

# Optimización vía simulación del tiempo de luz verde de dos semáforos en dos vías en un cruce.

Jaime A. Irahola Ferreira<sup>1</sup> & Diego A. Moreira<sup>1</sup>

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

**RESUMEN:** Se optimiza vía simulación dinámica estocástica, el tiempo de permanencia en verde de cada uno de los dos semáforos de un cruce de dos vías de un solo sentido cada una, de manera que, el tiempo promedio de espera en las dos colas sea mínimo, simultáneamente. Tanto el tiempo que demora cada vehículo en atravesar la línea del semáforo como el tiempo inter-arribo, se consideran variables aleatorias. Para resolver el problema se usa el simulador de sistemas dinámicos discretos aleatorios complejos (SISDDALC 2.0). Se considera que el flujo de vehículos por la vía 1 es igual al de la vía 2 y su frecuencia de llegada sigue 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 estudia el intervalo (1, 200 seg.) de tiempo de luz verde para cada semáforo. Se grafican los resultados de 40.000 simulaciones y se determina el óptimo. En lugar de gráficos paramétricos, se hacen gráficos tridimensionales para comprender mejor la evolución de la función objetivo. Se encontró que el tiempo óptimo de luz verde no es igual para ambas colas, se observa una diferencia del 6%.

## 1 INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de los serios problemas de congestión de tráfico en las ciudades, se empezaron a desarrollar, en los años sesenta, los primeros sistemas para el control centralizado de los cruces regulados con semáforos.

Dentro de los ATMS (Sistemas Avanzados de Administración del Tráfico) están los sistemas avanzados de control de semáforos y obviamente, estos deben ser programados de acuerdo a una política previamente establecida, tal que el control sea óptimo, según algún objetivo prefijado.

En función de lo citado se creó el tiempo de los ciclos de los semáforos para reducir el tiempo de espera promedio de los autos en los cruces y los accidentes. 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, sin embargo, los tiempos no deben rebasar los 120 segundos. El ciclo en amarillo, sirve para prevenir a los autos que deben frenar. 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 (González, 2003), esto depende de la velocidad máxima permitida y de la

aceleración.

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)

Respecto a los datos citados precedentemente, se debe observar que no se reporta cual es el flujo vehicular que se ha considerado. Por otra parte, el ciclo en amarillo también es un factor que influye en la determinación del tiempo óptimo de luz verde que se debe adoptar.

Numerosos modelos (Irahola, 2011) han sido desarrollados para representar y estudiar el fenómeno aunque las hipótesis adoptadas por cada uno de ellos hace que su representatividad no sea la deseada. Al respecto, se puede citar lo afirmado por Bender (2000) “no es posible maximizar en forma simultánea generalidad, realismo y precisión”.

El modelo de tráfico tradicional agrupa las variables velocidad, flujo y densidad (Haberman, 1998), 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 fluido movimiento de los vehículos depende de la correcta programación de los semáforos. Por lo tanto surge la incógnita de cuál debe ser el tiempo en que permanecen en rojo, en amarillo y en verde. Esto, lógicamente, debería estudiarse para cada situación en particular. Las recetas de otras ciudades o de otros sectores, no garantizan el mejor flujo en otra área de aplicación, salvo que las condiciones sean idénticas.

Concordante con lo que afirmará Gonzales (2003): “Uno de los problemas que hay al desarrollar un modelo de flujo de tráfico es su complejidad”, se puede expresar que el modelado matemático de semáforos reales no es trivial. El sistema puede ser descrito como un sistema dinámico discreto aleatorio. Por lo tanto, sabido es que, principalmente, la presencia de variables discretas y aleatorias dificulta enormemente la optimización del sistema en cuestión.

Cada vehículo se comporta de manera diferente a otro. Tiene aceleración, velocidad y tiempo de reacción diferentes. 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. Si

se consideran las variables citadas, se encuentra que los simuladores de propósito general (Ezsim, (Khosnevis, 1994), Enterprise Dynamics, y otros.) no permiten un modelado directo y sencillo del problema. No poseen módulos que permitan modelar fácilmente cada una de las variables. En algunos casos se podrían programar subrutinas a tal efecto, pero esta operación requiere cierta especialización en el uso del simulador en cuestión (Irahola, 2009). Ello se ve reflejado también, en la opinión de Chanca, (2004) cuando cita: “Arena es un software de propósito general para el modelado y simulación de sistemas de eventos discretos. No obstante, algunos aspectos del software se podrían mejorar si los creadores hubiesen pensado en modelos de tráfico...”.

En este trabajo, sea ha usado la versión 2.0 del simulador (propio) SISDDALC (simulador de sistemas dinámicos discretos aleatorios complejos). Éste es de propósito general, no obstante permite 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. 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

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

TV2\TV1	154	155	156	157	158
144	561,7124927	565,7925585	564,4895998	569,3486005	573,9428634
145	557,5938188	558,8350449	554,389768	564,6504221	569,53864
146	549,3472102	552,0298545	557,4386193	559,5452628	558,4156465
147	556,8171776	548,195393	546,8977418	555,063572	560,3102544
148	556,1391392	555,3888141	550,8886575	553,3446826	554,3985018
149	560,9078789	558,7274495	555,1178846	552,1950217	558,0190977
150	567,1731778	560,9966513	561,1190174	557,4734706	550,7572564
151	568,9869784	564,5025924	565,0516115	558,7626905	555,2852228
152	575,2141291	572,62809	568,6482176	565,8025275	557,0289267
153	581,2944679	577,8765283	571,9389319	569,0195711	556,444021
154	585,7444887	577,8205494	576,8838947	567,9167159	561,8265766
155	588,6541453	577,4654682	576,9615873	568,1041739	565,9942598
156	591,7681688	584,9013244	579,4997594	563,6028707	563,8110746
157	593,2652874	580,0500608	577,3712448	567,9476734	561,8644798
158	592,8592384	581,3290174	580,5720397	571,0920929	566,5166891
159	592,1520163	581,0776195	579,6659803	576,2871568	573,5791393
160	589,7000709	583,6174893	582,5486217	576,4957883	577,3541902
161	592,9043542	590,3161505	588,3493606	585,5162308	575,4387352
162	598,6374893	597,3590942	593,7871548	589,032699	581,1156728
163	601,0902626	605,4085466	597,5799542	590,0022714	588,355374

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. A pesar que las condiciones para cada semáforo son idénticas, se ha encontrado que a medida que se incrementa el tiempo de luz verde ( $T_v$ ), los tiempos óptimos de cada semáforo difieren cada vez más entre sí. En el punto óptimo, se ha observa una diferencia del 6% entre  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$  (Tiempo de luz verde del semáforo 1 y 2, respectivamente).

## 2 PROBLEMA A RESOLVER.

Se desea determinar cuál debe ser el tiempo ( $T_v$ ) en que cada semáforo permanecerá en verde o en rojo, de manera que la longitud de cola ( $Q$ ) o el tiempo promedio de espera, sea mínimo 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 ( $T_a$ ), funcionando ambos en

forma coordinada es de 6 segundos. Las colas que se pueden formar en cada vía son ilimitadas, es decir, no existen semáforos anteriores. La llegada de vehículos por ambas vías está representada según una distribución Exp (3).

## 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 demora cada vehículo en la cola, 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 más 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 una combinación de ambos.

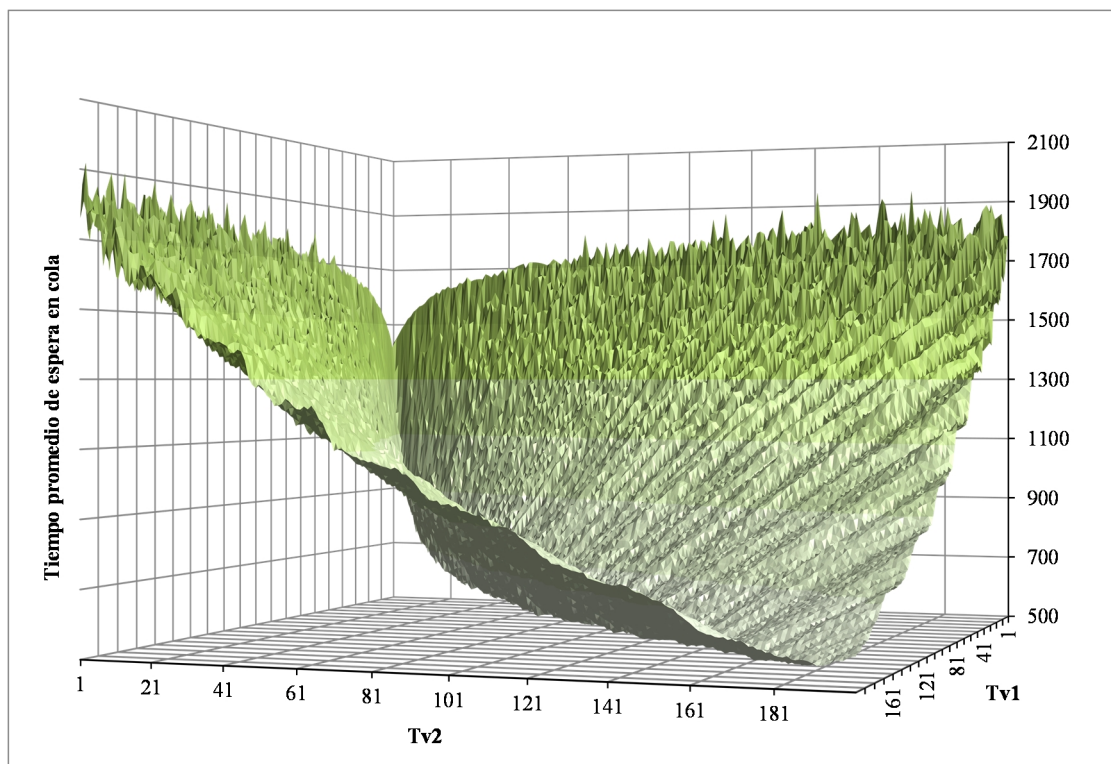


Figura 1. Mínimo tiempo promedio de espera en ambas colas simultáneamente.

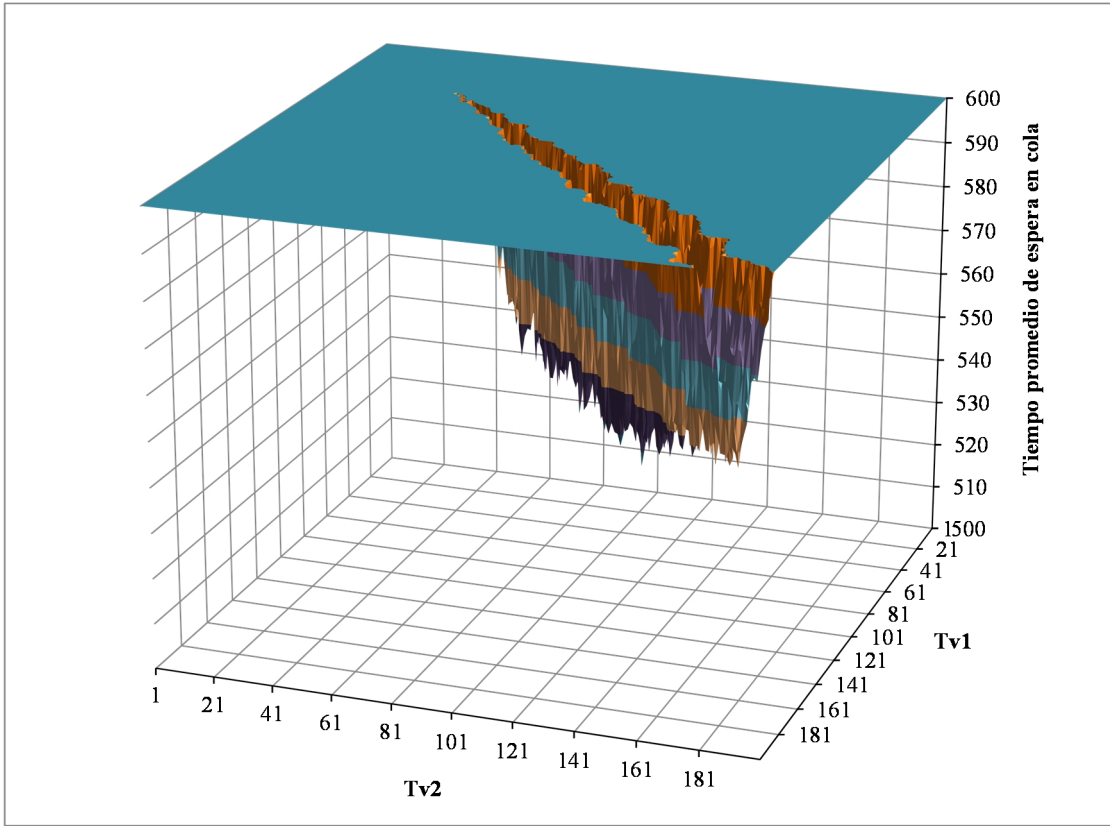


Figura 2. Mínimo tiempo promedio de espera en ambas colas simultáneamente en un rango de 500 a 600 seg.

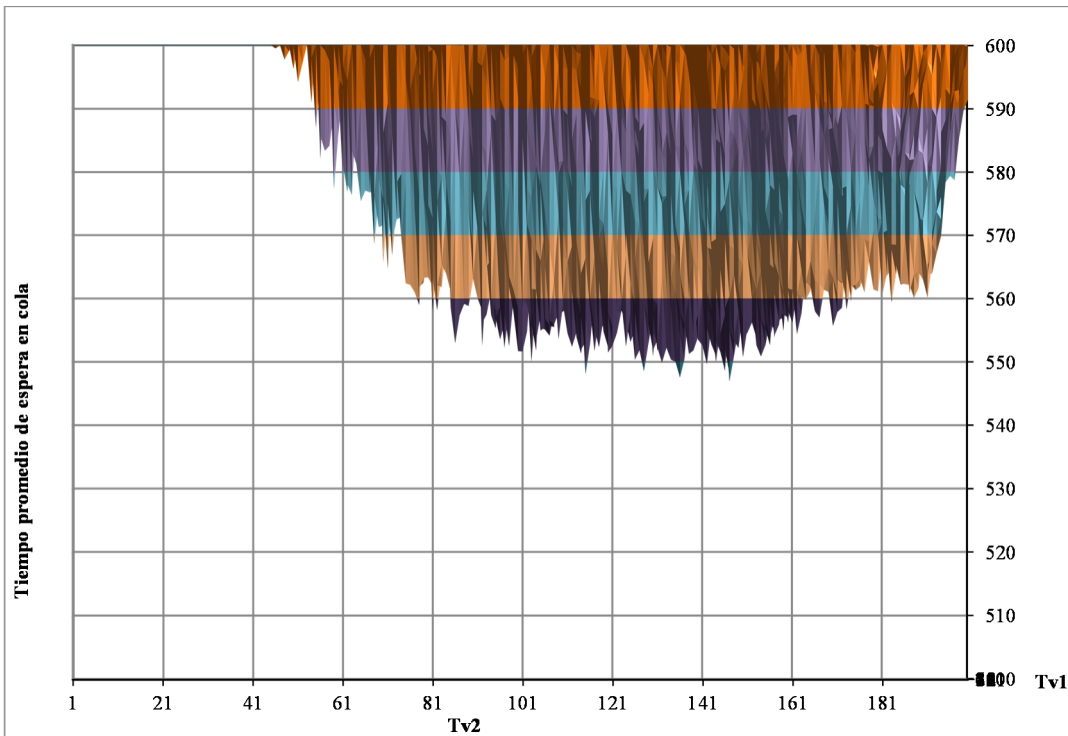


Figura 3. Perfil que muestra el óptimo global hallado

### 3.2 Búsqueda del tiempo promedio de espera mínimo en las dos colas simultáneamente

Se hicieron simulaciones considerando todas las combinaciones posibles entre  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$  en un rango de cero a 200 segundos, sumando un total de 40.000 simulaciones. Luego de operar los resultados obtenidos, estos se tabularon (Tabla 1) y graficaron para cada par de combinaciones de  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$  variando de a un segundo por vez, tal que, minimicen simultáneamente el tiempo promedio de espera en las dos colas.

En la figura 1, se observa la evolución del tiempo promedio de espera mínimo para cada valor de  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$ . En general, a pesar de las irregularidades locales propias del modelo, visualizadas como innumerables picos y depresiones, se observa claramente, una forma definida de la superficie, lo que permite determinar el punto óptimo global sin temor a incurrir en un error, debido a la presencia de óptimos locales en otros lugares del espacio analizado. En la figura 2, se observa en mayor detalle la forma de la superficie. En ella se puede apreciar mejor la

evolución hacia al óptimo global. Este punto también se puede observar en el gráfico de perfil presentado en la figura 3. Allí, se puede observar mejor aún, el valor de  $T_{v2}$  en el punto óptimo:  $T_{v2}=147$ . Analíticamente, según los resultados tabulados (Tabla 1) se halla que la solución óptima del problema corresponde a  $T_{v1}^*=156$  seg.,  $T_{v2}^*=147$  seg., Mínimo Tiempo promedio de espera en cola  $T_{pe}^*=546,89$ . Por la forma de la superficie se concluye que el óptimo es global. Si se compara los valores  $T_{v1}^*$  y  $T_{v2}^*$  se observa que estos difieren en un 6%.

Si se adoptase  $T_{v1}^*=T_{v2}^*=156$  seg., se halla  $T_{pe}=579,5$  o sea 5,96% mayor que  $T_{pe}^*$ . Por otra parte, si se fijase  $T_{v1}^*=T_{v2}^*=147$  seg., se halla  $T_{pe}=571,800$  que es 4.55% mayor que  $T_{pe}^*$ . Por lo tanto, en base el punto óptimo encontrado no se podría elegir un valor  $T_{v1}=T_{v2}$  salvo que se acepte un error entre 4.5 y 6 %.

En la figura 4, se muestra, en los cuadros negros, los valores óptimos para las distintas combinaciones de  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$ . Se puede observar que a medida que se acrecienta el valor de  $T_{vi}$  de los

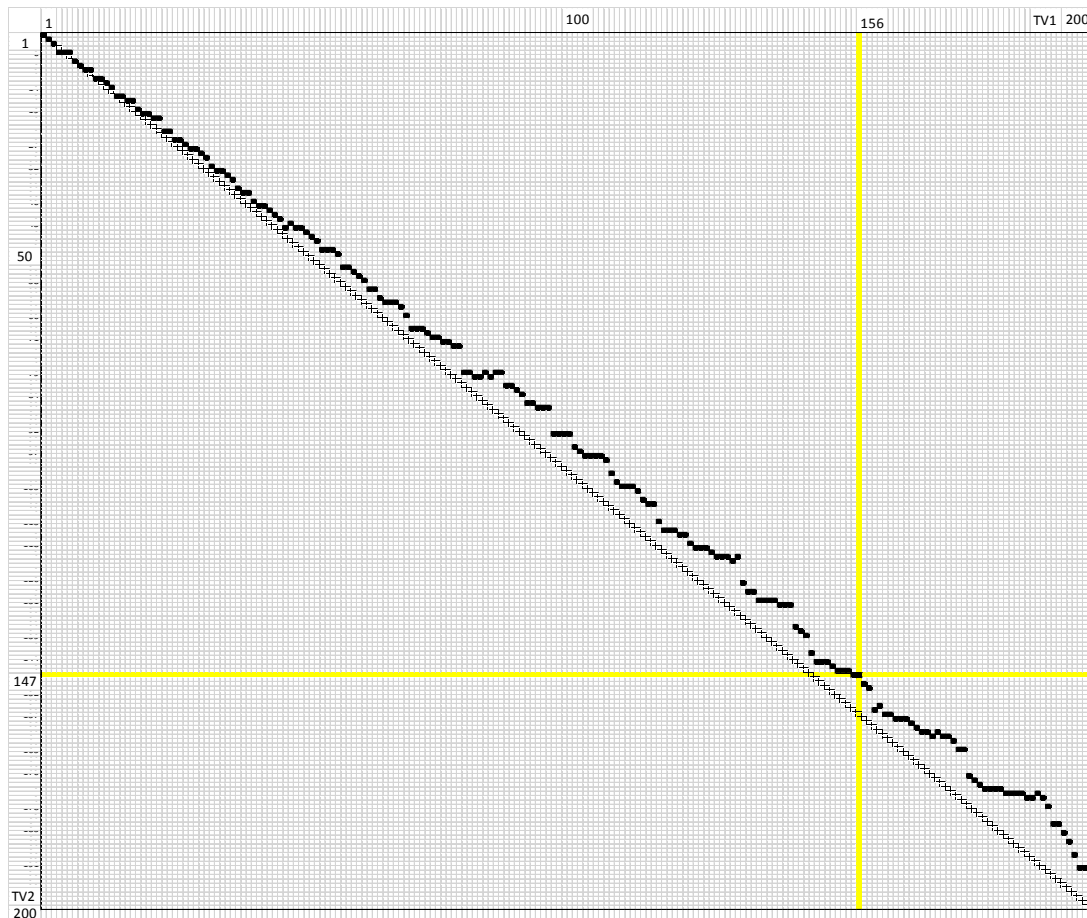


Figura 4. Pares de valores  $T_{v1}$ ,  $T_{v2}$  que minimizan el tiempo promedio de espera en cola (cuadros negros)

semáforos, los valores óptimos de  $Tv1$  y  $Tv2$  difieren entre si cada vez más.

En este punto, se puede argüir que no hay razón fundamentada para optar por los valores antes discutidos, sino que se debería optimizar considerando la restricción de que  $Tv1=Tv2$ . Efectivamente, esta observación es correcta. En ese caso, se encontró el punto óptimo local:  $Tv1=Tv2=144$  seg.,  $Tpe=566,424$  seg., el cual difiere del óptimo global un 3.6%.

Si bien es cierto el óptimo global no se da para valores iguales de tiempo de luz verde de los dos semáforos, esta opción podría ser un buen punto de referencia, ya que también se verifica la aproximación cuando el tiempo de luz amarilla es 3 seg (Irahola, 2011). Por otra parte, esta condición ( $Tv1=Tv2$ ) podría tomarse como un buen punto inicial para problemas similares ya que se ha corroborado para valores, prácticamente extremos de  $Ta$ : 3 y 6 segundos. Partir de este punto inicial, podría significar una disminución considerable de cálculos y tiempo de cómputo. Ya que por ejemplo, se podría hacer la búsqueda en una matriz de  $20 \times 20$  y no en una de  $200 \times 200$  como en este caso. Es decir, bajar de 40.000 a 400 simulaciones para problemas del mismo tipo. El tiempo de Luz verde óptimo, puede variar según el valor de los parámetros del problema de semáforos, como se puede ver en los valores reportados: 15, 90 seg., (Irahola, 2011), 120 seg., (Gonzales, 2003) y (147, 156) en este trabajo.

Dada la superficie de búsqueda hallada, se puede afirmar, que se ha encontrado una solución óptima global para el problema.

#### 4 CONCLUSIONES

Para el tipo de problema propuesto es posible encontrar una configuración óptima de los parámetros del semáforo. La solución óptima encontrada es global. En este punto, los valores de tiempo de luz verde de los dos semáforos no son iguales. La condición de tiempo de luz verde igual para ambos semáforos podría adoptarse como un buen punto inicial para la búsqueda del óptimo global. Esta consideración inicial podría bajar notablemente el gasto computacional. En el caso estudiado, aproximadamente, 100 veces.

#### 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., 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.
- Khosnevis B. *Discrete Systems Simulation*. McGraw Hill Internacional Editions. 1994