DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363
Publicación Semestral Pädi Vol. 12 No. Especial 3 (2024) 141-155

Modelo de optimización basado en Algoritmos Genéticos para el diseño de nuevas rutas de transporte escolar en una Universidad Pública del Estado de Hidalgo
Optimization model based on Genetic Algorithms for the design of new school transportation routes in a Public University of the State of Hidalgo

Ian A. Quijano-Crisóstomo [a,*], Juan C. Seck-Tuoh-Mora [a], Joselito Medina-Marín [a], Norberto Hernández-Romero [a], Gustavo E. Anaya-Fuentes [a]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

El presente trabajo de investigación aborda el diseño de nuevas rutas del sistema de transporte escolar Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) para poder beneficiar a la población estudiantil del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI). Se propone un modelo de optimización basado en Algoritmos Genéticos desarrollado en MATLAB, así mismo se adoptará la metodología del Problema del Agente Viajero con Ruta de Paseo (PAV-RP) para representar la realidad del entorno de estudio. Se utilizarán diversas herramientas tecnológicas cómo la programación de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) en el lenguaje de programación Python para obtener los datos de entrada (distancias de carretera y tiempos de tráfico). Dicho modelo ofrece cómo salida el recorrido óptimo, la distancia total recorrida, el tiempo de tráfico interarribo por cada parada y el costo total del recorrido en base al consumo vehicular y el precio del combustible con el fin de ofrecer un mejor panorama de la propuesta.

Palabras Clave: Modelo de Optimización, Rutas, Sistema, Transporte Escolar, Algoritmo Genético.

Abstract

This research work addresses the design of new routes for the Garzabus school transportation system of the Autonomous University of the State of Hidalgo (UAEH) to benefit the student population of the Institute of Basic Sciences and Engineering (ICBI). An optimization model is proposed based on Genetic Algorithms developed in MATLAB, likewise the methodology of the Travel Salesman Problem with Walking Route (TSP-WR) to represent the reality of the study environment. Various technological tools will be used, such as programming an Application Programming Interface (API) in the Python programming language to obtain input data (road distances and traffic times). This model offers the optimal route, the total distance traveled, the inter-arrival traffic time for each stop and the total cost of the route based on vehicle consumption and the price of fuel with the aim of offering a better overview of the proposal.

Keywords: Optimization Model, Routes, System, School Transportation, Genetic Algorithm.

1. Introducción

Una tendencia en la actualidad dentro de las instituciones educativas universitarias de prestigio internacional es que cuenten con múltiples servicios que permitan facilitar el acceso a la educación a sus estudiantes, dentro de estos servicios se encuentran apoyos económicos cómo becas o incentivos, bibliotecas tanto presenciales cómo digitales, laboratorios con la mejor tecnología, equipos de computación, cursos interdisciplinares, asesorías con docentes capacitados e incluso espacios donde puedan desarrollar sus tareas y proyectos escolares. Uno de los más relevantes en el ámbito socioeconómico de los estudiantes es el sistema de transporte escolar, el cual brinda a los universitarios una opción segura y viable para una necesidad tan básica como lo es la movilidad.

En términos generales (Gutiérrez, 2012) menciona que la movilidad es una práctica social de desplazamiento de personas y bienes entre lugares con el fin de concretar actividades cotidianas.

El transporte escolar es una subclasificación del sistema de transporte público, En (Educa, 2023) se menciona que este medio tiene como misión principal de transportar a estudiantes dentro del mismo municipio o entre distintos municipios a sus

*Autor para la correspondencia: ian_quijano@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: ian_quijano@uaeh.edu.mx (Ian Andrés Quijano-Crisóstomo), jseck@uaeh.edu.mx (Juan Carlos Seck-Tuoh-Mora), jmedina@uaeh.edu.mx (Joselito Medina-Marín), nhromero@uaeh.edu.mx (Norberto Hernández-Romero), ganaya@uaeh.edu.mx (Gustavo Erick Anaya-Fuentes)

Historial del manuscrito: recibido el 11/07/2024, última versión-revisada recibida el 12/09/2024, aceptado el 18/09/2024, publicado el 14/11/2024. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13420

instancias educativas donde estudian y a sus hogares o cerca de ellos.

Hoy en día la importancia del transporte escolar radica en la capacidad de movilizar a los estudiantes de forma eficiente, rápida y segura, permitiendo que la población estudiantil crezca y a su vez que se disminuyan las necesidades de espacio y de energía, logrando desplazamientos eficientes y mayor desarrollo en las ciudades donde se implemente (Ortega-Ortega, 2017). (Jiménez-Sánchez, 2018) aclara que existen diversos factores cómo la naturaleza del entorno, el desarrollo económico de la región, la disponibilidad de combustible, el diseño de la cadena de suministro (rutas y plan de distribución), la estacionalidad y el volumen de individuos a mover, provocan que el precio del transporte se incremente en función a la tarifa de referencia del transportista o el precio real del mercado

(Vickerman, 2024) destaca las diversas problemáticas que padece el transporte público en la actualidad, aumenta la congestión vehicular causando embotellamientos que ralentizan el tráfico e incrementan el tiempo de viaje, haciéndose ineficiente e inseguro, de igual forma considera altos costos asociados con el combustible, el mantenimiento y las tarifas que suelen ser elevadas y en otros casos el sistema de transporte no es accesible para ciertos grupos de la población que pertenecen a zonas aisladas.

En la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) se ofrece el transporte universitario Garzabús, este servicio es totalmente gratuito para el uso exclusivo de alumnos, personal académico y administrativo, el único requisito para abordar estas unidades es presentar la credencial o la tira de materias vigente. Hoy en día cuenta con 18 autobuses que recorren 14 rutas que pasan por las diferentes dependencias o campus de la misma universidad y en algunas localidades importantes de Pachuca de Soto, Hidalgo y sus alrededores, teniendo un gran impacto en la comunidad universitaria ya que beneficia a cerca de 16 mil estudiantes diariamente (Cadena, 2019).

El diseño de rutas de transporte escolar, normalmente ha sido abordado como un problema de optimización, en donde la mayor intención es mejorar el aprovechamiento de los recursos invertidos, por lo que se han considerado los siguientes objetivos: minimización de tiempos y minimización de costos de transporte (Park & Kim, 2010).

(Jiménez-Carrión, et al., 2023) destacan que los Algoritmos Genéticos son elegidos para diseñar rutas de transporte urbano porque siendo de propósito general se adaptan muy bien a los problemas de alta complejidad y están cada vez siendo utilizados con mayor intensidad en diversas áreas de gestión e ingeniería.

Los algoritmos genéticos fueron desarrollados por John Holland en la Universidad de Michigan en la década de los 70´s y llevan a cabo una técnica informática que pertenece al área de la Inteligencia Artificial (IA) para la resolución de problemas (Cogollo-Florez, 2017).

Un algoritmo genético es una técnica de búsqueda global por medio de métodos que consideran el azar, esta resuelve problemas replicando procesos observados en la evolución biológica natural planteada por (Darwin, 1859).

Posee un rango de aplicación bastante extenso en donde los problemas no necesitan de métodos de resolución tan especializados. En pocas palabras, se posee una población individuos que a su vez están compuestos de cromosomas, cada individuo pasa por diferentes etapas biológicas para obtener una solución codificada de un caso de estudio en específico (Cogollo-Florez, 2017).

Esta evolución se lleva a cabo a través de la aplicación de diferentes algoritmos u operadores genéticos que son denominadas como las etapas del proceso, estas etapas son generación de población, *selección, cruce, mutación y evaluación* los cuales son ejemplificados en la Figura 1.

Algunos de los conceptos básicos son (Davis, 1991):

- **Gen:** Es el valor de un alelo dentro de un arreglo.
- **Individuo o cromosoma:** Es una colección de genes que forma un arreglo.
- **Población:** Conjunto de individuos generados inicialmente.
- **Posición:** Es el lugar que ocupa un gen en el cromosoma.
- **Índice:** Es la posición que tiene el individuo dentro de la población.

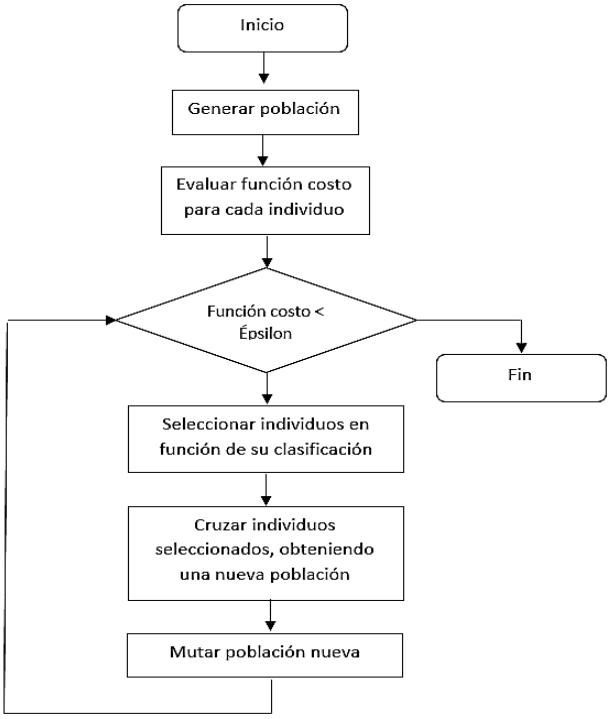

Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de un Algoritmo Genético.

En este trabajo se aborda el Problema del Agente Viajero (PAV) o Travel Salesman Problem (TSP) en inglés. El Problema del Agente Viajero – Travel Salesman Problem (TSP), es un problema que ha sido investigado desde los inicios de la Inteligencia Artificial, el primer artículo que menciona una manera de resolver el problema tiene por nombre: “Solutions of a large scale Traveling Salesman Problem“ publicado por (Dantzig, et al., 1954).

En base a la literatura este problema es considerado difícil de resolver debido a la explosión combinatoria que hace que se complique mediante técnicas exactas encontrar el óptimo global del problema, denominándose en términos de complejidad computacional cómo NP-Hard, por lo que no se puede garantizar que se encontrará la mejor solución en un tiempo computacional razonable (Villegas, et al., 2017).

(Fuentes-Penna, s.f.) indica que en la actualidad se han propuesto diversas técnicas metaheurísticas para dar solución al TSP cómo *algoritmos genéticos, redes neuronales, colonia de hormigas, project scheduling problema, entre otros.*

Normalmente, el problema de TSP tiene consiste en hallar el recorrido más corto en un entorno de diferentes ciudades, donde cada ciudad es visitada una sola vez antes de regresar al punto de partida. El modelo TSP asociado se define por medio de dos datos (Taha, 2012):

- El número de ciudades, n.
- Las distancias dij entre las ciudades i y j (di = ∞ si las ciudades i y j comunicadas o si el punto i = j).

1.1. Formulación matemática

El modelo TSP se formula matemáticamente de la siguiente manera:

$$minimizar\ z = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} d_{ij}x_{ij} \quad (1)$$

$$d_{ij} = \infty\ para\ todas\ las\ i = j \quad (2)$$

$$s.t\ \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1; j = 1, 2, \dots, n; entra\ una\ vez\ a\ cada\ ciudad \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1; i = 1, 2, \dots, n\ ; deja\ una\ vez\ cada\ ciudad \quad (4)$$

$$\mu_i + 1 \leq \mu_j + n * \left(1 - x_{ij}\right); rompe\ subtours \quad (5)$$

$$para\ i = 2, \dots, n; i \neq j; j = 2, \dots, n \quad (6)$$

$$x_{ij}\epsilon\{0,1; para\ todo\ i\ y\ j \quad (7)$$

$$\mu_i \geq 1, para\ todo\ i \quad (8)$$

2. Materiales y métodos

En el presente trabajo se aplicarán diversas técnicas para poder desarrollar un modelo de optimización para encontrar un conjunto de rutas adecuadas para el sistema de transporte universitario Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

2.1 Selección de paradas y/o nodos

Para la primer propuesta se realizó una búsqueda de paradas y/o nodos que ya fueron validados por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) pero que tengan la particularidad de no haber sido seleccionados para una ruta en Ciudad del Conocimiento – Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) y que sean de la zona metropolitana de Pachuca de Soto, Hidalgo y sus alrededores ya que este es el entorno en donde se llevará a cabo el caso de estudio delimitado en anteriormente en el planteamiento del problema.

La búsqueda fue realizada por medio de la aplicación Garzabús, mostrada en la Figura 2, desarrollada por el personal del Centro de Electrónica y Desarrollo de Aplicaciones Inteligentes (CEDAI), dicha aplicación muestra todas las rutas disponibles de absolutamente todos los campus que provee la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), así como también la programación de horarios de cada una.

Figura 2: Interfaz de la aplicación "Garzabús" desarrollada por el Centro de Electrónica y Desarrollo de Aplicaciones Inteligentes (CEDAI) para el sistema operativo Android. Fuente: Google Play

Además, se obtuvieron dos conjuntos de paradas para la elaboración de la segunda propuesta de rutas, cada conjunto de la propuesta servirá para la programación de una ruta matutina y otra vespertina, ya que la institución maneja un sistema de rutas de ida y vuelta para dos diferentes turnos dentro de la misma línea, cada ruta está compuesta por un nodo de origen, un nodo de destino y los demás nodos que son parte del recorrido, a los que denominaremos como nodos de viaje.

La selección de asentamientos para cada conjunto fue delimitada por medio de un sondeo a los alumnos de Ciudad del Conocimiento – Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) con el fin de seleccionar los lugares de mayor interés para los jóvenes, ya que es de suma importancia tomar en cuenta la opinión de la población de estudio, para que de esa manera se determinen los datos de entrada definitivos para la primera propuesta.

2.2 Cálculo de distancias y tiempos

Las entradas más relevantes para el funcionamiento del modelo son la distancia recorrida y los tiempos de tráfico para llegar de un punto de la ciudad a otro, las cuales pueden ser utilizadas como factor de optimización dependiendo de la necesidad del problema que se esté priorizando.

Las distancias de carretera se tomaron en cuenta para obtener resultados reales y de esa forma considerar la distancia entre las diferentes paradas de los conjuntos mencionados anteriormente, estos se obtuvieron mediante la herramienta de georreferenciación Microsoft Bing Maps, la cual se puede apreciar en la Figura 3, con el sistema de coordenadas geográficas mundial WGS 84 tomando cómo criterio el obtener la ruta más rápida para automóviles (El-Rabbany, 2020).

Los tiempos obtenidos fueron de tráfico real utilizando la herramienta mencionada anteriormente, dichos tiempos se obtuvieron en horarios matutinos o vespertinos, dependiendo de cada conjunto de asentamientos, para tener un acercamiento más exacto a la realidad y cómo consecuencia el modelo pueda arrojar resultados de tráfico bastante acertados.

Calcular las distancias y tiempos entre los diferentes lugares de cada conjunto de paradas para la elaboración de una ruta óptima sería una tarea exhaustiva por lo que se programó un código en el lenguaje de programación Python que utiliza una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) denominada pybing.py.

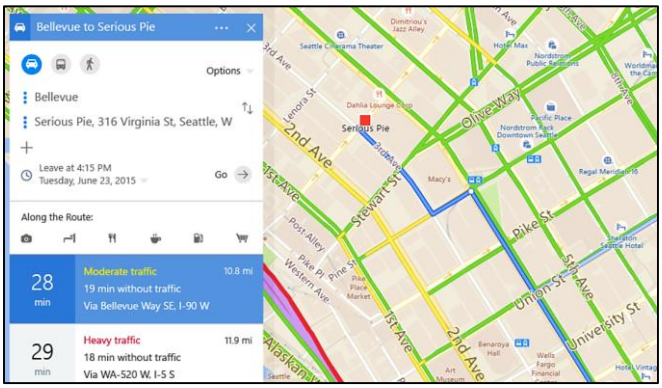

Figura 3: Interfaz de la herramienta de georreferenciación "Microsoft Bing Maps" para ordenador. Fuente: Microsoft.

La aplicación permite desarrollar nuevas funciones y/o aplicaciones a los sistemas de software (normalmente en línea) que contienen información de interés, y de esa forma poder agilizar el proceso de la medición de distancias de carretera y de tiempos.

Cómo entradas del programa se deben obtener de Microsoft Bing Maps las coordenadas (latitudes y longitudes) de cada nodo y de esa forma ingresarlas para que el programa arroje cómo salida una matriz cuadrada con todas las distancias entre los diferentes nodos seleccionados en formato Excel (.xlsx).

2.3 Modelo de optimización: Problema del Agente Viajero con Ruta de Paseo (PAV-RP)

(Hillier & Lieberman, 2010) mencionan que los modelos o representaciones idealizadas, son una parte integral de la vida diaria teniendo un papel importante en la ciencia y los negocios por que extraen la esencia del material de estudio, muestran sus interrelaciones y facilitan el análisis.

Después se tiene la palabra "optimización", la cual podemos observar que es un tanto compleja y para poder definirla tomaremos en cuenta una opinión bastante entendible y enriquecedora de los autores (Haupt, R.L. & Haupt, S.E., 2004) quienes mencionan que la optimización es el proceso de hacer algo mejor, un ingeniero o científico puede crear una nueva idea, pero la optimización mejora esa idea probando variaciones y consideraciones matemáticas de un concepto inicial y utilizando la información obtenida. De igual forma mencionan que un ordenador es la herramienta perfecta para optimizar una idea siempre y cuando dicha idea se pueda traducir a un formato o lenguaje electrónico

Es importante mencionar la utilidad de los modelos de optimización, en ocasiones estos sirven de apoyo para la parte gerencial o ejecutiva de alguna organización en la parte de toma de decisiones permitiendo pautas en la búsqueda de soluciones a los diversos problemas administrativos y en la generación de valor para la empresa, una vez expuestas las propuestas de mejora a partir del modelo, los valores óptimos pueden diferir de la realidad por factores del sistema externo, pero eso ya no tiene nada que ver con la elaboración de dicho modelo, ya que este cumplió con su objetivo (Pérez-Peña, 2019).

La existencia de puntos múltiples de origen que sirven a múltiples puntos de destino permite al problema de asignación de los destinos a esos orígenes y definir las mejores rutas entre ellos. A este tipo de problema se aplica con frecuencia a una clase especial de algoritmo de programación lineal conocido como método de transporte (Ballou, 2004). Algunos autores nombran a este conjunto de puntos de origen y de destino nombran como nodos.

Para poder abordar esta problemática se observó que el sistema de transporte de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) tiene una característica peculiar, la cual es que sus rutas actuales tienen un punto de origen, un punto de destino y diversos puntos que son parte de las paradas que realizará el autobús durante todo el recorrido, por lo que se necesitaría elaborar un modelo de ruteo afín para la representación del entorno.

Dentro de la literatura estudiada se observó uno de los problemas mayormente utilizados para el ruteo de diversos sistemas de transporte dentro de la investigación es el Problema del Agente Viajero - PAV (Travel Salesman Problem - TSP, en inglés), este problema sirve para modelar diferentes situaciones en donde algún individuo, vehículo o producto tenga que visitar diferentes puntos o nodos y regresar a su origen de donde partió.

Si bien este modelo tiene un principio valido para poder representar la realidad del caso de estudio, el que visite diferentes puntos o nodos, no se adecua en su totalidad ya que es un ciclo hamiltoniano, es por ello que se decidió adaptar una variante dentro de la metodología del problema para poder asemejarse al escenario de la institución.

La presente adaptación del problema es denominada cómo: "Travel Salesman Problem with Walking Route (TSP-WR) – Problema del Agente Viajero con Ruta de Paseo (PAV-RP)" abordado por primera vez por (Toso & Toth, 1994), teniendo cómo características principales las siguientes de igual forma se pueden observar de manera visual en la Figura 4:

- Un nodo de origen.
- Un nodo de destino.
- Nodos de viaje.

Se propuso el concepto de nodos de viaje para que el autobús pueda pasar por todos los lugares propuestos y a su vez mantenga el origen y el destino intactos dentro de la secuenciación de la ruta y de igual forma en el proceso de optimización.

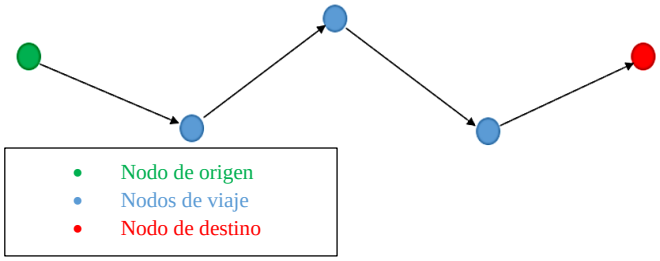

Figura 4: Representación gráfica del TSP: "Travel Salesman Problem with Walking Route (TSP-WR)".

Cómo factor de optimización se tomará a la distancia de carretera, es elegida debido a que juega un papel relevante en el sistema de transporte universitario, es decir, minimizando la distancia se podrá reducir el consumo de combustible y por ende reducir el kilometraje de cada unidad vehicular reduciendo la frecuencia del mantenimiento.

Otra característica particular del modelo propuesto es que además de optimizar la distancia recorrida, calcula el costo de combustible total del recorrido en pesos mexicanos (MXN)

con el fin de tener un indicador monetario y de esa forma tener una comparación entre las rutas propuestas y las existentes más certera y concisa.

También se calcula el tiempo interarribo entre cada parada o nodo asignado a la ruta por el modelo de optimización utilizando tiempos de tráfico reales obtenidos del código Pybing, esto resulta ser demasiado útil para tener un panorama más amplio de la ruta obtenida y analizar si la ruta se acerca a la realidad y verificar si es viable en relación al tiempo para poder llevarla a cabo dentro de la universidad.

2.4 Formulación matemática

A continuación, se presentará la formulación matemática de la adaptación del Problema del Agente Viajero utilizado para llevar a cabo la propuesta al caso de estudio.

Sean:

- n el número de ciudades
- c el consumo de combustible del vehículo (en litros por kilómetro)
- p el precio del combustible (en pesos mexicanos – MXN)
- d_{ij} la distancia entre la ciudad i y la ciudad j (en kilómetros)
- t_{ij} el tiempo entre la ciudad i y la ciudad j (en minutos)
- s el tiempo de espera que el autobús aguardará en la ciudad j (en minutos)
- $x_{ij} = \begin{cases} 1, si\ se\ llega\ a\ la\ ciuda\ j\ desde\ la\ ciudad\ i \\ 0, en\ caso\ contrario \end{cases}$ (9)

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,j\neq i}^{n} d_{ij}x_{ij} \quad (10)$$

Sujeto:

1. Cada ciudad debe ser visitada exactamente una vez:

$$\sum_{j=1,j\neq i}^{n} x_{ij} = 1, \forall_i = 1,2,\dots,n \quad (11)$$

$$\sum_{i=1,i\neq j}^{n} x_{ij} = 1, \forall_j = 1,2,\dots,n \quad (12)$$

2. No puede haber subtours:

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in S,j\neq i} x_{ij} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq \{1,2,\dots,n\}, |S| \leq 2 \quad (13)$$

3. Restricción del nodo de origen:

$$\sum_{j=1,j\neq o}^{n} x_{oj} = 1 \quad (14)$$

Donde o es el nodo de destino

4. Restricción del nodo de origen:

$$\sum_{i=1,i\neq d}^{n} x_{dj} = 1 \quad (15)$$

Donde d es el nodo de destino

5. Calculo de tiempos de tráfico interarribo:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,j\neq i}^{n} t_{ij}x_{ij} + s \quad (16)$$

6. Calculo del costo de combustible del recorrido

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,j\neq i}^{n} d_{ij}x_{ij}cp \quad (17)$$

2.5 Método de optimización: Algoritmo Genético

Dentro de las técnicas existentes abordadas para el Problema del Agente Viajero se encuentra una técnica bastante eficiente y confiable en cuanto al tiempo computacional y que adecua su mecanismo de funcionalidad con las diferentes características del problema y las respuestas que pueden derivarse que en este caso son las rutas de transporte, se está hablando los Algoritmos Genéticos.

Esta técnica ofrece una codificación numérica bastante coherente y sencilla al momento de interpretar rutas,

La metodología que seguirá el Algoritmo Genético se ejemplifica en el diagrama de flujo de la Figura 9 y será descrita cada paso de manera minuciosa a continuación:

Paso 1 – Generar población: Se genera una población de individuos de orden aleatorio que a su vez seguirá la codificación de que cada gen del individuo es una ciudad y que el conjunto de genes formará un individuo que haciendo la analogía en base a la problemática es una ruta de transporte.

En esta primera etapa se debe generar una población de individuos en función al número de ciudades. Los individuos tienen la particularidad de que el primer gen y el ultimo deben quedarse fijos, debido a que estos representarán el nodo de origen y el nodo de destino, y no pueden ser parte de la generación de combinaciones de números aleatorios. Los genes intermedios si serán generados por medio de diversas combinaciones de números aleatorios, ya que estos son las diferentes asignaciones que pueden tener los nodos de viaje (Figura 5).

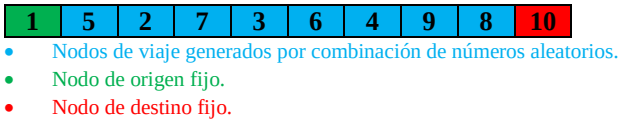

Figura 5: Codificación propuesta para abordar la problemática TSP-WR mediante Algoritmos Genéticos.

Paso 2 – Evaluar población: Se calcularán los costos de cada individúo generado en función al factor de optimización que en este caso son los kilómetros totales del recorrido.

Paso 3 – Seleccionar población (Elitismo): Una vez teniendo la población general con sus respectivos costos serán seleccionados los mejores a los que se denominarán elitistas y se realizará la copia de estos en una nueva población.

Paso 4 – Seleccionar población (Torneo): Se aplica la etapa de torneo donde se realizarán duelos de dos individuos de orden aleatorio que no sean elitistas y que sean parte de la población generada originalmente, los ganadores de cada duelo serán copiados en la lista de la nueva población.

La selección por torneo es recomendada por su simplicidad y eficiencia en términos computacionales, además que logra favorecer la diversidad genética y evita la convergencia hacia óptimos globales (Goldberg, 1989).

Paso 5 – Cruzar población: Se generan nuevas soluciones mediante una serie de cruces entre dos individuos de la nueva población.

Cómo paso inicial para llevar a cabo la etapa de cruce se deben importar los dos padres que serán tomados al azar de la nueva población que está conformada por los individuos elitistas y los individuos ganadores del torneo.

Posterior a ello se definirá de forma aleatoria cuantos, y cuales genes se someterán al cruce, esto para ambos padres. Es importante tomar en cuenta que los genes seleccionados solo pueden ser los genes que refieran a los nodos de viaje cómo se muestra en la Figura 6, ya que, si hay un cruzamiento de algún gen que involucre al nodo de viaje o al nodo de destino con el gen de algún otro individuo, la codificación del cromosoma o

individuo no tendrá un formato valido y por ende la ruta resultante ya no sería aplicable.

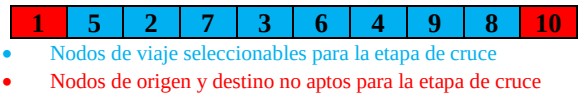

Figura 6: Genes seleccionables y genes no aptos para la etapa de cruce del Algoritmo Genético.

Una vez definidas, las posiciones y la cantidad de genes de los padres (posiciones), serán asignadas a los respectivos hijos, inmediatamente los genes sobrantes de los padres se asignarán al hijo contrario. Pero es de gran importancia mencionar que, si en dado caso de que exista un gen repetido en la posición del gen del padre seleccionado para la asignación del hijo contrario, se asignará el primer gen no repetido, respetando el orden de posiciones de izquierda a derecha, y posterior a ello se irá realizando la asignación de los demás genes, ya que no pueden existir dos o más genes repetidos en un solo individuo y esto sería un formato de ruta no valido para este caso en particular de la Figura 7.

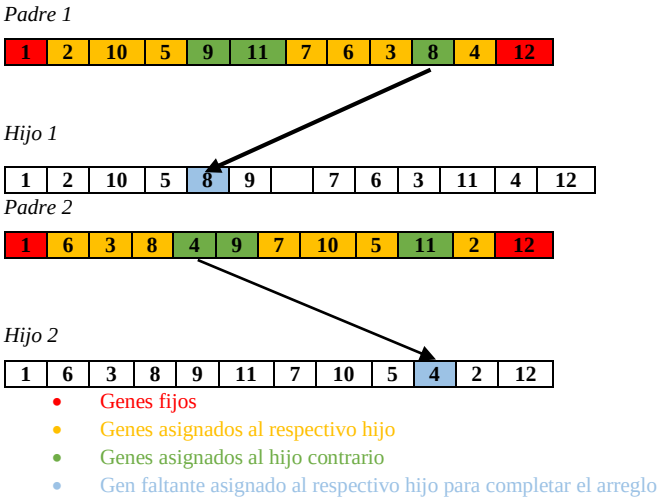

Figura 7: Cruce propuesto para el Algoritmo Genético

Paso 6 – Mutar población: Se realiza una mutación en algunas poblaciones para mejorar la descendencia. En esta problemática se propone abordar un operador sencillo y común, para empezar, se establecerá una probabilidad de realización de mutación la cual determinará con la generación de un número aleatorio si se realizará o no la mutación. En caso de que el número aleatorio generado sea menor o igual se realizará lo que muestra la Figura 8.

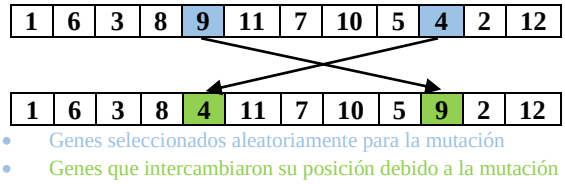

Figura 8: Mutación propuesta para el Algoritmo Genético.

Se seleccionarán dos posiciones de forma aleatoria del arreglo de un individuo, los genes que son incluidos dentro de sus respectivas posiciones previamente seleccionadas intercambiarán su lugar para obtener una variabilidad en la codificación del cromosoma, esto será aplicado en todos los individuos de la nueva población (elitistas, ganadores por torneo, individuos generados por cruce).

Paso 7 – Reemplazar población: Se reemplaza la nueva población mejorada en el arreglo que corresponde a la población original del Algoritmo Genético, de esa forma se logra actualizar la población de soluciones a lo largo de las generaciones futuras y de esa forma ir mejorando la calidad de la solución.

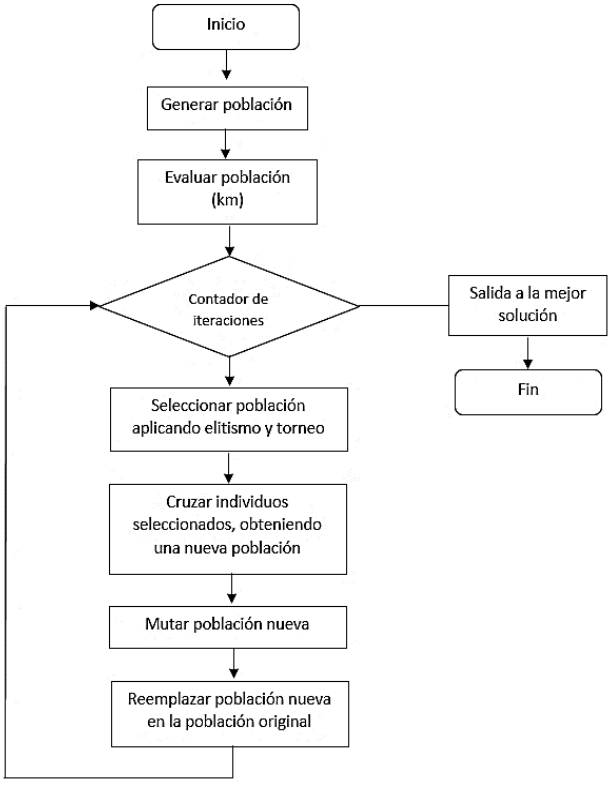

Figura 9: Diagrama de flujo de la metodología que seguirá el Algoritmo Genético propuesto.

Una de las actividades primarias de la construcción del modelo de optimización de este caso práctico es la programación de un modular que gestione las diferentes funciones o etapas que sigue un Algoritmo Genético (Figura 10). Esto resulta bastante útil para que todo el proceso quede sistematizado dentro de un mismo código mejorando la eficiencia del programa, reduciendo el tiempo computacional de ejecución y al mismo tiempo sea más fácil realizar modificaciones ya que todo se muestra interconectado y automatizado.

2.6 Costo de combustible

Un factor a considerar dentro de cualquier sistema de transporte organizacional es el consumo de combustible de los vehículos que tienen a su disponibilidad, en este caso de estudio se tomó la tarea de investigar qué modelo de autobús es utilizado para trasladar a los estudiantes a diferentes instancias. La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo utiliza un autobús marca DINA de la línea LINNER los cuales se caracterizan por brindar soluciones eficientes a una creciente demanda de movilidad masiva.

Modular del Algoritmo Genético
Generar la población inicial de Pob individuos
Calcular_costos (Pob)
For una determinada cantidad de iteraciones
PadresElit ← *Aplicar elitismo (Pob)*
PadresTor ← *Selección mediante Torneo (Pob* ∩ *PadresElit)*
Padres ← *PadresElit* U *PadresTor*
Hijos ← Cruce *(Padres)*
Hijos ← Mutación *(Hijos)*
Calcular_costos (Hijos)
P ← Nueva Población (Padres U Hijos)
End
Return la major solución encontrada;
End

Figura 10: Modular que gestiona las diferentes funciones o etapas del Algoritmo Genético propuesto.

Además, presentan una durabilidad considerable que va de la mano con sus gastos derivados (consumo de combustible y mantenimiento) además de una alta calidad respecto a la comodidad y la seguridad para cumplir con su objetivo principal el cual es lograr una experiencia de traslado óptima. Dicho vehículo cuenta con un motor Cumminis ISB6.7, el cual posee 200 hp (caballos de fuerza) de potencia, 520 libras-pies de torque y 6 cilindros en línea, ocupando cómo combustible diésel, teniendo un consumo de 0.4 litros (400 mililitros) por cada kilómetro recorrido (DINA, 2019). Para calcular el costo de combustible se ocuparán las siguientes variables:

- La distancia total de la ruta (kilómetros)
- El consumo vehicular del autobús (litros por kilómetro)
- El costo del combustible (pesos mexicanos MXN por litro)

Las cuáles serán aplicadas en la siguiente formula:

$$CT = dCvP \tag{18}$$

donde: *CT* es el Costo total del recorrido, *d* es la distancia total de la ruta, *Cv* es el consumo vehicular y *P* indica el precio de combustible.

3. Resultados

Al correr el modelo se obtuvieron tres conjuntos de rutas, cada conjunto posee una ruta de ida y otra de vuelta ya que así se establece en el sistema real.

Respecto a cada explicación de resultados se mostrará el lugar seleccionado, el tipo de nodo, la latitud y la longitud que pertenecen al sistema geodésico de coordenadas geográficas WGS 84 (World Geodesic System 84 – Sistema Geodésico Mundial 84), el cual es usado mundialmente en cualquier herramienta de georreferenciación para localizar cualquier punto de la Tierra por medio de dos unidades dadas (x,y).

También se incluye la ruta o recorrido generado por el Algoritmo Genético, la distancia total del recorrido (km), el tiempo total del recorrido (minutos), el costo de combustible por el recorrido (MXN) y el tiempo interarribo acumulado por parada (minutos), esta información permitirá conocer a detalle cada recorrido para poder realizar un análisis más completo y real. Se muestran las observaciones computacionales con la finalidad de obtener factores informáticos de gran importancia que ayudarán a medir la eficiencia exacta del modelo y compararlo con algún otro método de resolución en algún trabajo futuro. Para ilustrar todas las rutas obtenidas por el modelo, se trazó cada recorrido en la herramienta Google Maps para tener una mejor apreciación dentro de un mapa digital (Figura 11).

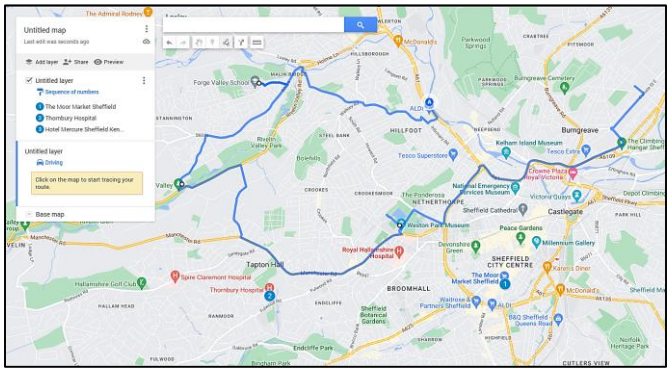

Figura 11: Interfaz de la herramienta de georreferenciación "Google Maps" para ordenador, trazando una ruta.

Es de suma relevancia especificar que parámetros se utilizan para que el Algoritmo Genético pueda desempeñarse de manera adecuada. Entre los parámetros se definen el número de iteraciones, el número de individuos, el nivel de elitismo, la probabilidad de realizar la mutación y el tiempo de espera en cada parada para subir alumnos.

Los valores adecuados de los parámetros para cada ejecución del programa cómo se muestra en la Tabla 1, fueron obtenidos mediante una serie de pruebas con diferentes combinaciones de parámetros y utilizando las entradas obtenidas del código de Pybing para cada recorrido, todo esto es debido a que cada entorno en el que se envuelve es completamente diferente y requiere de un nivel de precisión especial para ajustarse adecuadamente a la naturaleza del problema.

Un aspecto de suma importancia es el método de validación que se está implementando para verificar si el Algoritmo Genético llega al valor óptimo global. En esta cuestión se decidió programar la formulación matemática de la sección 2.4 utilizando el módulo de extensión Gurobipy en Python, de esa forma se pudo obtener el resultado óptimo global de cada recorrido por medio de un método exacto.

Tabla 1: Tabla de parámetros utilizados para el Algoritmo Genético

Recorrido	No. De iteraciones	No. De individuos	Nivel de elitismo	Probabilidad de realización de mutación
CC – ICEA	10	40	4	0.3
ICEA – CC	10	40	4	0.3
TUZOS – CC	10	40	4	0.3
CC – TUZOS	10	40	4	0.3
TULIPANES - CC	40	40	4	0.3
CC - TULIPANES	40	40	4	0.3

La justificación de porque utilizar una metaheurística y no un método exacto, es debido a que el modelo de programación lineal tardaba un tiempo computacional de 15 minutos en obtener el resultado, mientras que el modelo de algoritmo

genético tardaba 2 décimas de segundo en lograrlo, mejorando considerablemente la eficiencia en la obtención de resultados al menos en este contexto del sistema de transporte Garzabús.

3.1 Sistema existente

El primer par de recorridos pertenecen a un conjunto de rutas existente en el Garzabús, con el fin de poder corroborar que el modelo pueda representar la realidad actual del sistema de transporte en el que se está aplicando y así mismo pueda emplearse cómo una técnica de validación.

3.1.1 Ruta Ciudad del Conocimiento – ICEA

Se aprecian en la Tabla 2 los datos de entrada para la asignación de la ruta y en la Tabla 3 los resultados obtenidos mediante el Algoritmo Genético para el recorrido de ida.

Tabla 2: Conjunto de paradas para el recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA con sus respectivas coordenadas.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud
1 (Origen)	Ciudad del Conocimiento	20.09451	-98.71071
2 (Viaje)	Gran Foro (Puente de "El Palmar"; Butron Travel & Tour)	20.10863	-98.77184
3 (Viaje)	ICSa	20.13585	-98.81226
4 (Viaje)	Puente Plaza Q	20.08288	-98.72739
5 (Viaje)	Salones MACROS'S	20.0832	-98.73415
6 (Viaje)	Torres de Rectoría	20.12405	-98.79755
7 (Destino)	ICEA	20.14121	-98.805

Tabla 3: Resultados obtenidos del recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA

Ruta	Distancia total del recorrido (km)	Tiempo total del recorrido (minutos)	Costo de combustible (MXN)
1-4-5-2-6-3-7	17.2	37	$167.52

De igual forma se obtuvieron los diferentes tiempos interarribo acumulados por cada parada asignada de la ruta para presentar un indicador de mayor validez (Tabla 4). Antes de realizar el primer análisis del recorrido generado por el Algoritmo Genético se deben definir dos conceptos que serán utilizados con demasiada frecuencia para el desarrollo de esta sección de resultados, una zona “céntrica” y “no tan céntrica”.

Una zona céntrica dentro del presente contexto se define como un lugar que se encuentra cercano (de 2 a 4 km.) al centro de la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo que es en donde existe mayor movimiento poblacional y por obviedad mayor congestión vehicular. Mientras que una zona no tan céntrica es la que se encuentra ligeramente alejada (de 4 a 8 km.) del centro de la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, estas zonas por lo general no presentan una congestión vehicular alta y el movimiento poblacional es menor en comparación con la zona céntrica.

Cabe designar que el tráfico o las zonas de menor tráfico son parámetros obtenidos del conocimiento que se tiene acerca de la ciudad de Pachuca de Soto y de igual forma apoyándose de la herramienta de georreferenciación Google Maps que indica la afluencia vehicular de cualquier ubicación en tiempo real.

A continuación, se puede apreciar en la Figura 12 que el algoritmo tiende al valor óptimo a partir de la segunda iteración debido al bajo número de nodos contemplados y en la Figura 13 que la ruta pasa por zonas no tan céntricas de Pachuca de Soto y de poco transito haciendo que el tránsito vehicular sea más fluido, disminuya considerablemente el tiempo de tráfico y por ende el autobús llegue a su destino más rápido.

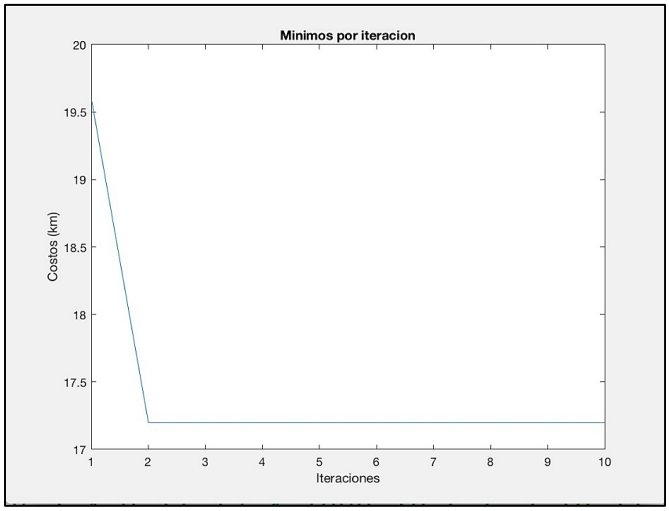

Figura 12: Gráfica de valores mínimos por cada iteración del Algoritmo Genético para el recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA.

Tabla 4: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA

Arribo	Parada	Tiempo interarribo acumulado por parada (minutos)
1	Puente Plaza Q	8
2	Salones MACROS’S	11
3	Gran Foro (Puente de "El Palmar"; Butron Travel & Tour)	19
4	Torres de Rectoría	25
5	ICSa	31
6	ICEA	37

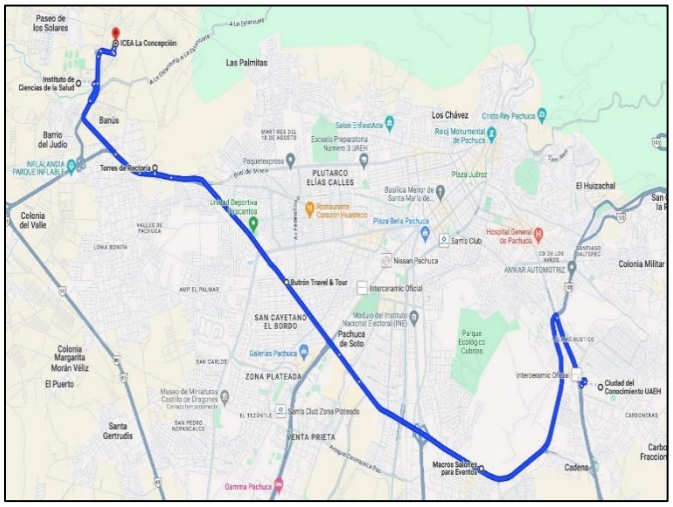

Figura 13: Ruta Ciudad del Conocimiento – ICEA.

3.1.2 Ruta ICEA – Ciudad del Conocimiento

Se exponen en la Tabla 5 los datos de entrada para diseñar el recorrido de vuelta y en la Tabla 6 los resultados generados.

Tabla 5: Conjunto de paradas para el recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento con sus respectivas coordenadas.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud
1 (Origen)	ICEA	20.14121	-98.805
2 (Viaje)	Gran Foro	20.10846	-98.77209
3 (Viaje)	ICSHu	20.12281	-98.79664
4 (Viaje)	ICSa (Bioterio)	20.13590	-98.81260
5 (Viaje)	ICSa (Entrada)	20.13579	-98.81225
6 (Viaje)	Plaza Q	20.08202	-98.72794
7 (Viaje)	Semaforos del Chacón	20.08339	-98.73564

Tabla 6: Resultados obtenidos del recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento.

Ruta	Distancia total del recorrido (km)	Tiempo total del recorrido (minutos)	Costo de combustible por recorrido (MXN)
1-5-4-3-2-7-6-8	18.9	44	$184.09

Los tiempos de parada son de 2 minutos entre cada nodo obteniendo los tiempos de la Tabla 7. Los tiempos de parada que se utilizaron son los mismos valores de los indicadores que se usaron en el recorrido anterior para generar la presente ruta, obteniendo la solución en 0.19 segundos.

Tabla 7: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	ICSa (Entrada)	4
2	ICSa (Bioterio)	7
3	ICSHu	15
4	Gran Foro	21
5	Semáforos del Chacón (Punto Café)	30
6	Plaza Q	35
7	Ciudad del Conocimiento	44

Se observa en la Figura 14 que el algoritmo tiende al valor óptimo a partir de la quinta iteración debido a que se aumentó un nodo al recorrido incrementando la búsqueda de soluciones. De igual manera se presenta en la Figura 15 que la ruta pasa por zonas más céntricas que el recorrido de ida, haciendo que exista mayor congestión vehicular y el recorrido demore más en llegar a su destino.

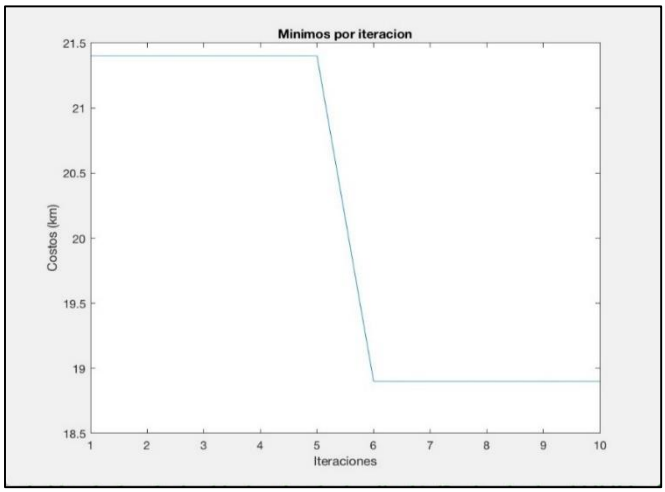

Figura 14: Gráfica de valores mínimos por cada iteración del Algoritmo Genético para el recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento.

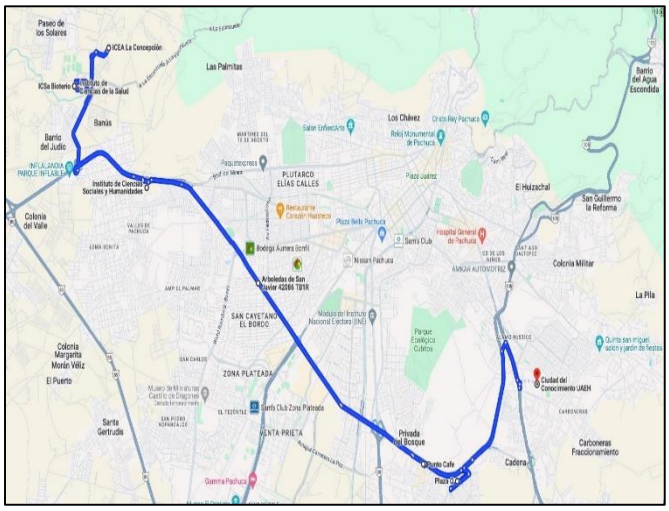

Figura 15: Ruta ICEA - Ciudad del Conocimiento.

3.1.3 *Programación de horarios*

Este par de recorridos ya tiene definidos sus horarios los cuales se muestran en la Tabla 8 y la Tabla 9, teniendo en cuenta la afluencia de alumnos que existe en ambos institutos para poder atender la mayor demanda de usuarios posibles y, por ende, las rutas funcionen adecuadamente para la comunidad universitaria.

Tabla 8: Paradas oficiales del recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA.

Ruta Ciudad del Conocimiento - ICEA	
6:10, 7:10, 8:10, 11:10, 12:10, 12:10, 14:10, 15:10, 16:10, 17:10 y 18:10	
No.	Parada
1	Ciudad del Conocimiento
2	Puente Plaza Q
3	Salones MACROS'S
4	Gran Foro (Puente de "El Palmar"; Butron Travel & Tour)
5	Torres de Rectoría
6	ICSa
7	ICEA

Tabla 9: Paradas oficiales del recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento

Ruta ICEA - Ciudad del Conocimiento	
11:05, 12:05, 13:05, 14:05, 15:05, 16:05, 17:05, 18:05, 19:05, 20:05 y 21:05	
No.	**Parada**
1	ICEA
2	ICSa (Entrada)
3	ICSa (Bioterio)
4	ICSHu
5	Gran Foro (Arboledas de San Javier 42086 TB1R)
6	Semáforos del Chacón (Punto Café)
7	Plaza Q
8	Ciudad del Conocimiento

3.1.4 *Propuesta con nodos existentes que no considerados para la población*

El segundo par de recorridos es tomando las de paradas ya existentes en el sistema de transporte pero que no benefician a la comunidad estudiantil de Ciudad del Conocimiento – UAEH, la cual es la población de interés en la presente investigación. A continuación, se muestran los datos de entrada y los resultados generados para el primer recorrido (Tabla 10 y Tabla 11).

Tabla 10: Conjunto de paradas para el recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento con sus respectivas coordenadas.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud
1 (Origen)	Tuzos Paradero (Esq. Río de las Avenidas)	20.5555	-98.75336
2 (Viaje)	Caseta de Tulipanes	20.06004	-98.76798
3 (Viaje)	Gasolinera Mobil Quinta Bonita (Blvd Nuevo Hidalgo Puente Peatonal OXXO)	20.06631	-98.77086
4 (Viaje)	Parada Colinas del Valle (Esq. Edificio PRI Pachuca)	20.09663	-98.75982
5 (Viaje)	Parada Esq. Plaza Bella	20.11337	-98.74667
6 (Viaje)	Parque Pasteur (Frente al Centro de Salud)	20.1177	-98.73062
7 (Viaje)	Puente SAMS Club	20.11332	-98.74311
8 (Destino)	Ciudad del Conocimiento	20.09234	-98.70975

Tabla 11: Resultados obtenidos del recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento.

Ruta	Distancia total del recorrido (km)	Tiempo total del recorrido (minutos)	Costo de combustible por el recorrido (MXN)
1-2-3-4-5-7-6-8	17.1	47	$166.55

Se toman en cuenta dos minutos por cada parada que realiza obteniendo los tiempos de la Tabla 12. En cuanto a los aspectos informáticos del modelo se establecen los mismos parámetros utilizados en el apartado anterior tardando en encontrar una solución en el mismo tiempo computacional de 0.19 segundos.

Tabla 12: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento - ICEA

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	Caseta de Tulipanes	7
2	Gasolinera Mobil Quinta Bonita (Blvd Nuevo Hidalgo Puente Peatonal OXXO)	12
3	Parada Colinas del Valle (Esq. Edificio PRI Pachuca)	20
4	Parada Esq. Plaza Bella	28
5	Puente SAMS Club	31
6	Parque Pasteur (Frente al Centro de Salud)	37
7	Ciudad del Conocimiento	47

En la Figura 16 se puede observar el algoritmo tiende a valor óptimo a partir de la segunda iteración debido a que e recorrido posee una cantidad baja de nodos lo cual resulta más sencillo para poder encontrar la mejor secuenciación de ruta. Son señalados en la Tabla 13 los datos de entrada y en la Tabla 14 los resultados generados para el segundo recorrido.

En la Figura 17 se puede ver que la ruta toma en cuenta lugares bastante transitados en los cuales radica una gran parte de la población de Pachuca de Soto, ya que son lugares bastante céntricos, eso quiere decir que el recorrido va a lograr satisfacer de excelente manera a la comunidad universitaria debido a la selección estratégica de zonas.

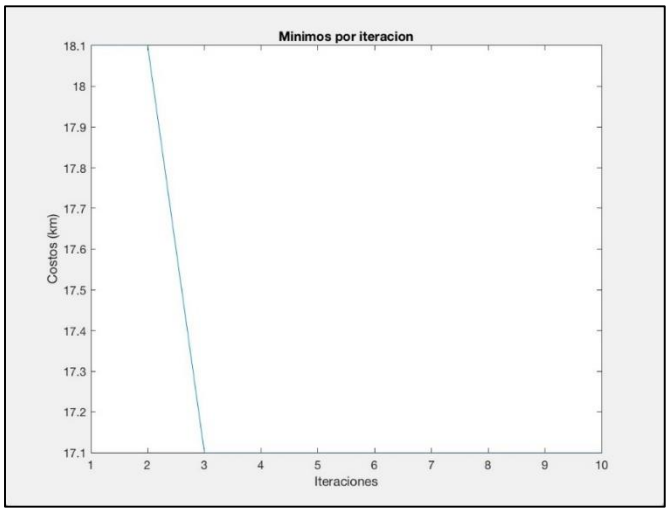

Figura 16: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento.

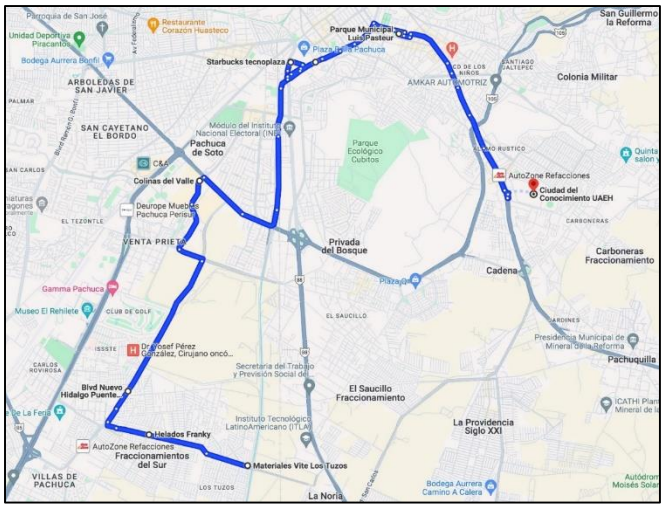

Figura 17: Ruta Tuzos – Ciudad del Conocimiento.

Tabla 13: Conjunto de paradas para el recorrido Ciudad del Conocimiento – Tuzos con sus respectivas coordenadas.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud
1 (Origen)	Ciudad del Conocimiento	20.09451	-98.71071
2 (Viaje)	Bombonera Estadio	20.06161	-98.77469
3 (Viaje)	Caseta de Tulipanes	20.05983	-98.7679
4 (Viaje)	Parque Pasteur (Enfrente de la Facultad de Medicina UAEH Ramírez Ulloa)	20.11675	-98.73061
5 (Viaje)	Puente Río de las Avenidas (Parte de atrás de Plaza Bella)	20.11353	-98.74345
6 (Viaje)	Soriana del Valle	20.09654	-98.76050
7 (Destino)	Tuzos paradero (Casi esq. Río de las Avenidas)	20.05566	-98.75444

Tabla 14: Resultados obtenidos del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos.

Ruta	Distancia total del recorrido (km)	Tiempo total del recorrido (minutos)	Costo de combustible por el recorrido (MXN)
1-4-5-6-2-3-7	15.25	46	$148.53

3.1.5 Ruta Ciudad del Conocimiento – Tuzos

Se ocuparán los mismos parámetros de implementación del Algoritmo Genético obteniendo el mismo tiempo computacional para encontrar una solución. También se vuelve a utilizar un tiempo de parada de 2 minutos para cada asentamiento, obteniendo los tiempos de recorrido mostrados en la Tabla 15.

Se puede apreciar en la Figura 18 que el algoritmo tiende al valor óptimo inmediatamente (a partir de la segunda iteración) debido a que el recorrido posee una cantidad baja de paradas y en consecuencia la búsqueda del valor óptimo dentro de la población de individuos generada por el Algoritmo Genético resulte mucho más sencilla.

De igual forma, se muestra en la Figura 19 la ruta trazada en un mapa digital y se observa que la ruta pasa por zonas demasiado céntricas de la ciudad en donde existe mayor tránsito vehicular, pero esto logra beneficiar a una parte considerable de la población de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ya que estas zonas fueron bastante solicitadas mediante el sondeo previo a la selección de asentamientos.

Tabla 15: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos.

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	Parque Pasteur (Enfrente de la Facultad de Medicina UAEH Ramírez Ulloa)	10
2	Puente Río de las Avenidas (Parte de atrás de Plaza Bella)	15
3	Soriana del Valle	25
4	Bombonera Estadio	35
5	Caseta de Tulipanes	39
6	Tuzos paradero (Casi esq. Río de las Avenidas)	46

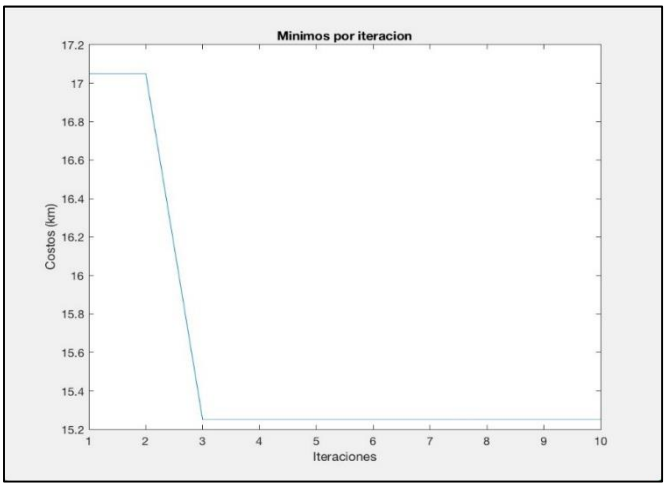

Figura 18: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos.

3.1.6 Programación de horarios

Para el primer recorrido, la ruta Tuzos - Ciudad del Conocimiento, el cual se muestra en la Tabla 16, tiene como objetivo beneficiar a la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento que pretende llegar a sus primeras clases.

Mientras que el segundo recorrido, la ruta Ciudad del Conocimiento – Tuzos mostrado en la Tabla 17, se encarga de dejar a los alumnos cerca de sus domicilios al acabar su jornada académica.

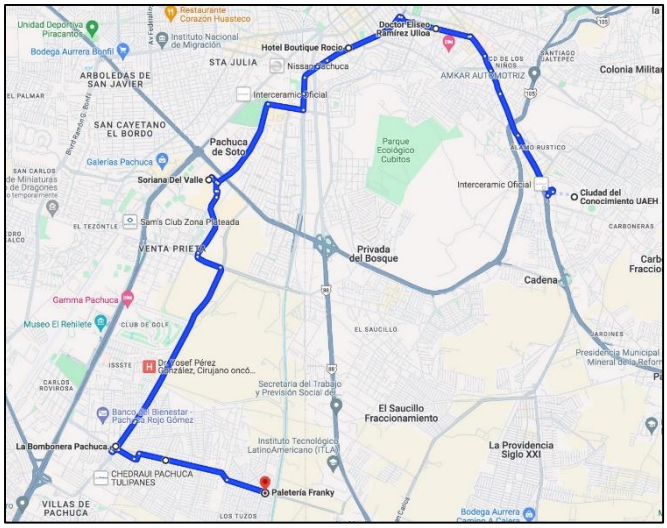

Figura 19: Ruta Ciudad del Conocimiento - Tuzos.

Tabla 16: Paradas oficiales del recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento.

Ruta Tuzos - Ciudad del Conocimiento 6:05, 7:05, 8:05, 12:05, 13:05 y 14:05	
No.	Parada
1	Tuzos Paradero (Esq. Río de las Avenidas)
2	Caseta de Tulipanes
3	Gasolinera Mobil Quinta Bonita (Blvd Nuevo Hidalgo Puente Peatonal OXXO)
4	Parada Colinas del Valle (Esq. Edificio PRI Pachuca)
5	Parada Esq. Plaza Bella
6	Puente SAMS Club
7	Parque Pasteur (Frente al Centro de Salud)
8	Ciudad del Conocimiento

Tabla 17: Paradas oficiales del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos

Ruta Ciudad del Conocimiento - Tuzos 13:05, 14:05, 15:05, 16:05, 19:05, 20:05 y 21:05	
No.	Parada
1	Ciudad del Conocimiento
2	Parque Pasteur (Enfrente de la Facultad de Medicina UAEH Ramírez Ulloa)
3	Puente Río de las Avenidas (Parte de atrás de Plaza Bella)
4	Soriana del Valle
5	Bombonera Estadio
6	Caseta de Tulipanes
7	Tuzos paradero (Casi esq. Río de las Avenidas)

Es importante mencionar que cada recorrido del conjunto pretende beneficiar tanto al turno matutino cómo al vespertino por lo que cada ruta considera horarios en diferentes partes del día, dándole prioridad al objetivo destinado para la ruta (llegar puntual a las clases y dejar a los alumnos cerca de sus domicilios) más no a los turnos de cada jornada como en el anterior conjunto de rutas ya existentes. Debe realizarse esta mención ya que permite un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema de transporte que se está estudiando y el objetivo de la programación que se está efectuando para cada recorrido

3.1.7 Propuesta con nodos elegidos por la población

Para el último conjunto de recorridos se consideran diferentes asentamientos propuestos por el alumnado mediante la aplicación de un sondeo, de igual modo tuvo que realizarse un análisis en la vialidad con herramientas de georreferenciación cómo Google Maps para verificar si el lugar propuesto es realmente viable para el Garzabús y por ende pueda realizar una parada sin ningún inconveniente.

Cabe resaltar que para encontrar una solución óptima se tuvo que incrementar el número de iteraciones a 40 debido a que se incrementaron el número de asentamientos seleccionados para el recorrido y por ende la región factible de soluciones es más grande y el Algoritmo Genético le cuesta un poco más de trabajo hallar una solución óptima.

3.1.8 Ruta Tulipanes - Ciudad del Conocimiento

Este valor elegido para el parámetro anteriormente mencionado fue determinado mediante una serie de pruebas en las que se ocuparon las entradas, es decir la matriz de distancias y la matriz de tiempos obtenidas por el código Pybing para este escenario en particular empezando con el número anterior de iteraciones que eran 10 e ir incrementando los intervalos de 5 en 5. Se muestran en la Tabla 18 los datos de entrada del recorrido de ida y en la Tabla 19 los resultados generados por el Algoritmo Genético para la última propuesta.

Tabla 18: Conjunto de paradas para el recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento con sus respectivas coordenadas.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud
1 (Origen)	Caseta de Tulipanes	20.05977	-98.76795
2 (Viaje)	1er. Puente de Parque Los Encinos	20.0551	-98.74164
3 (Viaje)	2do. Puente de San Fernando (Av. Las Torres)	20.0377	-98.73155
4 (Viaje)	Arco de entrada Fraccionamiento Providencia	20.069	-98.7161
5 (Viaje)	Farmacia Guadalajara Paseos de Chavarría	20.04342	-98.73135
6 (Viaje)	Gasolinera bp	20.05703	-98.75911
7 (Viaje)	Gasolinera Shell Paseos de Chavarría	20.04252	-98.72766
8 (Viaje)	OXXO de Forjadores	20.05879	-98.76316
9 (Viaje)	Paradero San Cristóbal Providencia	20.05879	-98.71523
10 (Viaje)	Paseo de las Reynas (Tienda El Zorro)	20.08557	-98.71263
11 (Viaje)	Valle de las estrellas (3B Circuito Providencia)	20.05619	-98.71539
12 (Destino)	Ciudad del Conocimiento	20.09234	-98.70975

Tabla 19: Resultados obtenidos del recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento.

Ruta	Distancia total del recorrido (km)	Tiempo total del recorrido (minutos)	Costo de combustible por el recorrido (MXN)
1-8-6-2-3-5-7-11-9-4-10-12	15.7	33	$152.02

Para poder encontrar una solución óptima se incrementó el número de iteraciones a 40 debido a que se incrementaron el número de asentamientos seleccionados para el recorrido. El tiempo computacional para hallar una solución incremento a 0.3 segundos. A continuación, se muestran en la Tabla 20 los tiempos inter-arribo que se obtuvieron para el recorrido considerando dos minutos de parada para arribar estudiantes.

Tabla 20: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos.

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	OXXO de Forjadores	3
2	Gasolinera bp	5
3	1er. Puente de Parque Los Encinos	9
4	2do. Puente de San Fernando (Av. Las Torres)	15
5	Farmacia Guadalajara Paseos de Chavarría	16
6	Gasolinera Shell Paseos de Chavarría	17
7	Valle de las estrellas (3B Circuito Providencia)	23
8	Paradero San Cristóbal Providencia	24
9	Arco de entrada Fraccionamiento Providencia	27
10	Paseo de las Reynas (Tienda El Zorro)	30
11	Ciudad del Conocimiento	33

Se logra observar en la Figura 20 que el algoritmo se estanca en un primer mínimo local con un valor de 35 km. a partir de la quinta iteración cayendo ligeramente en la novena iteración a 34 km. después logra bajar a otro mínimo local de 27 km. en la onceava iteración, más adelante logra bajar a 18 km. en la quinceava iteración, y finalmente llega al mínimo global en la dieciochoava iteración con un valor de 15.7 km.

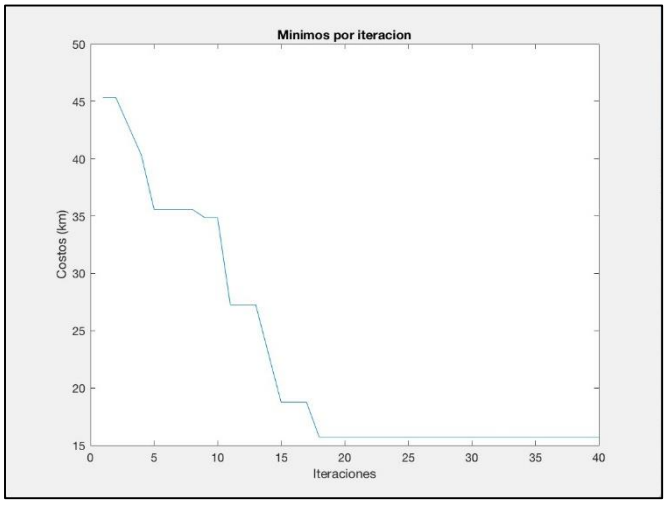

Figura 20: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos.

En la Figura 21 se muestra la ruta trazada en un mapa digital por lo que se puede observar que el recorrido pasa por zonas que no son céntricas en Pachuca de Soto y sus alrededores pero que sin embargo consideran una gran parte de la comunidad estudiantil necesitada ya que existe muy poco transporte público que pasa por esas zonas. Un gran aspecto a destacar es que debido a que el recorrido considera zonas aledañas de la ciudad no existe tanto tráfico y eso beneficia considerablemente le eficiencia de la ruta disminuyendo de gran manera el tiempo de traslado, la distancia recorrida y por

ende el costo de combustible. Se logran exhibir en la Tabla 21 los datos de entrada para el diseño del recorrido de vuelta y en la Tabla 22 los resultados generados por medio del Algoritmo Genético

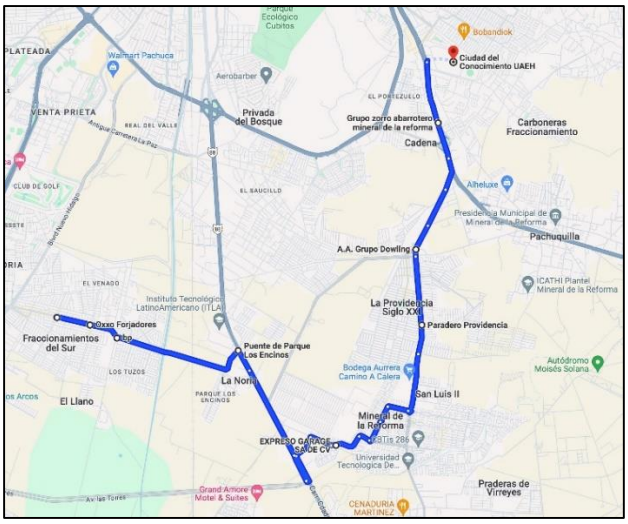

Figura 21: Ruta Tulipanes - Ciudad del Conocimiento.

3.1.9 Ruta Ciudad del Conocimiento - Tulipanes

Tabla 21: Conjunto de paradas para el recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes con sus respectivas coordenadas.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud
1 (Origen)	Ciudad del Conocimiento	20.09508	-98.71433
2 (Viaje)	1er. Puente de Paseo de las Reinas	20.08433	-98.7127
3 (Viaje)	2do. Puente de Parque los Encinos	20.05527	-98.74193
4 (Viaje)	Bodega Aurrera Entrada de Providencia	20.06973	-98.71595
5 (Viaje)	Bodega Aurrera L Providencia Siglo XXI	20.05146	-98.71635
6 (Viaje)	Fraccionamiento San Cristóbal	20.05881	-98.71565
7 (Viaje)	Frente a Gasolinera bp Esq. Parada Tuzobus	20.0573	-98.75928
8 (Viaje)	OXXO Paseos de Chavarría	20.04395	-98.73152
9 (Viaje)	Rinconadas del Venado	20.05892	-98.76294
10 (Viaje)	Tienda 3B Paseos de Chavarría	20.04251	-98.72538
11 (Destino)	Caseta de Tulipanes	20.06004	-98.76798

Tabla 22: Resultados obtenidos del recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento.

Ruta	Distancia total del recorrido (km)	Tiempo total del recorrido (minutos)	Costo de combustible por el recorrido (MXN)
1-2-4-6-5-10-8-3-7-9-11	13.37	40	$130.26

Se utilizan los mismos parámetros que el recorrido anterior para la ejecución del Algoritmo Genético, tardando el mismo tiempo computacional en encontrar la solución óptima, también se muestran los diferentes tiempos entre cada parada en la Tabla 23. Se aprecia bastante uniformidad de tiempos entre cada arribo esto es debido a la selección de los asentamientos que pretenden beneficiar a la población de estudiantes.

Tabla 23: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes.

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	1er. Puente de Paseo de las Reinas	4
2	Bodega Aurrera Entrada de Providencia	7
3	Fraccionamiento San Cristóbal	10
4	Bodega Aurrera L Providencia Siglo XXI	12
5	Tienda 3B Paseos de Chavarría	17
6	OXXO Paseos de Chavarría	18
7	2do. Puente de Parque los Encinos	21
8	Frente a Gasolinera bp Esq. Parada Tuzobus	26
9	Rinconadas del Venado	27
10	Caseta de Tulipanes	29

El programa tardo un poco más en encontrar el óptimo global cómo se puede apreciar en la Figura 22, primeramente, él algoritmo se estanca en el mínimo local de 24 km. antes de llegar a la quinta iteración, posterior a ello gracias a la etapa de mutación logra salir del mínimo local en la séptima iteración y se vuelve a ubicar en otro mínimo local de 18 km. finalmente en la onceava iteración logra el mínimo global del recorrido, que son los 13.37 km.

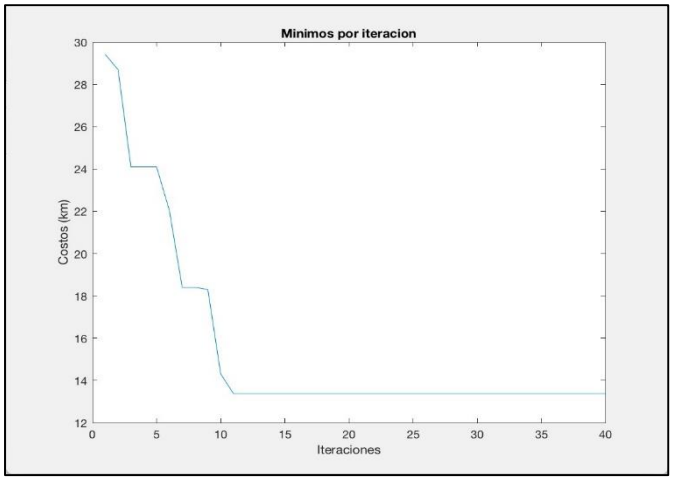

Figura 22: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes.

Por último, se muestra en la Figura 23 que la presente ruta se mueve por lugares alejados de las zonas céntricas de Pachuca, al igual que la ruta de ida creada anteriormente, mejorando su afluencia debido a la baja congestión vehicular de las ubicaciones previamente seleccionadas, mejorando mayormente sus tiempos de traslado y disminuyendo la distancia total recorrida.

3.1.10 Programación de horarios

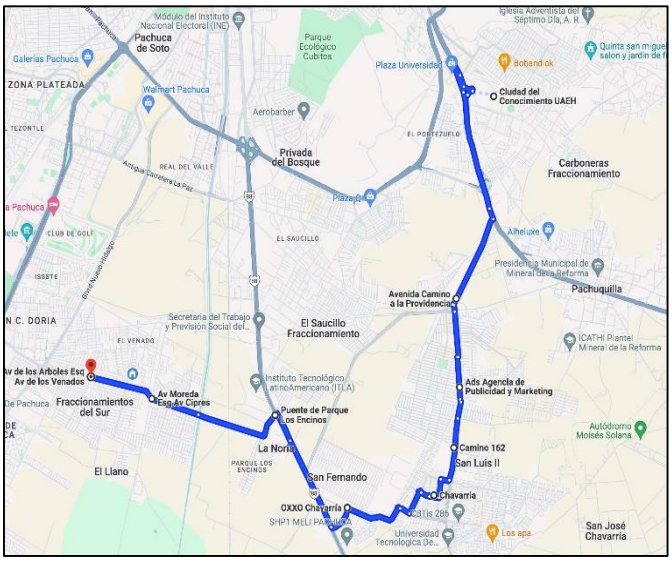

Figura 23: Ruta Ciudad del Conocimiento – Tulipanes

Para el presente conjunto de rutas se utilizará el mismo criterio abordado en la propuesta de nodos ya existentes pero que no son considerados para la población de Ciudad del Conocimiento, centrándose en el objetivo de cada recorrido, el dejar a los estudiantes a sus primeras clases (ruta Tulipanes - Ciudad del Conocimiento) y de igual forma poder llevarlos cerca de sus domicilios al momento de finalizar dichas clases (ruta Ciudad del Conocimiento – Tulipanes).

Pero a diferencia de la propuesta anterior, se propondrán los horarios que fueron mayormente seleccionados en el sondeo realizado a los alumnos. A continuación, se presentarán en la Tabla 24 y la Tabla 25 los horarios de la última propuesta y también se saldrá del punto de origen 10 minutos después debido al corto tiempo que dura el recorrido, dando así más minutos a los alumnos para que puedan arribar el autobús.

Tabla 24: Paradas oficiales del recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento.

Ruta Tulipanes - Ciudad del Conocimiento 6:10, 7:10, 8:10, 12:10, 13:10 y 14:10	
No.	Parada
1	Caseta de Tulipanes
2	OXXO de Forjadores
3	Gasolinera bp
4	1er. Puente de Parque Los Encinos
5	2do. Puente de San Fernando (Av. Las Torres)
6	Farmacia Guadalajara Paseos de Chavarría
7	Gasolinera Shell Paseos de Chavarría
8	Valle de las estrellas (3B Circuito Providencia)
9	Paradero San Cristóbal Providencia
10	Arco de entrada Fraccionamiento Providencia
11	Paseo de las Reynas (Tienda El Zorro)
12	Ciudad del Conocimiento

3.2 Análisis de resultados

Se presentará un análisis comparativo entre los diferentes resultados obtenidos para ver si las propuestas generadas en la investigación suelen ser una solución viable en comparación con los recorridos que ya existen. Para ello se realizó una tabla comparativa mostrada en la Tabla 26 entre los diferentes recorridos obtenidos en donde se aprecian la distancia recorrida (en kilómetros), el costo de combustible (en pesos mexicanos MXN), el tiempo total del recorrido (en minutos) y el tiempo computacional de ejecución del Algoritmo Genético (en segundos) para llevar a cabo un análisis más profundo y minucioso y de esa forma se logre una interpretación completa para enriquecer la sección de resultados del artículo.

Tabla 25: Paradas oficiales del recorrido Ciudad del Conocimiento.- Tulipanes

Ruta Ciudad del Conocimiento -Tulipanes 13:10, 14:10, 15:10, 16:10, 19:10, 20:10 y 21:10	
No.	Parada
1	Caseta de Tulipanes
2	OXXO de Forjadores
3	Gasolinera bp
4	1er. Puente de Parque Los Encinos
5	2do. Puente de San Fernando (Av. Las Torres)
6	Farmacia Guadalajara Paseos de Chavarría
7	Gasolinera Shell Paseos de Chavarría
8	Valle de las estrellas (3B Circuito Providencia)
9	Paradero San Cristóbal Providencia
10	Arco de entrada Fraccionamiento Providencia
11	Paseo de las Reynas (Tienda El Zorro)
12	Ciudad del Conocimiento

Tabla 26: Comparación de diferentes parámetros de los recorridos generados por el modelo de optimización.

Recorrido	Distancia total del recorrido (km)	Tiempo total del recorrido (minutos)	Costo de combustible por el recorrido (MXN)	Tiempo computacional (segundos)
CC – ICEA	17.2	37	$162.52	0.18
ICEA – CC	18.9	44	$184.09	0.19
TUZOS – CC	17.1	47	$166.55	0.19
CC – TUZOS	15.25	46	$148.53	0.19
TULIPANES - CC	15.7	41.5	$152.02	0.3
CC - TULIPANES	13.37	40	$130.26	0.3

Se puede observar que el sistema de rutas más óptimo en relación a la distancia total y a los costos de combustible para la puesta en marcha del mismo, es la propuesta realizada con la opinión de los estudiantes (rutas TULIPANES – CC y CC – TULIPANES) debido a que pasa por zonas que son aledañas a la ciudad de Pachuca de Soto en donde no existe congestión vehicular gracias a la selección estratégica de los asentamientos, pero que a la vez habita una gran parte de la población del Ciudad del Conocimiento que necesita ocupar el Garzabús, esto quiere decir que es una gran propuesta que resulta rentable, económica y que sobre todo es benéfica para el alumnado.

Por el contrario, la propuesta menos óptima tomando en cuenta los parámetros de distancia y costo es la existente en el sistema de transporte Garzabús ya que recorre demasiada distancia y por ende consume más combustible incrementando los costos de ejecución, desafortunadamente cumple con otra desventaja importante de considerar, la cual es que cuenta con muy pocas paradas reduciendo su beneficio considerablemente para el par de instituciones a las que sirve.

Otro aspecto a considerar es la eficiencia, para medirla tomaremos en cuenta al parámetro del tiempo de recorrido, en donde el sistema de rutas más eficiente es el existente esto es debido a que pasa por zonas no tan transitadas y de igual forma agarra autopistas en donde el flujo vehicular es mucho más rápido, de igual forma se contemplan pocos asentamientos de parada haciendo que el vehículo no se detenga muchas veces y por obviedad llegue en mucho menos tiempo a su destino. Pero no hay que quitar merito que la propuesta realizada por asentamientos elegidos por alumnos que también maneja una eficiencia bastante alta aun pasando por muchas más zonas de interés y teniendo una mayor cantidad de paradas (doce) en comparación con la existente que solo contempla muy pocas paradas (cuatro).

Finalmente se toma en cuenta el apartado que considera el tiempo computacional que tarda el Algoritmo Genético en encontrar una solución óptima, lo cual para las tres propuestas se muestra altamente eficiente y no se encuentra una diferencia notable entre cada una de estas, ya que para todas se encuentra una respuesta en menos de medio segundo debido a la velocidad que caracteriza los métodos de optimización metaheurísticos.

Conclusiones

Los modelos de optimización desempeñan un papel crucial en la ingeniería debido a su capacidad para mejorar la eficiencia, reducir costos y maximizar el rendimiento de una amplia gama de aplicaciones de igual forma proporcionan a los ingenieros herramientas cuantitativas para mejorar la toma de decisiones en el campo laboral y en la investigación.

Los resultados obtenidos muestran un conjunto de rutas que cumplen en tiempo para la puesta en marcha de las mismas siguiendo los lineamientos y la logística del sistema de transporte universitario Garzabús, de igual forma mantienen un costo de implementación accesible y esto lograría ser beneficioso para la institución, pero sobre todo logran satisfacer diversas zonas de interés que no habían sido tomadas en cuenta pero que sin duda apoyarían las necesidades de transporte y a su vez económicas de la población estudiantil.

Un aspecto importante que se debe tomar en cuenta es que el diseño de nuevas rutas para el sistema de transporte escolar Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo tiene el potencial de mejorar significativamente la experiencia diaria de la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento.

La integración de técnicas tecnológicas avanzadas, cómo la programación de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) en Python y Algoritmos Genéticos en MATLAB permite una alta precisión y eficiencia en el diseño de las rutas.

Este enfoque no solo optimiza el sistema de transporte escolar, sino que también promete mejorar la puntualidad y reducir el estrés asociado con los desplazamientos diarios, contribuyendo así a un entorno académico más favorable para los estudiantes del ICBI. En última instancia, la implementación de este modelo representa un paso significativo hacia la modernización y eficiencia del transporte escolar en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, beneficiando a la comunidad universitaria en su conjunto.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado gracias al apoyo del CONAHCYT como becario con número de registro 1231823, de igual forma a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, específicamente del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura por permitirme utilizar sus instalaciones y equipo para poder desarrollar el presente proyecto, a mi comité de profesores investigadores quienes me asesoraron de la mejor manera brindándome su tiempo y sobre todo sus grandes consejos, y a mi madre quién fue mi más grande motivo e inspiración para salir adelante y poder llevar a cabo esta gran experiencia.

Referencias

Ballou, R. (2004). *Logística, administración de la cadena de suministro.* México: Prentice Hall.

Cadena F. (2019). *Más rutas del Garzabús para apoyar tu economía.* Obtenido el 3 de mayo de 2023 de Gaceta UAEH: https://www.uaeh.edu.mx/gaceta/1/numero6/agosto/garzabus.html

Cogollo-Florez, J.M. (2017). Métodos exactos y heurísticos en la solución de problemas de redes de transporte en las cadenas de suministros. *Lupa Empresarial*, 44-63.

Dantzing, G.B., Fulkerson, S.M., & Johnson, S.M. (1954). Solutions of a large-scale traveling salesman problem. *Ops Res. 2*, 383-410.

Davis, L. (1991). *Handbook of genetic algorithms.* New York: Van Nostrand Reinhold.

Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection.* New York: D. Appleton And Company.

DINA. (2019). *La ruta hacia una mejor inversión.* Obtenido el 2 de abril de 2024 de DINA: https://dina.com.mx/autobuses

El-Rabbany, A. (2020). *Introduction to GPS: The Global Positioning System (3rd ed.).* Norwood, MA: Artech House.

Educa EDTECH BV. (2023). *Transporte escolar*. Obtenido el 23 de septiembre de 2023 de Red Educa: https://www.rededuca.net/contexto-educativo/t/transporte-escolar

Fuentes-Penna, A. (s.f.*). Problema del Agente Viajero*. Obtenido el 16 de mayo de 2024 de UAEH,

Google Play. (s.f.). *GARZABUS – UAEH.* Obtenido el 30 de agosto de 2024 de Google Play: https://play.google.com/store/apps/details?id=edu.uaeh.garzabuscedai

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.* Addison-Wesley.

Gutiérrez, A. (2012). ¿Qué es la movilidad? Elementos para (re) construir las definiciones básicas del campo del transporte. *Dossier Central, 21*, 61-74.

Haupt, R. L., & Haupt, S.E. (2004). *Practical Genetic Algorithms.* Wiley: New York.

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones.* McGraw Hill: México D.F.

Jiménez-Carrión, M., Jiménez-Panta, A. B., Coaquira-Velásquez, M. A. (2023). Algoritmo evolutivo generador de rutas eficientes para el transporte público. *Información Tecnológica*, 34, 71-88.

Jiménez-Sánchez, J.E. (2018*). Impacto del precio del diésel y otros insumos en los costos de operación del autotransporte de carga.* Obtenido el 26 de agosto de 2024 del Instituto Mexicano del Transporte

Microsoft Support. (s.f.). *Usar el elemento web Mapas de Bing.* Obtenido el 30 de agosto de 2024 de Microsoft:

Ortega-Ortega, J. (2017). *Metodología y aplicación del dimensionamiento del transporte escolar en el Cantón Cuenca.* Obtenido el 28 de agosto de 2024 del Departamento de Posgrados de la Universidad del Azuay: https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6740/1/12736.pdf

Park, J., & Kim, B. I. I. (2009). The school bus routing problem: A review. *European Journal Of Operational Research, 202*, 311-319.

Pérez-Peña, R. (2019). *Introducción a los modelos de optimización.* Bogota: Universidad Piloto de Colombia.

Taha, H. (2012). *Investigación de Operaciones.* México: Pearson.

Toso, R. G., & Toth, P. (1994). The traveling salesman problem with a constraint on the total tour length: A survey. Combinatorial Optimization: *Eureka, You Shrink!* 456-465.

Vickerman, R. (2024). The transport problem: The need for consistent policies on pricing and investment. *Transport Policy, 149*, 49-58.

Villegas, J., Zapata, J., & Gatica, G. (2017). Una aplicación del método MTZ a la solución del problema del agente viajero. *Scientia et Technica Año XXII. 22*, 341-34