

REALIDAD Y REFLEXIÓN ES UNA PUBLICACIÓN PERIÓDICA DE CARÁCTER SEMESTRAL DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO GAVIDIA.
AÑO 23, N° 58, JULIO-DICIEMBRE 2023. SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA.

REALITY AND REFLECTION IS A BIENNIAL PERIODICAL PUBLICATION OF THE FRANCISCO GAVIDIA UNIVERSITY.
YEAR 23, N° 58, JULY-DECEMBER 2023. SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRAL AMERICA.

Optimización del flujo vehicular mediante el uso de algoritmos genéticos en un tramo de San Salvador

Optimization of vehicular flow through the use of genetic algorithms in a stretch of San Salvador

James Edward Humberstone Morales.

Ingeniería en Ciencias de la Computación, por la Universidad Francisco Gavidia, El Salvador.
Maestría en Informática Aplicada a Redes, por la Universidad Francisco Gavidia, El Salvador.
Docente de la Facultad de Ingeniería y Sistemas e Investigador del Centro de Modelaje Matemático «Carlos Castillo-Chávez»,
en el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI), en la Universidad Francisco Gavidia, El Salvador.
jhumberstone@ufg.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0001-6782-5347>

Franklin Iván Argueta Bermúdez.

Licenciado en Matemáticas, por la Universidad de El Salvador, El Salvador.
Investigador del Centro de Modelaje Matemático «Carlos Castillo-Chávez», en el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI),
en la Universidad Francisco Gavidia, El Salvador.
fargueta@ufg.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0001-9798-8120>

Fecha de recepción: 29 de agosto de 2023.
Fecha de aprobación: 14 de octubre de 2023.
DOI:



RESUMEN

La urbanización no planificada y el aumento de la población han incrementado los problemas de movilidad en la ciudad de San Salvador (El Salvador). Después del COVID-19, el parque vehicular en el área metropolitana se incrementó hasta un 150 % y con ello los problemas relacionados con la congestión vial. En la búsqueda de soluciones innovadoras para abordar los desafíos que conllevan estos problemas, los algoritmos genéticos surgen como una herramienta revolucionaria que permite explorar nuevas soluciones. En esta investigación se realizó una aplicación de algoritmos genéticos, junto a una simulación de un patrón de tráfico para un segmento de la red vial, a fin de encontrar la secuencia de estados óptima en cada semáforo en la red de estudio. Esto con el objetivo de optimizar el flujo vehicular y disminuir el tiempo de espera para transitar por las vías.

Palabras claves: algoritmos genéticos, simulación, flujo vehicular.

ABSTRACT

Unplanned urbanization and population growth have increased mobility problems in the city of San Salvador, El Salvador. After COVID-19, the number of vehicles in the metropolitan area increased up to 150 % and with it the problems related to road congestion. In the search for innovative solutions to address the challenges posed by these problems, genetic algorithms emerge as a revolutionary tool to explore new solutions. In this research we carried out an application of genetic algorithms together with a simulation of a traffic pattern for a segment of the road network to find the optimal sequence of states in each traffic light in the study network with the objective of optimizing the vehicular flow and decreasing the waiting time to transit through the roads.

Keywords: *genetic algorithms, simulation, vehicle flow.*

Introducción

La ciudad de San Salvador es la capital y el centro urbano más grande de El Salvador. Además, concentra una gran cantidad de centros de trabajo y de estudio, por lo que el congestionamiento vehicular es un problema recurrente. De hecho, el factor de utilización de las vías es tan alto que un obstáculo cualquiera genera un embotellamiento. Una investigación publicada en la revista *Disruptiva* encontró que una parada ilegal, ya sea de un vehículo particular o del transporte colectivo durante 14 segundos, es capaz de generar una cola de seis vehículos en un tramo de cien metros de calle (Luna *et al.*, 2022).

Según Martínez (2023) son dos millones de viajes los que se realizan al día en la capital; además, el autor explica que entre los tramos más congestionados se encuentra la 25 avenida sur, el bulevar de Los Héroes y el centro histórico de San Salvador. López (2023) informa que, debido al congestionamiento vehicular, la velocidad promedio a la que transitan los vehículos en el centro histórico de San Salvador y sus alrededores es de 15 Km/h; apenas un poco más de la velocidad promedio a la que se mueve a pie una persona.

En la búsqueda de soluciones innovadoras para abordar los desafíos del tráfico vehicular en la actualidad, los algoritmos genéticos (AG) surgen como una herramienta revolucionaria que permite explorar nuevas soluciones.

Inspirados en los principios de la evolución natural, los algoritmos genéticos son una técnica de búsqueda de soluciones óptimas (metaheurística) que simula el proceso de selección natural y reproducción, imitan la manera en que los seres vivos se adaptan a su entorno y evolucionan a lo largo del tiempo. Es por ello que ofrecen una perspectiva diferente para resolver problemas complejos y dinámicos. Aplicados al ámbito del congestionamiento vial, los algoritmos genéticos tienen el potencial de transformar la forma en que se gestiona y optimiza el flujo de vehículos en entornos urbanos, fortalecer la planificación del transporte público y la reducción de la huella de carbono.

Medina (2015) realizó una aplicación de algoritmos genéticos para minimizar el tiempo de demora en un corredor vial de Perú. En su investigación concluyó que el Índice de Rendimiento (IR) es menor aplicando el algoritmo genético propuesto que el logrado utilizando planes estáticos de tráfico. Aldás y Flores (2016) crearon un algoritmo genético sobre una matriz origen-destino de transporte para estimar el flujo vehicular de una red vial en la ciudad de Ambato (Ecuador); como resultado, observaron las rutas de mayor tráfico y el flujo vehicular en donde el transporte público produce congestión de vehículos, de manera que lograron predecir el tráfico y utilizar esta información para minimizarlo. Por su parte, Santisteban y Aldana (2017) aplicaron algoritmos genéticos para encontrar la ruta más eficiente entre dos lugares para apoyar el reordenamiento vial en Guatemala; obtuvieron como resultado que las rutas sugeridas por el algoritmo genético en promedio son 12 % más exactas que

las sugeridas por el algoritmo de Goole Maps. Como pregunta de investigación, surge la interrogante de si al conocer el patrón del tráfico vehicular de una red vial ¿se podría obtener una secuencia de estados óptima para cada semáforo de dicha red con la finalidad de maximizar el flujo vehicular?

Para dar respuesta a esta pregunta, fue seleccionado un tramo de la red vial que comprende desde la 25 avenida sur hasta la 33 avenida sur, y desde la 1° calle poniente hasta la alameda Franklin Delano Roosevelt (Figura 1). Luego se definió un patrón de tráfico y se realizó una simulación del flujo vehicular para las soluciones encontradas mediante la aplicación de un algoritmo genético.

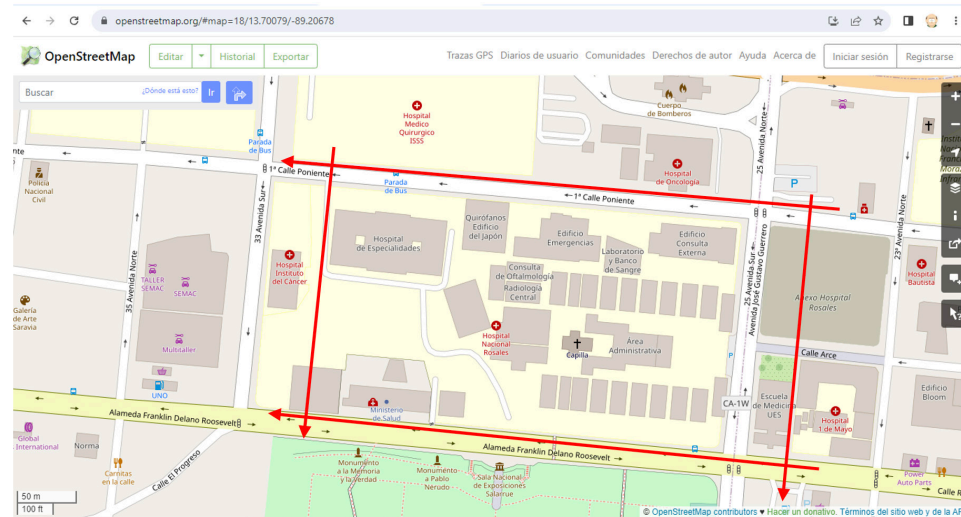
Metodología

Esta investigación tiene como objetivo construir un simulador que implemente algoritmos genéticos para maximizar el flujo vehicular, utilizando un segmento de la red vial del área metropolitana de San Salvador (El Salvador) y un patrón de tráfico vehicular conocido.

Empleando el lenguaje de programación Python versión 3.10.12, y aprovechando el entorno de desarrollo integrado de Google Colab, se simuló el tráfico vehicular en un segmento de la red vial de la ciudad San Salvador. La Figura 1 muestra la red vial de estudio. Posteriormente, se realizó una aplicación de algoritmo genético y se logró determinar el ciclo óptimo de los semáforos que controlan cada intersección.

Figura 1

Tramo de la red vial seleccionada.



Nota. Fuente: captura de pantalla de OpenStreetMap. Las flechas indican el sentido de las vías.

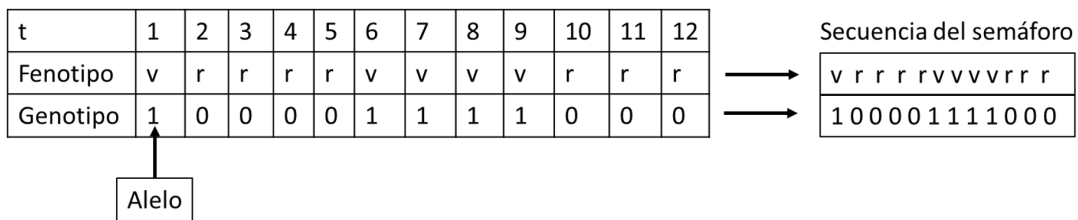
Definición del dominio de la solución

Dentro de la terminología de algoritmos genéticos, un **individuo** (también llamado **cromosoma**) es una solución al problema planteado, y al conjunto o espacio de soluciones se denomina **población**. Un **gen** es un segmento del cromosoma, es decir es una parte de la solución.

La secuencia de estados de un semáforo representa un gen en el diseño de la solución. Debido a que el tiempo de simulación es de 480 segundos y la duración mínima es de 40 segundos para cada estado, el coeficiente resultante de dividir los valores anteriores es 12 e indica la longitud del gen que representa al semáforo (Figura 2). El valor que toma cada estado se denomina **alelo** y sus valores pueden ser: rojo (r) o verde efectivo (v).

Figura 2

Representación de la secuencia de un semáforo (gen).



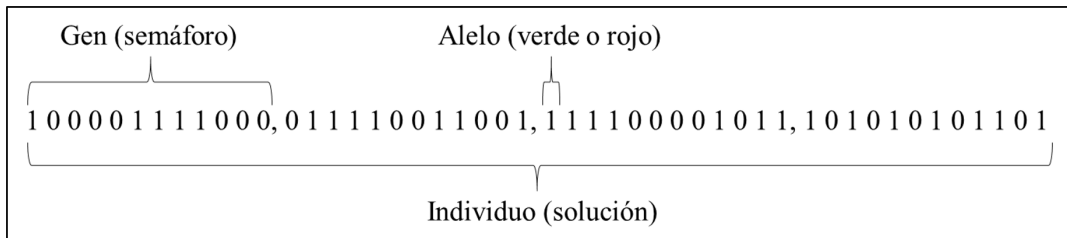
Nota. Fuente: elaboración propia.

Los genes se pueden representar en forma de fenotipo o de genotipo. Un **genotipo** es la información genética que conforman un individuo y que se transmite de generación en generación; para su codificación se emplea el sistema binario. Mientras que un **fenotipo** es la expresión del genotipo en forma física y se utiliza el sistema decimal o palabras para su representación (Figura 2). Para las operaciones de cruce y mutación se utilizó el genotipo de la solución.

Un individuo está formado por varios genes. Para esta investigación, la longitud del individuo está dada por el número de semáforos que forman la red vial a estudiar. De acuerdo a la Figura 1, el segmento de la red vial que se simuló consta de cuatro intersecciones y cada una de ellas es controlada por un semáforo (gen); por tanto, cada individuo de la población estará formado por cuatro genes, es decir 48 alelos en total. La Figura 3 muestra el genotipo de un individuo.

Figura 3

Genotipo de un individuo.



Nota. Fuente: elaboración propia.

La ecuación 1 denota a la población (S) de cien individuos que se creó para la simulación:

$$S = (s_{ij})_{100 \times 48} \quad (1)$$

Es decir, se creó una matriz de 100 filas con 48 columnas; donde s_{ij} representa el alelo en la posición j del individuo i . Cada solución debe cumplir con el conjunto de condiciones indicadas por la ecuación 2:

$$C(\{s_{ij}\}) = \begin{cases} 1, & \text{verde} \\ 0, & \text{rojo} \end{cases} \quad (2)$$

Esta condición indica que el valor para el estado de un semáforo solo puede ser verde o rojo para su representación en fenotipo, o cero y uno para su representación en genotipo.

Función de adaptación (fitness)

La función fitness asigna el **grado de adaptación** de cada solución respecto al problema planteado. Debido a que se quiere maximizar el flujo vehicular, a la vez que se busca minimizar el promedio del tiempo de espera de los vehículos que transitan por la red vial, la función de adaptación, la cual se denotará por $GA(\{S_i\})$, está formada por tres componentes: a) La relación entre el total de vehículos que ingresaron en el tiempo estipulado con respecto al número de vehículos que logran salir, b) El promedio de tiempo que debe esperar un vehículo para transitar en la red, y c) El máximo tiempo de espera que puede estar detenido un vehículo. La ecuación 3 muestra la definición de la función fitness:

$$GA(\{S_i\}) = 0.95 \times \frac{T[S_i]}{M[S_i]} + \frac{0.0009E[S_i]}{T[S_i]} + 0.00004ME[S_i] \quad (3)$$

Donde S_i representa al individuo o solución, $T[S_i]$ el total de vehículos que ingresaron a la red vial, $M[S_i]$ es la cantidad de vehículos que salieron de la red durante el tiempo de la simulación, $E[S_i]$ es la sumatoria del tiempo de espera de los vehículos que transitan por la red y $ME[S_i]$ es el máximo tiempo de espera que padeció un vehículo.

A cada componente lo acompaña un coeficiente que lo normaliza para que su aporte brinde la relevancia deseada. Para esta investigación el componente principal es la maximización del flujo vehicular, por ello el coeficiente que lo acompaña es 0.95, y para los dos componentes restantes sus coeficientes son 0.0009 y 0.00004 respectivamente.

Función objetivo

Es denotada por $O(\{S_i\})$ y recibe al individuo con su grado de adaptación $GA(\{S_i\})$ y las restricciones $C(\{S_{ij}\})$ a considerar para minimizarla. La ecuación 4 expresa dicha función.

$$O(\{s_i\}) = GA(\{s_i\}) + C(\{s_{ij}\}) \quad (4)$$

Proceso de selección natural

Cada solución es simulada durante un tiempo t y luego es calificada utilizando la función de adaptación. Luego se ordenan las soluciones de forma descendente según su calificación. Las cincuenta mejores soluciones forman parte de la siguiente generación (enfoque elitista parcial) para garantizar que los individuos más aptos sobrevivan y se asegure la convergencia global.

Con los cincuenta individuos seleccionados se realiza un proceso iterativo para generar 50 nuevos individuos y así poder completar el tamaño de la población (nueva generación). A este proceso se le denomina cruce y mutación.

Cruce y mutación

Se seleccionan aleatoriamente dos soluciones, luego se determina si estas dos soluciones se cruzan o no; en caso de no cruzarse, se realiza una copia de ellas y se convierten en dos nuevas soluciones que pasan a formar parte de la nueva generación.

Para simular la operación de cruce, primero se genera un número aleatorio de una distribución uniforme y luego se evalúa si es menor que la probabilidad de cruce que se ha definido; en caso de ser menor, se toman las soluciones progenitoras y se selecciona de manera aleatoria el punto de corte (quiasma). Finalmente, cada solución progenitora transfiere sus genes a las dos nuevas soluciones (Figura 4).

Figura 4

Operación de cruce.

Progenitores

A 100001111000,1011110011001,111100001011,101010101101
 B 010110110010,1110100110011,110101001100,101010101100

Descendientes

H₁ 100001111000,110100110011,110101001100,101010101100
 H₂ 010110110010,011110011001,111100001011,101010101101

Nota. Fuente: elaboración propia.

Luego se determina si cada uno de los descendientes sufrirá una mutación. Para simular la operación de mutación, se recorre el genotipo del individuo y para cada alelo se genera un número aleatorio de una distribución uniforme y se evalúa si es mayor que la probabilidad de mutación que se ha definido. En caso de ser mayor, se cambia el valor del alelo por su complemento, es decir, si el valor es cero cambiará a uno y viceversa (Figura 5).

Figura 5

Operación de mutación.

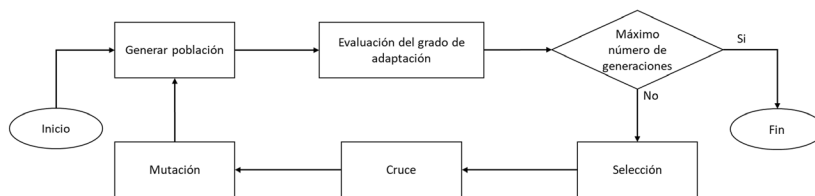
100001111000,011110011001,110101001100,101010101100
 100001111100,011110011001,110101001100,101010101100

Nota. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, cada descendiente pasa a formar parte de la nueva generación. Cuando la nueva generación alcance cien individuos reemplazará a la población inicial. Este proceso se repetirá hasta que se alcance el máximo número de generaciones. El flujograma de la simulación se muestra en la Figura 6.

Figura 6

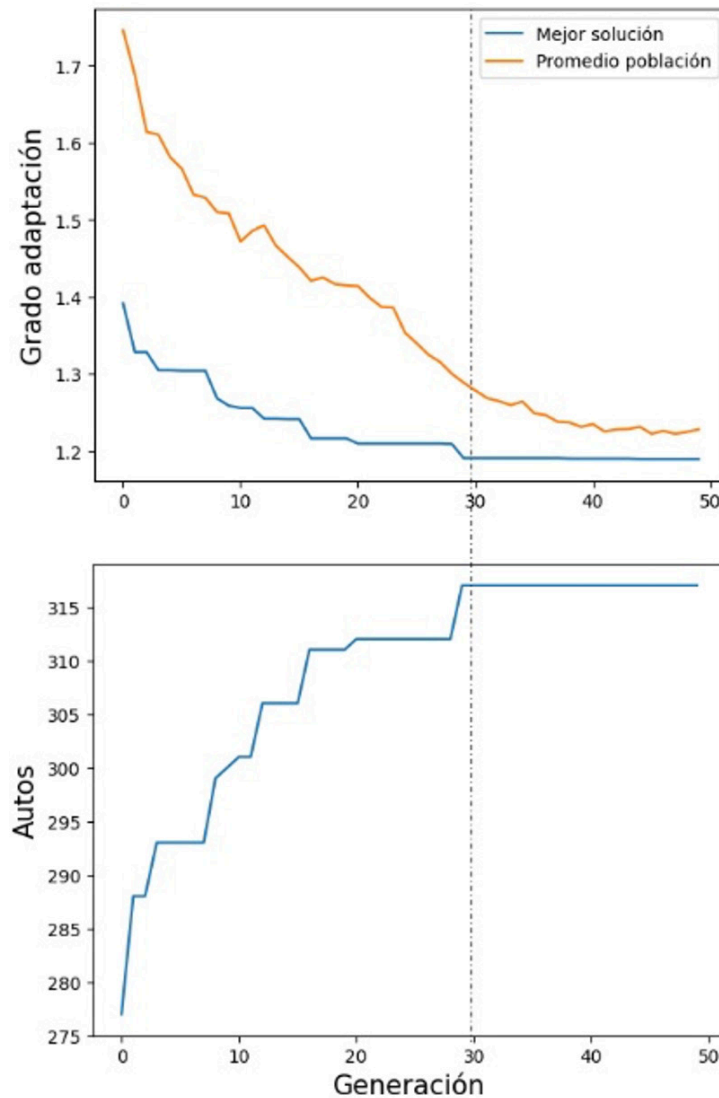
Flujograma de la simulación.



Nota. Fuente: elaboración propia.

Figura 8

Grado de adaptación de cada generación versus el número de vehículos que salen de la red.

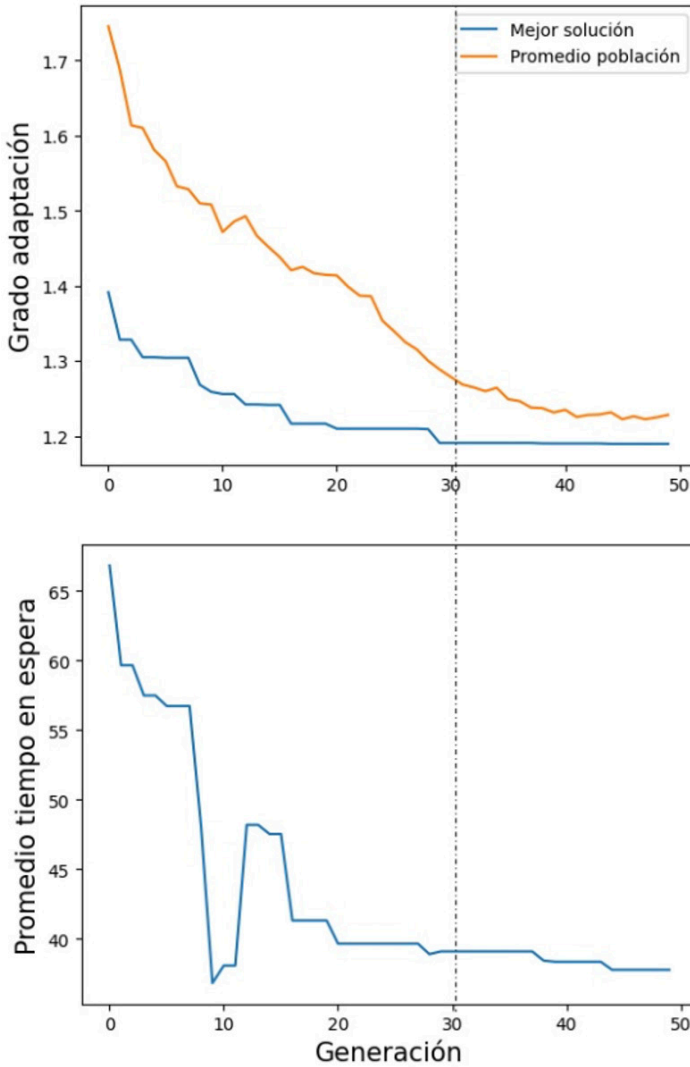


Nota. Fuente: elaboración propia.

La Figura 9 presenta en la parte superior el grado de adaptación del mejor individuo de cada generación, y en la parte inferior el tiempo promedio que debe esperar un vehículo para transitar por la red. La Figura 10 en la parte superior presenta el grado de adaptación del mejor individuo de cada generación, y en la parte inferior se presenta el máximo tiempo que puede esperar un vehículo.

Figura 9

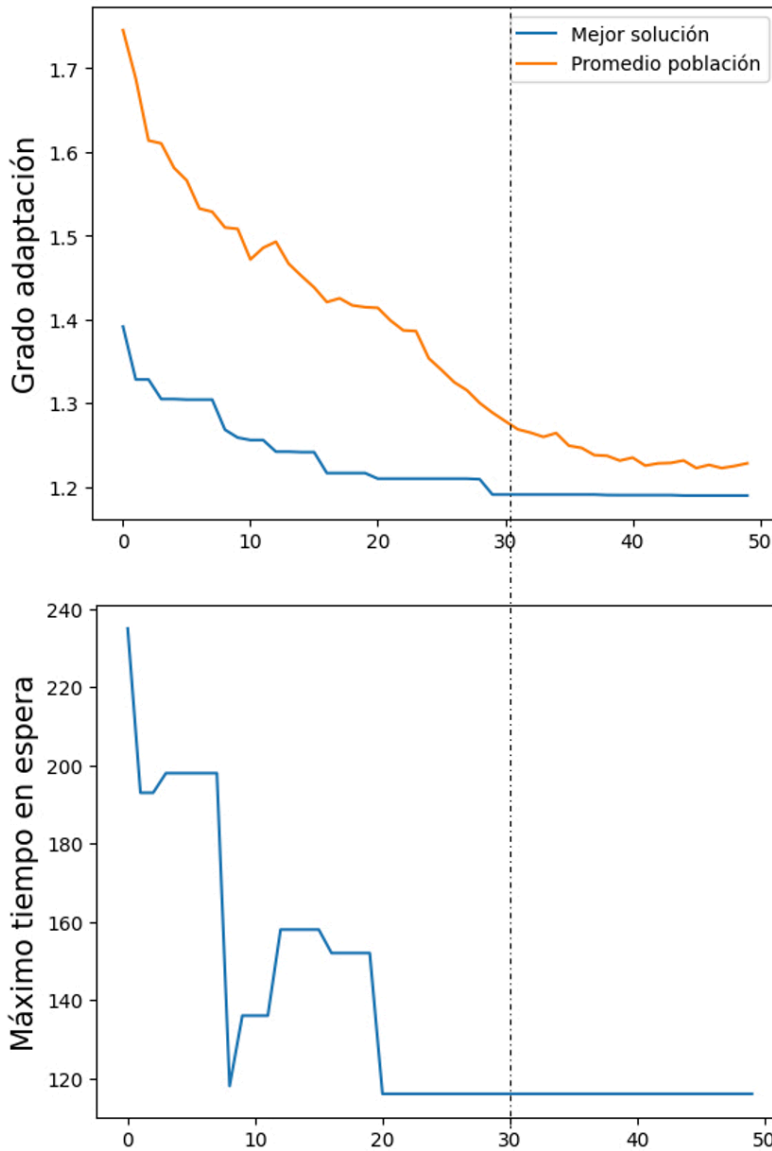
Grado de adaptación de cada generación versus promedio del tiempo de espera.



Nota. Fuente: elaboración propia.

Figura 10

Grado de adaptación de cada generación versus máximo tiempo de espera.



Nota. Fuente: elaboración propia.

Discusión

La tasa de ingreso en la red vial es de cuatro vehículos cada cinco segundos, ingresando un vehículo por vía. Debido a que el tiempo de simulación es de 480 segundos, en cada vía ingresa un total de 96 vehículos lo que implica que ingresan 384 vehículos a la red. El semáforo 1 controla la intersección entre la 37 avenida sur y la primera calle poniente, mientras que el semáforo 2 controla la intersección entre la 37 avenida sur y la alameda Franklin Delano Roosevelt. Por su parte, el semáforo 3 controla la intersección entre la 25 avenida sur y la primera calle poniente; y el semáforo 4 controla la intersección de la 25 avenida sur y la alameda Franklin Delano Roosevelt.

La Figura 7, que muestra el genotipo de la solución óptima encontrada, indica que el semáforo 1 pasó 200 segundos en verde y 280 segundos en rojo, permitiendo que salieran 80 vehículos de los 96 que ingresaron; es decir, salieron el 83 % de los vehículos que transitaron en la vía durante la simulación. En cuanto al semáforo 2, pasó 240 segundos en verde y 240 en rojo; permitiendo la salida de 72 vehículos que representa el 75 % de los vehículos que ingresaron. El semáforo 3 también pasó 240 segundos tanto en rojo como en verde, permitiendo que salieran 79 vehículos que representan 82 %, y el semáforo 4 pasó 200 segundos en verde y 280 en rojo, permitiendo que salieran 86 vehículos que representan el 89 %.

Debido a que se busca maximizar el flujo vehicular minimizando el cociente entre el total de vehículos que entran a la red con respecto a los que logran salir de ella, a la vez que se desea minimizar el tiempo promedio de espera de los vehículos, la función objetivo busca dentro de la generación aquella solución que presenta el menor grado de adaptación, ya que la función *fitness* se ha construido como un problema de minimización. La Figura 8 muestra el grado de adaptación de la solución óptima de cada generación versus la cantidad de vehículos que salen de la red vial. Se puede apreciar que entre menor es el grado de adaptación más vehículos salen, tal como se espera. La solución óptima comenzó a converger a partir de la generación 29 y su grado de adaptación es de 1.19, permitiendo que 317 vehículos salgan de la red; que representa el 82.55 % de los vehículos que ingresaron.

La Figura 9 muestra el tiempo promedio que le tomó a un vehículo salir de la red vial. En la solución óptima de la primera generación el tiempo promedio fue de 66.81 segundos, y a medida que se iba disminuyendo el grado de adaptación para la mejor solución de cada generación, también se iba reduciendo el tiempo promedio de espera de los vehículos para transitar por las vías, hasta que llegó al valor de 37.78 segundos. De hecho, de los 67 vehículos que no lograron salir de la red, 32 de ellos ingresaron al sistema cuando el tiempo restante de la simulación era menor al tiempo promedio que les tomaría salir y, por tanto, quedaron en cola.

La Figura 10 muestra el tiempo máximo que ha esperado un vehículo para salir del sistema en cada una de las generaciones, siendo la primera generación la de mayor tiempo con un valor de 235

segundos. Luego, a medida que se iba disminuyendo el grado de adaptación de la mejor solución en cada generación, el máximo tiempo de espera para un vehículo también se fue reduciendo hasta que su valor llegó a 116 segundos. Esto indica que, utilizando la mejor solución para configurar los semáforos de la red vial de estudio, un vehículo tardará menos de dos minutos para salir en el peor de los casos.

En conclusión, el resultado de la simulación indica que minimizando el grado de adaptación se logra encontrar una configuración óptima para los estados de los semáforos que intervienen en la red vial de estudio, y, por tanto, se logra maximizar el flujo vehicular y minimizar el tiempo promedio que le toma a un vehículo transitar por la red.

Esta aplicación se puede generalizar y adaptar a cualquier segmento de la red vial. Para ello, se debe identificar: a) El número de vías, sus longitudes (km) y sus sentidos de circulación, y b) El número de intersecciones y los semáforos que interactúan con las vías. Además, para estructurar adecuadamente la solución se debe definir tanto la duración de la simulación como el tiempo mínimo que puede tomar un estado del semáforo. Finalmente, los coeficientes que acompañan a cada componente de la función de adaptación se pueden modificar según la importancia que se le otorgue a cada uno.

Trabajos futuros

Se definirá una función de adaptación que registre la cantidad de combustible utilizada para transitar en las vías; de esta manera se penalizará aquellas soluciones que no minimicen el consumo de combustible. Esta nueva información servirá para asociar costos y el efecto del tráfico en la huella de carbono.

Referencias

- Aldás S., M. R. y Flores C., M. J. (2016). Modelo origen destino para estimar el flujo de tráfico usando algoritmos genéticos. *Maskana*, 5 (Ed. Esp.). <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/722>
- López Vides, C. (2023, 19 de marzo). San Salvador, ciudad intransitable: las causas del caos vehicular en la capital. *El Diario de Hoy*. <https://www.elsalvador.com/noticias/nacional/estadisticas-de-accidentes-transito-transporte-ministerio-obras-publicas-san-salvador-trafico-/1048061/2023/>
- Luna, Ó., Humberstone, J. y Argueta, F. (2022, 02 de diciembre). Tráfico: El Salvador al borde del colapso. *Revista Disruptiva*. <https://www.disruptiva.media/trafico-san-salvador-al-borde-del-colapso-experimento-1-100-metros-en-el-bulevar-los-heroes/>
- Martínez, A. (2023, 08 de marzo). En cuestiones de tráfico: no estamos tan lejos de una situación como en Guatemala. *Revista Disruptiva*. <https://www.disruptiva.media/en-cuestiones-de-trafico-no-es->

tamos-tan-lejos-de-una-situacion-como-en-guatemala-amilcar-martinez-jefe-de-la-unidad-de-movilidad-sostenible-opamss/

Medina Nolazco, J. D. (2015). Implementación de un algoritmo genético para la optimización de flujo vehicular aplicado a la fase de tiempos en las intersecciones de un corredor vial. [Tesis de ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7096>

Santisteban González, C. y Aldana Díaz, M. E. (2017). Algoritmos genéticos aplicados al tráfico vehicular de la ciudad capital de Guatemala para búsqueda de rutas alternas eficientes que apoyen el reordenamiento vial. *Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado*, 1(1), pp. 83-86. <https://core.ac.uk/download/pdf/228879628.pdf>