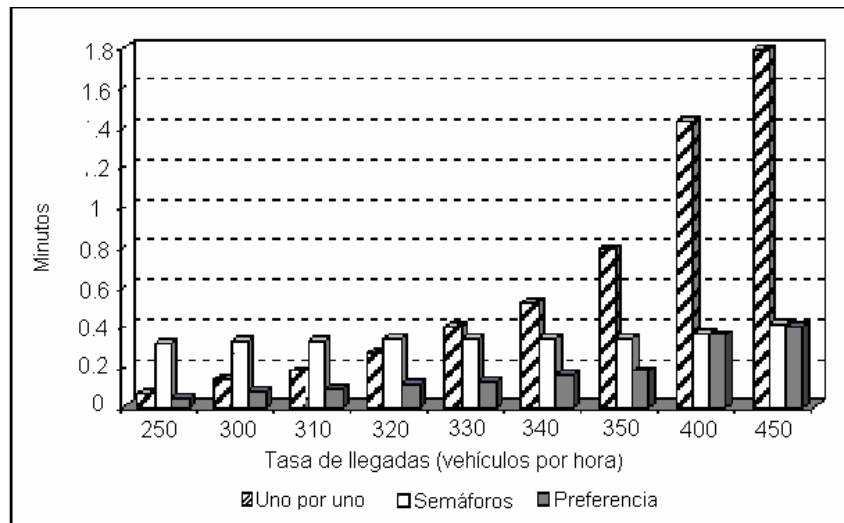


Figura 5. Tiempo promedio de espera en el sistema.

Cuando un vehículo transita en calles cuyos cruces están regulados por medio de los programas de control de tráfico estudiados, ejecutan acciones que inciden en el sistema mecánico del vehículo, dando lugar a los costos que se describen a continuación, información que fue proporcionada por un especialista en mecánica automotriz.

1. Costo por frenar. El frenado es una acción que genera una sucesión de movimientos en el sistema mecánico automotriz, que inciden finalmente en la presión de un conjunto de balatas que se desgastan cada vez que se realiza tal acción. Se consideró una estimación promedio del desgaste de balatas por vehículo, por cada ocasión que un conductor efectúa una acción de frenado.
2. Costo por arranque-aceleración. Para quitar el vehículo de su estado de reposo, se requiere del uso de energía que se genera del combustible que se suministra al motor del vehículo, por esta razón el costo de arranque-aceleración está directamente relacionado con el número de cilindros del motor. Se consideró una estimación para el costo por arranque-aceleración (por acción) por separado, para vehículos de 4, 6 y 8 cilindros.
3. Costo por motor funcionando-vehículo sin movimiento. Este costo se genera en forma directa en el consumo del combustible, en un vehículo cuyo motor está funcionando pero no hay avance efectivo en el recorrido. Para este caso, se consideró una estimación de consumo de gasolina en litros por hora, para la acción descrita, para vehículos de 4,6 y 8 cilindros.

Estos costos se consideraron en la construcción de los modelos de simulación, para cada programa de control de tráfico estudiado en este proyecto, con el objetivo de analizar la repercusión económica y social de estos programas de control de tráfico para los automovilistas.

En la figura 6 se presenta gráficamente el costo total de operación por vehículo en cada programa de control de tráfico, este costo es el resultado de la suma de los tres costos descritos anteriormente.

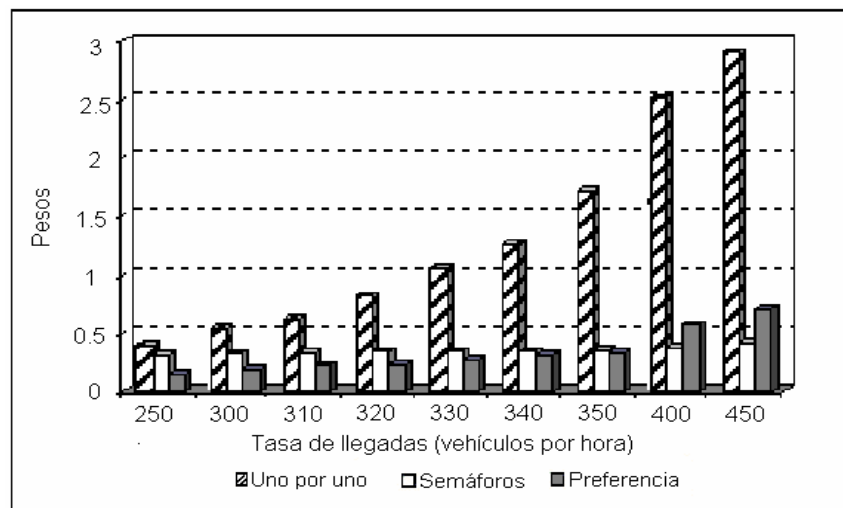


Figura 6. Costo total de operación por vehículo.

Variaciones al modelo básico

Una vez que el modelo básico se había simulado, y analizado sus resultados variando la tasa de llegadas de vehículos por hora al sistema, como segunda fase del estudio, se decidió construir dos modelos más de simulación, considerando los tres programas de control de tráfico vehicular: el primero en horas de tráfico normal y el segundo en horas pico, ambos en la ciudad de Orizaba, Ver, a partir de las tasas reales de llegadas de los vehículos en estos horarios, las cuales fueron previamente analizadas estadísticamente.

Caso 1: Tasas de llegada para horario normal (tráfico bajo).

Las llegadas a todos los accesos en los tres modelos de simulación construidos, están generadas por las siguientes funciones empíricas, construidas a partir de datos recolectados en la ciudad de Orizaba, Veracruz, donde F_1 corresponde a los vehículos de motor a gasolina y F_1' a los autobuses:

- F_1 y F_1' : Construidas a partir de los datos recolectados en horario normal sobre las avenidas en la dirección Poniente-Oriente en los accesos a los "cruces uno por uno".
- F_2 y F_2' : Construidas a partir de los datos recolectados en horario normal sobre las avenidas en la dirección Oriente-Poniente en los accesos a los "cruces uno por uno".
- F_3 y F_3' : Construidas a partir de los datos recolectados en horario normal sobre las avenidas en la dirección Norte-Sur en los accesos a los "cruces uno por uno".

Las llegadas a los cruces se programaron como se muestra en la figura 7. En promedio, el tráfico vehicular en horas de tráfico normal fue aproximadamente de 200 vehículos por hora.

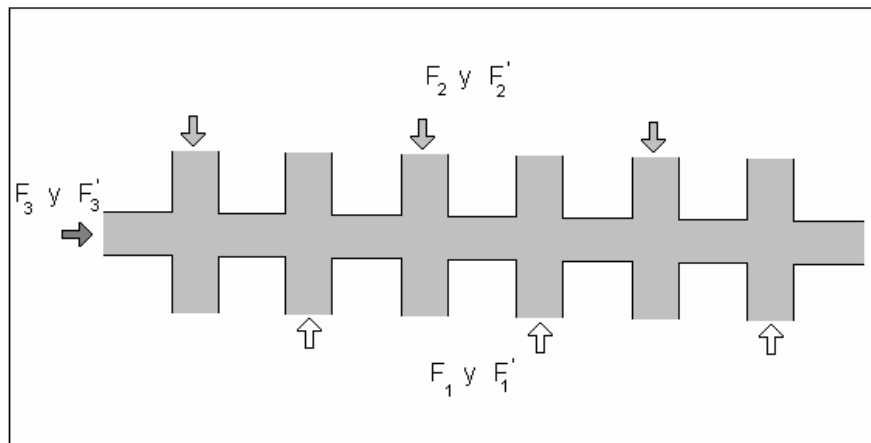


Figura 7. Caso 1: Programación de las llegadas al sistema de cruces simulado.

A continuación se presentan gráficamente algunas de las medidas de desempeño que se emplearon, para evaluar la eficiencia de los programas de control de tráfico estudiados, en el caso 1.

En la figura 8 se muestra de manera gráfica el tiempo de permanencia y espera en el sistema para estos tres programas. La repercusión económica que tienen los programas de control de tráfico en este caso, se muestra en la figura 9, donde se indica el costo total de operación por vehículo para las tasas de llegada en cuestión, al transitar el vehículo por el sistema simulado.

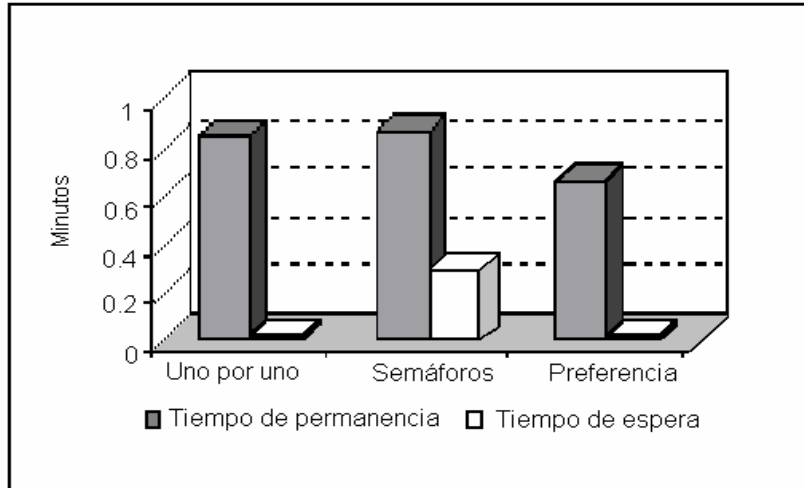


Figura 8. Caso 1: Tiempos promedio de espera y permanencia en el sistema, en horario normal.

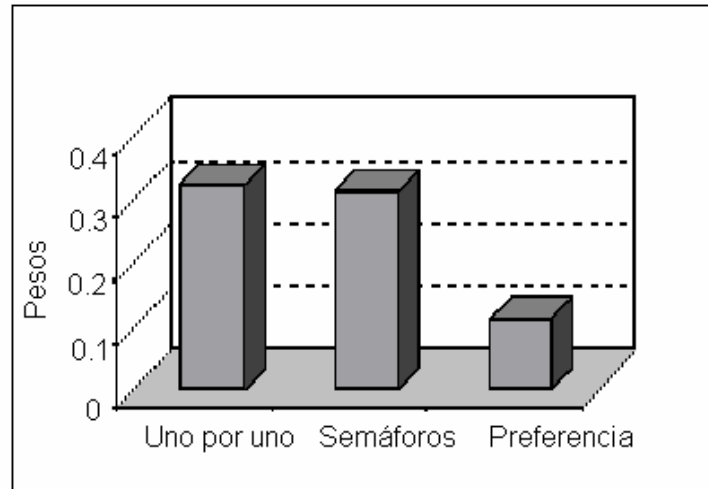


Figura 9. Caso 1: Costo total de operación por vehículo, en horario normal.

Caso 2: Tasas de llegada para horas pico (tráfico alto).

Este caso es análogo al caso 1, sólo que ahora las llegadas a los accesos a los sistemas simulados están generadas por las funciones empíricas construidas a partir de los datos reales recolectados en las horas de mayor afluencia vehicular, es decir, en las horas pico. En promedio, en este horario el tráfico vehicular fue aproximadamente de 410 vehículos por hora.

En la figura 10 se presentan gráficamente los tiempos promedio de permanencia y espera en el sistema, siendo éstas algunas de las medidas de desempeño que se emplearon para evaluar la eficiencia de los programas de control de tráfico estudiados.

En la figura 11 se muestra de manera gráfica el costo total de operación por vehículo para cada uno de los programas de control de tráfico mencionados, al transitar por el sistema simulado.

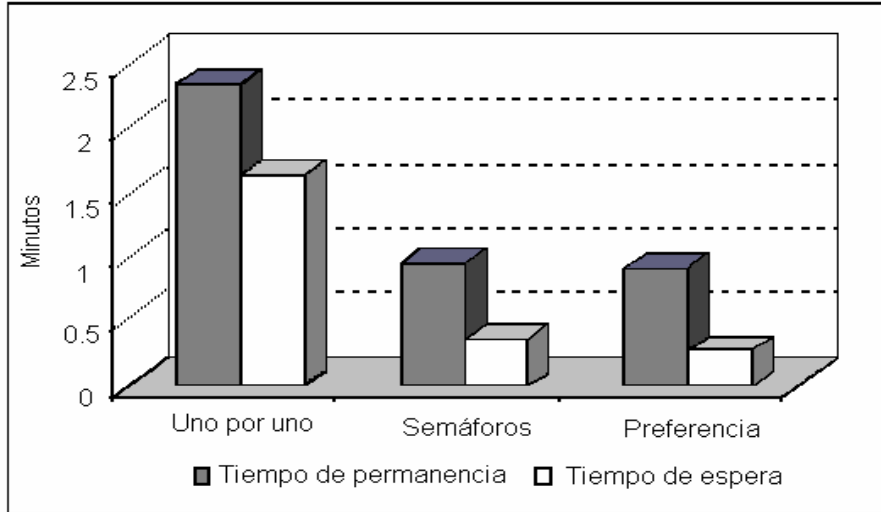


Figura 10. Caso 2: Tiempos promedio de permanencia y espera en el sistema, en horario pico.

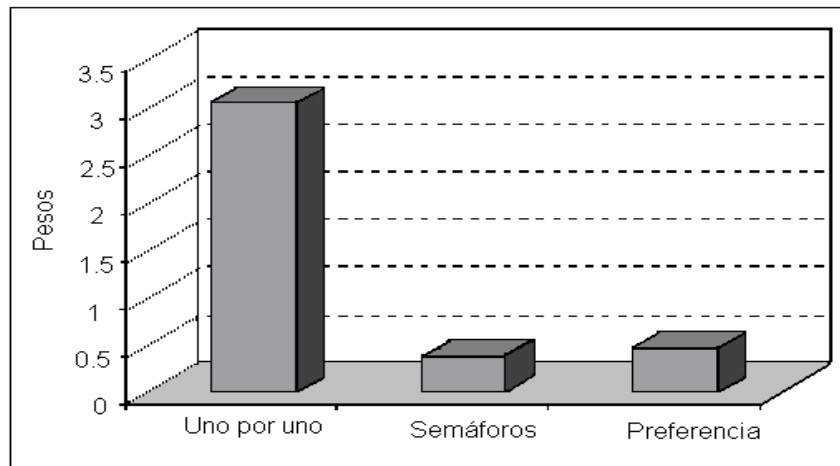


Figura 11. Costo total de operación por vehículo, en horario pico.

Conclusiones

En base a los resultados obtenidos al correr el modelo básico, se llega a las siguientes conclusiones. Considérense primero las figuras 4 y 5:

- Sin considerar el costo de operación del vehículo, en condiciones de bajo volumen de tráfico vehicular (menos de 300 vehículos por hora) resulta eficiente el programa de "cruces uno por uno", así como el de calles con preferencia.
- A partir de 330 vehículos por hora llegando a cada uno de los accesos al sistema de cruces simulado, resulta más eficiente el programa de semáforos que el de "cruces uno por uno", ya que tanto el tiempo promedio de permanencia en el sistema como el tiempo promedio de espera en el sistema son menores. Hay que notar que el programa de semáforos no es eficiente para bajo volumen de tráfico vehicular.
- El programa de tránsito de calles con preferencia supera al programa de "cruces uno por uno" y semáforos para un tráfico vehicular bajo y medio. Sin embargo, para tasas de llegada mayores o iguales que 400 vehículos por hora, el programa de

semáforos es el sistema más eficiente, ya que a medida que el tráfico es intenso en todos los accesos de llegada, los vehículos en las calles transversales a la avenida principal que tiene preferencia, no tienen derecho de paso en el programa de calles con preferencia, por lo que tienen que esperar un tiempo considerable, afectando esto todas las medidas de desempeño estudiadas.

Observando la figura 6, se concluye que considerando el costo de operación por vehículo, el programa de "cruces uno por uno" no es eficiente, aumentando su ineficiencia a medida que la tasa de llegadas de vehículos se incrementa.

Por otro lado, al analizar los casos 1 y 2, considerando las tasas de llegada reales de vehículos a los "cruces uno por uno" en la ciudad de Orizaba, Ver., se concluye que (figuras 8, 9, 10, 11):

- En horario normal (caso 1), el programa de "cruces uno por uno" resulta eficiente comparándolo con semáforos, si no se considera el costo total de operación del vehículo (ver figura 8); sin embargo, cuando éste se considera, el programa de semáforos es más eficiente que el de "cruces uno por uno" (figura 9). En ambos casos, el programa de calles con preferencia es eficiente.
- En horas pico (caso 2), el programa de "cruces uno por uno" no es eficiente para el control del tráfico vehicular, considerando o no el costo total de operación del vehículo (figuras 10 y 11). El programa de calles con preferencia es eficiente, sin embargo el que resulta más eficiente al considerar la tasa de llegadas en horas pico, es un programa de semáforos coordinados por medio de un desfaseamiento de ondas verdes, ya que reduce los costos totales de operación por vehículo (figura 11).

Referencias bibliográficas

Akçelik & Associates., *aaSIDRA User Guide*. Akçelik & Associates Pty Ltd, Melbourne, Australia, 2002.

Akçelik, R. y Besley M., *Microsimulation and analytical methods for modelling urban traffic*. Conferencia presentada en *Conference of Advance Modeling Techniques and Quality of Service in Highway Capacity Analysis*. Truckee, California, USA, Julio 2001.

Cal y Mayor, R. y Cárdenas, J., *Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y Aplicaciones*, Editorial Alfaomega, México, 1994.

Law, A.M. Law y Kelton, D.W., *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 3e, 2000.

Munich, L. y Ángeles, E., *Métodos y Técnicas de Investigación*, Editorial Trillas, México, 1988.

Walpole, R. E. y Myers, R., *Probabilidad y estadística para Ingenieros*, McGraw-Hill, México, 1986.