

Influencia del flujo vehicular en la determinación del tiempo óptimo de luz verde en dos semáforos en un cruce

Jaime A. Irahola Ferreira¹ & Diego A. Moreira¹

(1) *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*
irahola@arnet.com.ar

RESUMEN: Se estudia cómo influye el flujo vehicular en la determinación del tiempo óptimo de luz verde de los semáforos en un cruce de dos vías. La función objetivo es minimizar la longitud de cola, o equivalentemente, el tiempo promedio de espera en ambas colas simultáneamente. Se considera que el flujo en una vía es aproximadamente el doble que en la otra y ambas siguen una distribución exponencial. El tiempo que demora cada vehículo en atravesar la línea del semáforo cuando se da luz verde, se considera aleatorio en el intervalo (1,3). Se estudian 200 combinaciones de tiempos de luz verde para cada uno de los semáforos y se grafican los resultados de estas 40.000 simulaciones. Los gráficos tridimensionales que se realizaron permiten comprender mejor la evolución de la función objetivo, observar rápidamente la presencia de óptimos locales y determinar el óptimo global. Se muestra la solución óptima global en un gráfico y en una tabla, y se concluye que, debido al flujo vehicular diferente en cada vía, los valores del tiempo de luz verde de los semáforos difieren notablemente entre sí: en este caso 97%.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades tanto en su población como en su tráfico vehicular obligó a implementar medidas de control del tráfico. Una de ellas es el uso de semáforos para ordenar los cruces de vehículos y evitar serios problemas de congestión de tráfico. En función de ello, se creó el tiempo de los ciclos de los semáforos para reducir los accidentes y la longitud de las colas y/o el tiempo de espera promedio de los autos en los cruces. Según Gonzales (2003) cuando los semáforos son colocados en cruces independientes, es decir, el semáforo no tiene conexión con ningún otro semáforo, es necesario tener intervalos de tiempo pequeños entre 35 y 60 segundos. Aunque, es necesario usar ciclos más grandes cuando el flujo es grande, los tiempos no deben de rebasar los 120 segundos. Estos valores pueden variar según los parámetros del semáforo (Irahola, 2013) y llegar a sobrepasar el valor de 120 segundos. En este trabajo el ciclo en amarillo, no se considera parte del ciclo en verde como lo considera Gonzales (2003), sino, sirve para prevenir a los autos que deben frenar y evitar colisiones. Muchos han sido los estudios desarrollados para encontrar cuál es la distancia segura y el tiempo que debe durar el intervalo de color amarillo, para prevenir accidentes. El rango para el ciclo en amarillo debe ser de 3 a 5 segundos, esto depende de la velocidad máxima permitida y de la aceleración. (González, 2003).

Concordante con lo citado, se adopta en este trabajo el valor del tiempo de luz amarilla $T_a = 3$ segundos.

Por otra parte, en la bibliografía se acepta que el tiempo de reacción de un conductor a un evento inesperado es de 0.6 a 1.5 seg. También, se considera que el tiempo que toma a cada auto cruzar el semáforo es diferente al de los transportes pesados, los valores usados oscilan entre 1.6 y 2.5 segundos. Además, el tiempo que requieren los autos para dar vuelta varía, por lo que se usa un factor que es de 1.4 a 1.6 segundos para los que dan vuelta a la izquierda y de 1.0 a 1.4 segundos para los que dan vuelta a la derecha. (González, 2003). En función de lo citado, se ha modelado el tiempo de desplazamiento de cada vehículo en la cola.

Según Haberman, (1998), el modelo de tráfico tradicional agrupa las variables velocidad, flujo y densidad donde la velocidad del tráfico corresponde a la velocidad de los vehículos. La densidad del tráfico está definida por el número de vehículos por unidad de longitud. El flujo de tráfico es un número de vehículos que pasan en un punto del camino por unidad de tiempo. En general, el rendimiento del sistema de caminos se da en términos del flujo a través del sistema.

Dentro el área urbana, el flujo de los vehículos depende de la correcta programación de los semáforos y una medida de la correcta calibración de sus parámetros es la longitud de cola que eventualmente podría formarse en frente de cada

Tabla 1. Mínimo global del tiempo promedio de espera en cola.

TV2\TV1	194	195	196	197	198	199	200
93	753,3	751,1	754,9	754,2	755,3	751,4	747,8
94	741,1	747,7	745,2	736,0	740,1	731,2	734,5
95	723,5	723,0	730,6	727,8	722,7	721,1	714,6
96	712,3	711,4	715,5	712,5	706,0	703,1	707,0
97	705,9	699,4	704,4	698,7	694,1	690,2	692,0
98	686,0	689,4	696,0	682,6	682,2	682,7	687,0
99	676,3	676,8	680,6	668,0	675,3	681,0	685,6
100	662,4	659,4	660,5	656,5	661,5	672,7	681,4
101	663,5	665,9	663,7	661,3	660,5	665,9	667,8
102	671,7	667,8	668,5	663,3	661,0	663,3	658,2
103	676,1	673,4	673,7	667,0	666,9	666,6	664,2
104	679,0	678,5	675,8	672,5	669,1	672,0	666,9
105	684,7	681,4	680,0	675,8	674,0	674,0	669,4
106	687,9	683,8	682,8	679,1	677,7	676,1	673,0
107	689,4	685,9	687,8	682,1	678,8	679,7	674,4

semáforo y/o el tiempo promedio de espera de los vehículos en cola. Por lo tanto, se debería elegir los parámetros del semáforo: tiempo de luz verde (TV), Tiempo de luz en amarillo (Ta) de manera de satisfacer el mejor rendimiento, Es decir lograr el menor tiempo de espera promedio en cola (o menor longitud de cola)

El sistema puede ser descrito como un sistema dinámico discreto aleatorio. En con secuencia, no se puede aplicar ningún método analítico para la optimización de alguna variable del mismo. Por ello, en este trabajo se hará una optimización vía simulación, básica, para encontrar los valores óptimos de tiempo de luz verde de los semáforos. Si se analiza el sistema en estudio, se observa que, cada vehículo se comporta de manera diferente a otro. Cada uno de ellos, tiene tamaño, aceleración, velocidad y tiempo de reacción diferente a otro. También, cada vehículo cuando se encuentra en cola esperando luz verde estará en una determinada posición y dependerá del semáforo y de sus predecesores para atravesar o no la línea del semáforo. Estas variables, hacen que el problema sea difícil de modelar matemáticamente, con alta representatividad. En este trabajo, sea ha usado la versión 2.0 del simulador (propio) SISDDALC (simulador de sistemas dinámicos discretos aleatorios complejos). Éste permite, entre otras prestaciones, la simulación directa de semáforos y calles, en principio sin límite en su número.

Para la resolución del problema que se presenta en este trabajo, se usa el modelado microscópico: se modela como un problema de colas de vehiculos. Se considera distribuciones de llegada exponencial igual para ambas vías y se tiene en cuenta el tiempo de reacción aleatorio de cada vehículo que atraviesa el punto del semáforo en verde. Los resultados encontrados: tiempo medio y máximo de espera, longitud media y máxima de cola, longitud de cola actual, tiempo medio y máximo de permanecía en el sistema, permiten conocer el comportamiento del sistema y determinar el mejor tiempo de luz verde del semáforo de cada vía. A diferencia de otros trabajos (Irahola, 2011) en los que se busca el óptimo con gráficos paramétricos en dos dimensiones, aquí se mejora la búsqueda incrementando el número de puntos considerados y representando la superficie en un gráfico tridimensional que permite observar la forma de la superficie misma y entre los distintos puntos, los posibles óptimos locales. También cabe señalar que a diferencia de otros estudios, aquí los flujos de vehículos que debe comandar cada semáforo son diferentes. Un flujo es aproximadamente el doble del otro. En los resultados obtenidos se observa que los tiempos de luz verde TV1 y TV2 óptimos difieren notablemente entre sí. Por consiguiente, el óptimo local TV1=TV2 próximo al óptimo global (Irahola, 2009, 2011), propuesto como un

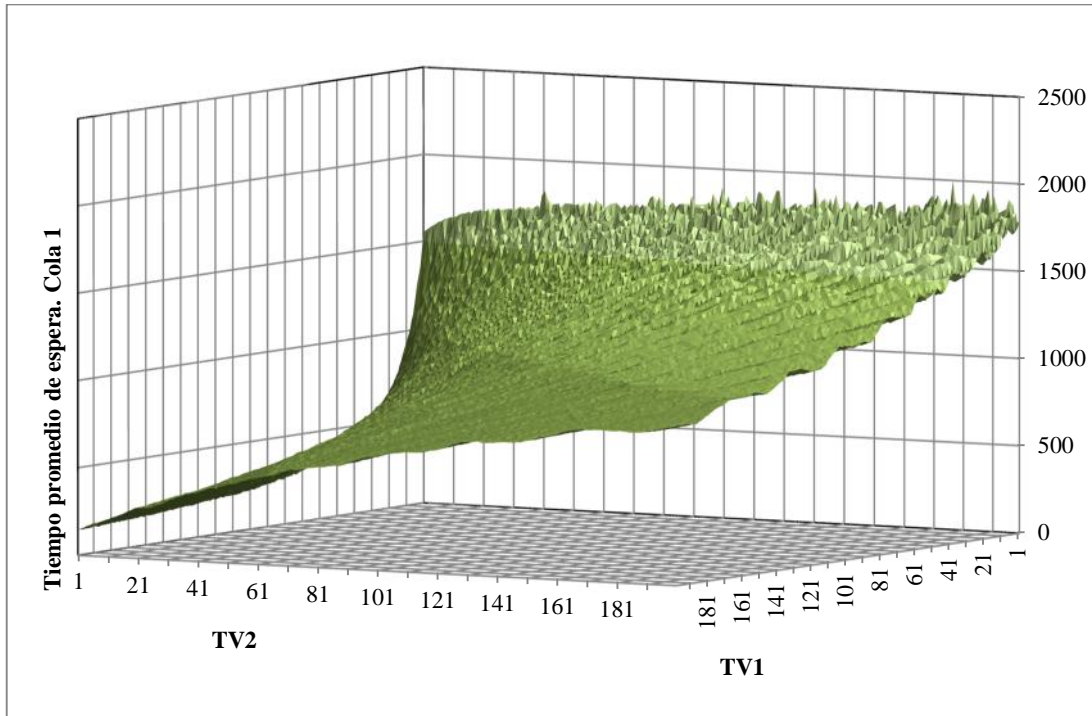


Figura 1. Tiempo promedio de espera en la cola 1.

heurístico no es válido en esta situación. En el punto óptimo, se ha encontrado una diferencia del 97% entre TV1 y TV2 (Tiempo de luz verde del

semáforo 1 y 2, respectivamente).

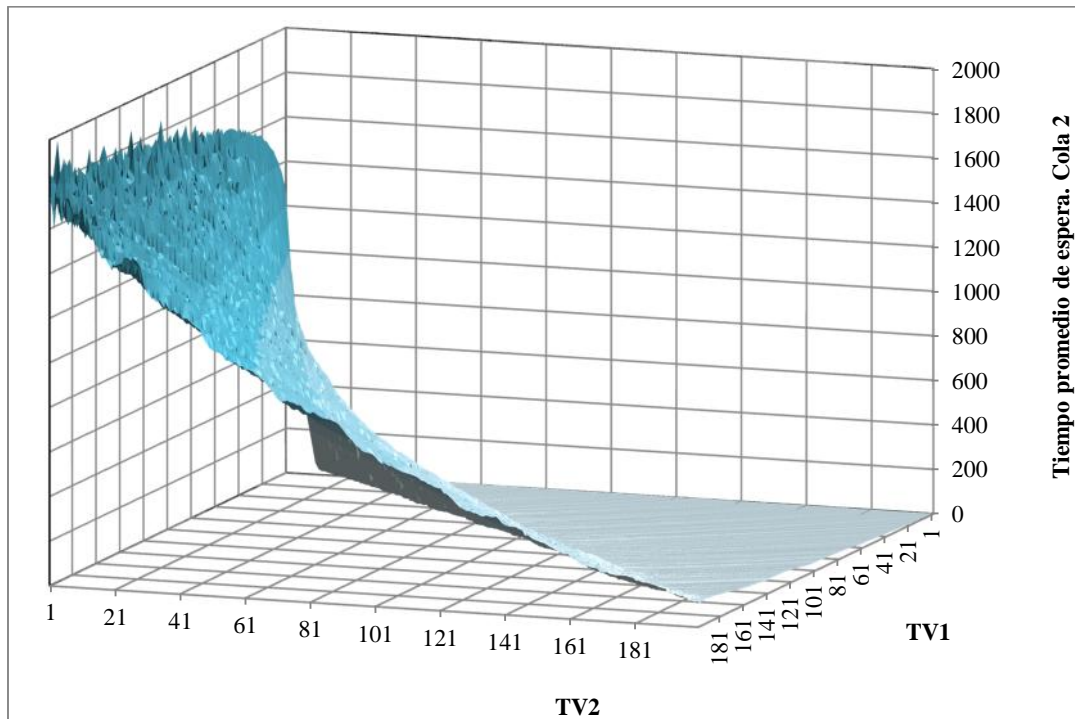


Figura 2. Tiempo promedio de espera en Cola 2.

2 PROBLEMA A RESOLVER.

Se desea calibrar óptimamente los parámetros de funcionamiento de 2 semáforos en un cruce. Determinar cuál debe ser el tiempo (TV) en que cada semáforo permanecerá en verde o en rojo, de manera que el tiempo promedio de espera en cola (Tpe) o la longitud de cola (Q) sea mínima en cada vía, simultáneamente. Se considera un cruce de calles de un sentido cada una. Cada vía posee su respectivo semáforo (S1 y S2). La demora entre el pasaje de rojo a verde en cada semáforo o tiempo en amarillo (Ta), funcionando ambos en forma coordinada es de 3 segundos. Las colas que se pueden formar en cada vía son ilimitadas, es decir, no existen semáforos anteriores. La llegada de vehículos por la vía 1 sigue una distribución Exp (2) y por la vía 2: Exp (4).

3 RESOLUCIÓN Y DISCUSION DEL PROBLEMA

3.1 Modelo

- Se consideran dos colas de longitud infinita,

una para cada vía comandada por un semáforo que actúa de manera coordinada con el otro. El tiempo que cada vehículo en la cola, demora en atravesar la línea del semáforo en verde, es el tiempo transcurrido debido a sus predecesores más el tiempo de desplazamiento comprendido entre 1 y 3 segundos que considera: el tiempo que demora el propio vehículo en atravesar la línea del semáforo y el tiempo de reacción luego que se da luz verde.

- El tiempo de desplazamiento considera de forma aleatoria que los vehículos se desplacen de forma diferente ya sea porque son diferentes: los vehículos, los conductores o combinaciones de ambas situaciones.

3.2 Búsqueda de la solución óptima

Se hicieron simulaciones considerando todas las combinaciones posibles entre TV1 y TV2 en un rango de cero a 200 segundos, sumando un total de 40.000 simulaciones. Luego de adecuar los resultados obtenidos, estos se tabularon (Tabla 1)

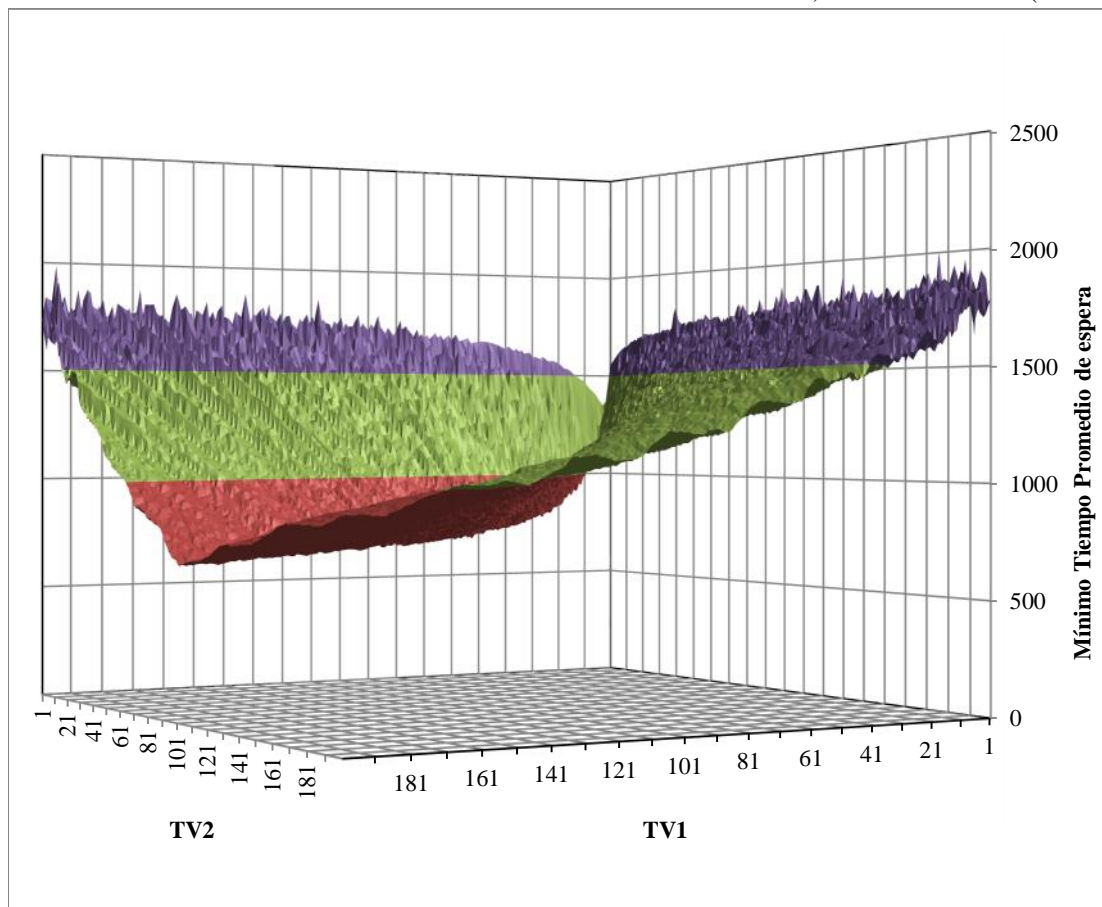


Figura 3. Mínimo Tiempo Promedio de Espera en ambas colas, simultáneamente.

y graficaron para cada par de combinaciones de TV1 y TV2 variando de a un segundo por vez, tal que, minimicen simultáneamente el tiempo promedio de espera en las dos colas.

La evolución del tiempo promedio de espera para la vía 1 (Fig. 1) difiere notablemente respecto a la vía 2 (Fig. 2). Estos resultados son correctos, puesto que las superficies no pueden ser iguales ya que los flujos en la vía 1 y 2 son diferentes. Por otra parte, los valores son lógicos. Por ejemplo, el menor tiempo de espera en la cola 1 se dará si TV2 es mínimo y TV1 máximo. Similar análisis se puede hacer para la cola 2. En la figura 3, se presenta la superficie de mínimos locales para todo el rango estudiado de 1 a 200 segundos de TV1 y TV2. No se observa una superficie lisa sino, una agrietada, con gran cantidad de picos y depresiones, producto de las variables aleatorias presentes en el modelo. Sin embargo, se puede hablar de cierta regularidad en la forma y en la convergencia a valores mínimos que se observan mejor en la figura 4, aunque en ésta no se ve claramente el punto óptimo global sino una tendencia debido a la perspectiva del gráfico. Sin embargo, el óptimo debería poder observarse desde una vista de frente desde el plano Tpe-TV2 y desde el plano Tpe-TV1. Y efectivamente, ello se observa en las figuras 5 y 6, respectivamente. Por lo tanto, en base a las figuras presentadas se

puede concluir que el óptimo global si existe se debe encontrar en la superficie de la figura 3 y no en fuera de ella. El valor exacto de la solución óptima global es $TV1^*=197$ seg., $TV2^*=100$ seg., $Tpe^*=656.5$ seg. (Tabla 1.). Si se comparan los valores de $TV1^*$ y $TV2^*$ se observa que $TV1^*$ es 97% más grande que $TV2^*$.

Por otra parte, sería interesante saber cuál sería la solución óptima global si se agrega la restricción $TV1^*=TV2^*$. En ese caso se obtiene como punto óptimo global: $TV1^*=TV2^*=194$ seg., $Tpe^*=879,6$ seg.

Si se comparan ambas soluciones se encuentra que en el caso que se restringe a la igualdad los valores de TV1 y TV2, el tiempo promedio de espera en cola es 34% más grande que la solución óptima global. Desde el punto de vista práctico, se pone de manifiesto el error que se cometería si sabiendo que el flujo vehicular es distinto en las dos vías, se calibra con el mismo valor de tiempo de luz verde ambos semáforos.

En los casos en que $Ta=3$ seg., (Irahola, 2011) como cuando $Ta=6$ seg. (Irahola, 2013) y considerando además, flujo vehicular idéntico por las dos vías del cruce, se encontró que el punto óptimo $TV1=TV2$ constituía una buena aproximación al verdadero óptimo global y podía usarse además, como un buen punto inicial. Cuando el flujo vehicular es distinto en las dos

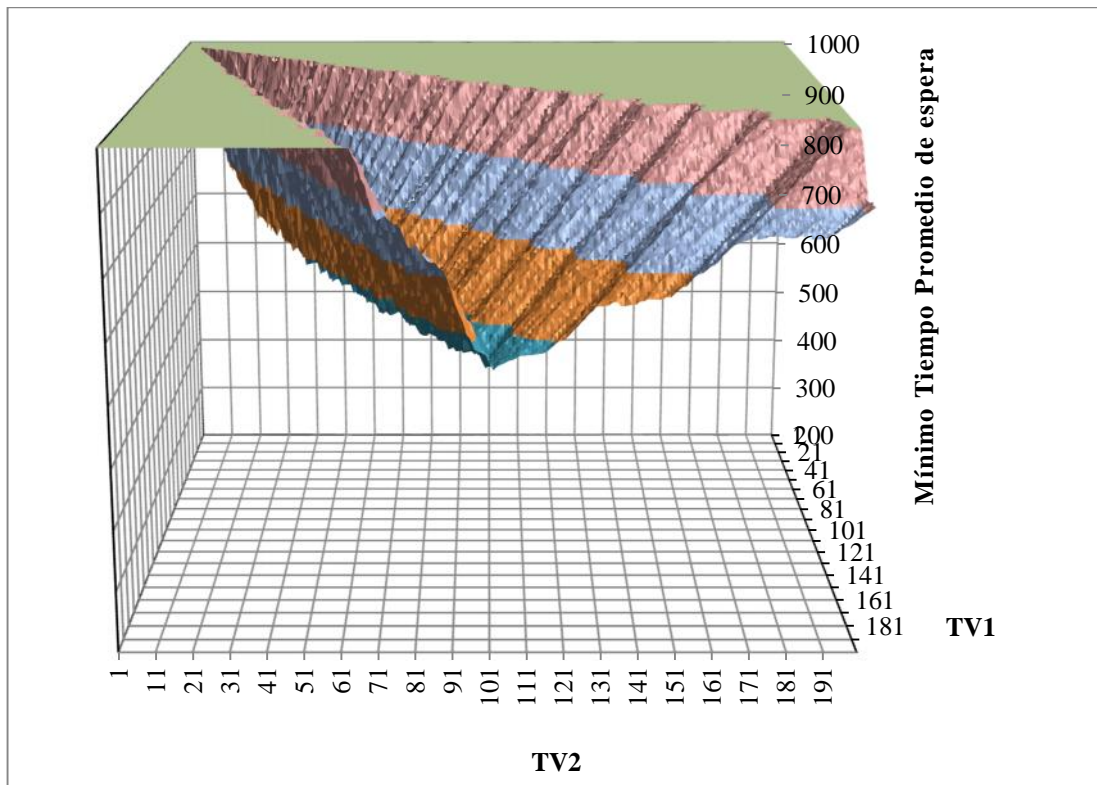


Figura 4. Mínimo Tiempo Promedio de Espera en ambas colas, simultáneamente. (Mayor detalle)

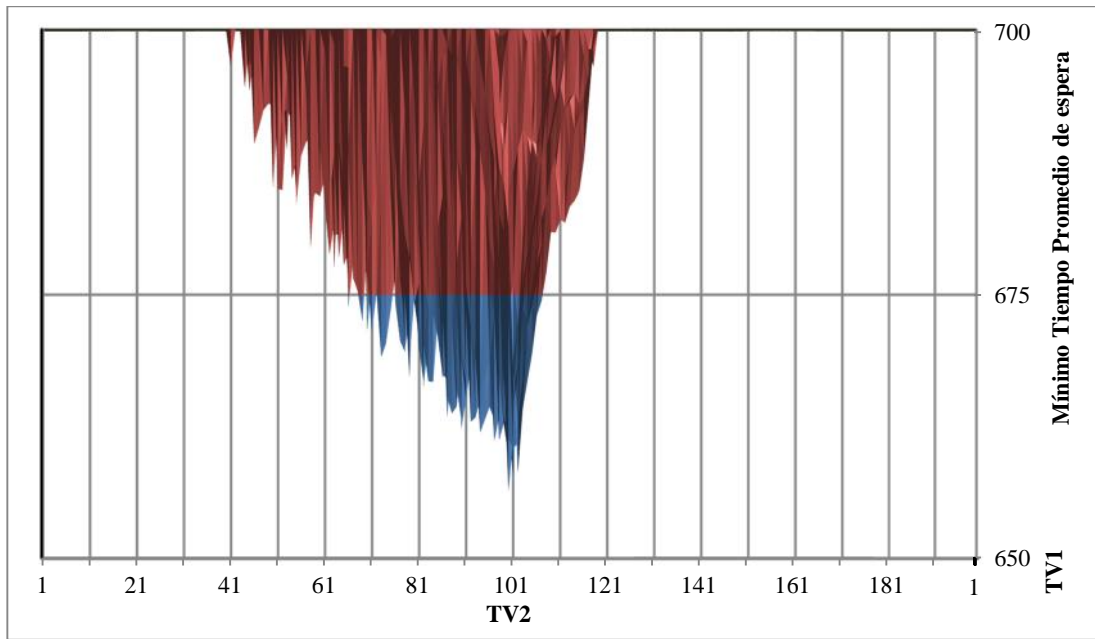


Figura 5. Mínimo Tiempo Promedio de Espera en ambas colas, simultáneamente. (Plano Tpe-TV2)

vías lo dicho anteriormente ya no se verifica. Por lo tanto, los flujos distintos tienen una fuerte injerencia en el valor del óptimo global. En esta ocasión, nuevamente se observa que el tiempo de luz verde óptimo, puede variar según el valor de los parámetros del problema de semáforos, así se puede ver en los valores reportados: 15, 90 seg., (Irahola, 2011), 120 seg., (Gonzales, 2003), (147, 156) (Irahola, 2013) y

(100, 197 seg.) en este trabajo.

4 CONCLUSIONES

Se ha encontrado que el flujo vehicular diferente para cada vía influye en el valor del punto óptimo global. El efecto es tal, que el heurístico que dice que el punto óptimo estará cerca de $TV1=TV2$ no es válido cuando el flujo vehicular de la vía 1 es

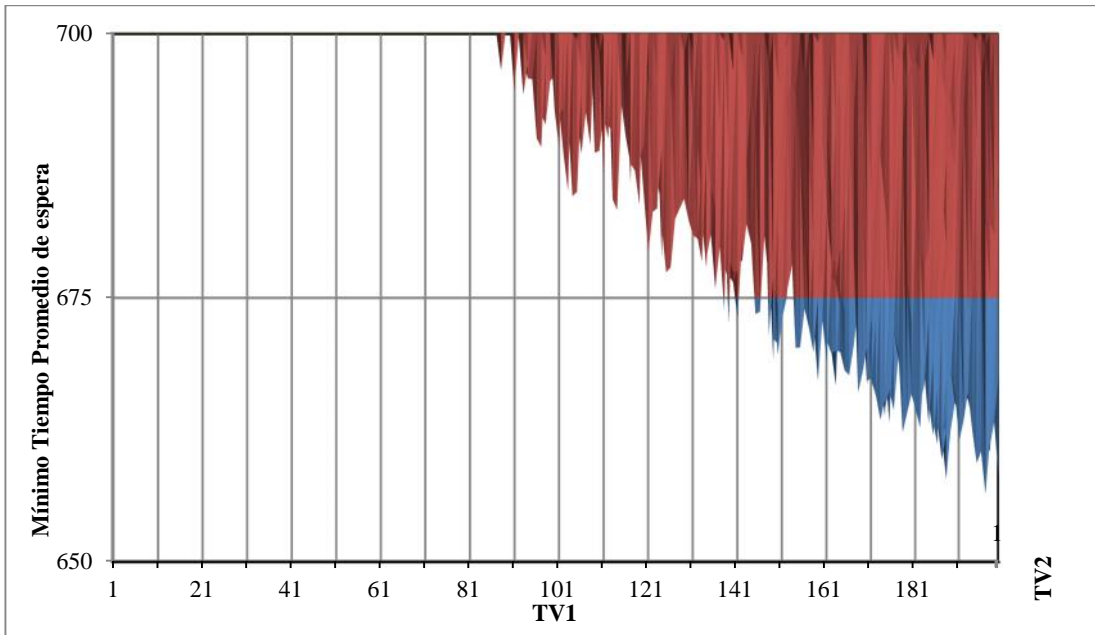


Figura 6. Mínimo Tiempo Promedio de Espera en ambas colas, simultáneamente. (Plano Tpe-TV1)

diferente al flujo de la vía 2, en un cruce con dos semáforos.

Por otra parte, cualesquiera sean los valores de tiempo en amarillo y de flujo vehicular, para el tipo de problema tratado, los óptimos locales se encuentran en una superficie y es posible encontrar un óptimo global.

5 REFERENCIAS

- Bender E. A., *An Introduction to Mathematical Modeling*, Dover Publications, Inc. Mineola New York, 2000.
- Chanca Cáceres, J. A. & J. A. Castellanos, Simulación microscópica de tráfico urbano y su Aplicación en un área de la ciudad de Zaragoza. *XXV Jornadas de Automática*. España. 2004.
- González Calleros, J. M. *Un modelo heurístico nuevo para el análisis del flujo vehicular*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la especialidad de Ciencias Computacionales en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Tonantzintla, Pue. Agosto 2003
- González Calleros, J. M., G. Rodríguez Gómez & J. Martínez Carballido. ¿Cómo mejorar el flujo vehicular por medio de La simulación? *XII Escuela Nacional de Optimización y Análisis Numérico*, Coahuila, México. Mayo 2003.
- Haberman R. "Mathematical Models. Mechanical Vibrations, Population Dynamics, Traffic Flow", *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM)*, 1998.
- Irahola Ferreira, J. A. & J. Velásquez. Determinación de los parámetros de funcionamiento de dos semáforos que comandan dos vías en un cruce. *V Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA*. Salta. Septiembre. 2009.
- Irahola Ferreira, J. A., D. A. Moreira. Optimización del tiempo de luz verde de dos semáforos que comandan dos vías en un cruce. *VII Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA*. Catamarca. Octubre. 2011.
- Irahola Ferreira, J. A., D. A. Moreira. Optimización vía simulación del tiempo de luz verde de dos semáforos en dos vías en un cruce *IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA*. Santiago del Estero. Octubre 2013.