



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E
INGENIERÍA**

**“Optimización de rutas del transporte
escolar de la Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo mediante un Algoritmo
Genético Modificado”**

T E S I S

Que para obtener el título de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

Presenta:

ING. IAN ANDRÉS QUIJANO CRISÓSTOMO

Director de tesis:

DR. JUAN CARLOS SECK TUOH MORA

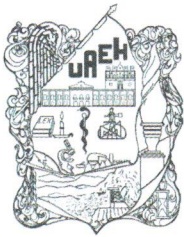
Co-director de tesis:

DR. JOSELITO MEDINA MARÍN

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO, MÉXICO



Diciembre 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Área Académica de Ingeniería y Arquitectura

Department of Engineering and Architecture

13/Noviembre/2024

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar
Presente

El Comité Tutorial de la tesis de posgrado titulada **Optimización de rutas del transporte escolar de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo mediante un Algoritmo Genético Modificado**, realizada por el sustentante **Ian Andrés Quijano Crisóstomo** con número de cuenta **316195**, perteneciente al programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Industrial**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente


“Amor, Orden y Progreso”

Mineral de la Reforma, Hidalgo a 13 de noviembre de 2024

El Comité Tutorial


Dr. Juan Carlos Seck Tuoh Mora
Director


Joselito Medina Marín
Codirector


Dr. Norberto Hernández Romero
Miembro del comité


Dr. Gustavo Erick Anaya Fuentes
Miembro del comité



Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P. 42184
Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 4000, 4001
Fax 2109
aai_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

Resumen

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño y optimización de nuevas rutas para el sistema de transporte escolar Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), con el objetivo de beneficiar a la población estudiantil del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) o Ciudad del Conocimiento (CC). Para ello, se propone un modelo de optimización que utiliza Algoritmos Genéticos, desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB, que permite simular y encontrar soluciones efectivas a la problemática del transporte escolar.

Adicionalmente, se adoptará la metodología del Problema del Agente Viajero con Ruta de Paseo (PAV-RP), la cual ofrece una representación precisa del entorno y las necesidades de movilidad de los estudiantes. Este enfoque permitirá abordar de manera integral la optimización de las rutas, teniendo en cuenta no solo la distancia, sino también otros factores críticos que afectan la eficiencia del transporte.

La investigación también incorpora diversas herramientas tecnológicas, entre las que destaca la programación de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) en el lenguaje de programación Python. Esta API se utilizará para recopilar datos de entrada, tales como distancias de carretera y tiempos de tráfico reales, que son fundamentales para la correcta parametrización del modelo.

El resultado de este modelo ofrecerá información valiosa, incluyendo el recorrido óptimo, la distancia total recorrida, el tiempo de tráfico interarribo por cada parada y el costo total del recorrido, considerando el consumo vehicular y el precio del combustible. Esta información no solo proporcionará un mejor panorama de la propuesta, sino que también contribuirá a la toma de decisiones informadas para mejorar la calidad del servicio de transporte escolar, optimizando así la experiencia de los estudiantes que utilizan este sistema.

Palabras clave: *Modelo de Optimización, Rutas, Sistema, Transporte Escolar, Programación, Algoritmo Genético, Problema del Agente Viajero.*

Abstract

This research focuses on the design and optimization of new routes for the Garzabús school transportation system of the Autonomous University of the State of Hidalgo (UAEH), with the aim of benefiting the student population of the Institute of Basic Sciences and Engineering (ICBI) or City of Knowledge (CK). To this end, an optimization model is proposed that uses Genetic Algorithms, developed in the MATLAB programming language, which allows simulating and finding effective solutions to the problem of school transportation.

Additionally, the Traveling Agent Problem with Walking Route (TSP-WR) methodology will be adopted, which offers an accurate representation of the environment and the mobility needs of students. This approach will allow a comprehensive approach to route optimization, taking into account not only the distance, but also other critical factors that affect transportation efficiency.

The research also incorporates various technological tools, among which the programming of an Application Programming Interface (API) in the Python programming language stands out. This API will be used to collect input data such as actual road distances and traffic times, which are critical for the correct parameterization of the model.

The output of this model will provide valuable information, including the optimal route, the total distance traveled, the inter-arrival traffic time for each stop, and the total cost of the trip, considering vehicle consumption and fuel price. This information will not only provide a better overview of the proposal, but will also contribute to making informed decisions to improve the quality of the school transportation service, thus optimizing the experience of students using this system.

Keywords: *Optimization Model, Routes, System, School Transportation, Programming, Genetic Algorithm, Traveling Salesman Problem.*

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer **a Dios** por permitirme ser parte de la creación y brindarme la energía y la inspiración divina de poder levantarme todos los días para seguir creciendo, aprendiendo y evolucionando cómo persona y poder contribuir al mundo de la mejor manera posible.

A mi madre Guadalupe, quién me dio la vida y es mi más grande motivo a seguir, la principal responsable de convertirme en un hombre de bien ante la sociedad, sin duda mi ejemplo de vida, fuerza de voluntad, y lucha ante cualquier adversidad que se pueda presentar, no hay día que no deje de pensar en ella, y ahora su alma y la mía son una sola.

A mi padre Andrés, que es mi modelo a seguir, un ejemplo de profesionalismo, inteligencia y perseverancia, sin duda un ser extraordinario que dejó un legado inquebrantable en quienes tuvimos la oportunidad de conocerlo y convivir con él, todos los días lo recuerdo al verme al espejo ya que soy la viva representación de lo que es.

A mi familia, tanto materna como paterna, quienes me apoyaron de manera incondicional para poder cumplir mis metas y sueños y no dudaron en auxiliarme cuando atravesaba por algún problema, de verdad, nunca olvidaré todo lo que han hecho por mí, lo que soy es en parte, gracias a todos y cada uno de ustedes.

A mis directores de tesis el Dr. Juan Carlos Seck Tuoh Mora y el Dr. Joselito Medina Marín y mi comité de investigación conformado por el Dr. Norberto Hernández Romero y el Dr. Gustavo Erick Anaya Fuentes, por su valioso tiempo que invirtieron en su mí, por darme la oportunidad de aprender de ellos todos los días, simplemente por aceptarme cómo su alumno, sin duda fueron grandes guías en esta experiencia académica no solo por su extraordinario conocimiento sino por su grandeza cómo personas, su dedicación cómo profesores investigadores me ha servido cómo motivación para querer superarme y seguir el camino de la investigación científica.

A mis amigos y compañeros, quienes hicieron más agradable mi vida y mi juventud, por todos los momentos que hemos compartido dentro y fuera de la escuela, por estar en las buenas y en las malas.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por ser mi casa durante diez años brindándome un entorno agradable en sus instalaciones y su personal para poder realizar mis actividades necesarias que fueron parte mi formación, por darme las armas necesarias para superar cualquier desafío tanto en el ámbito profesional cómo en mi vida personal y por todo el apoyo que recibí en mis proyectos académicos y artísticos. De igual manera, por la difusión de nuestro trabajo por medio de sus boletines científicos.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por todo su apoyo para financiar mis estudios de maestría siendo becario con número de registro 1231823.

Dedicatoria

A Dios y especialmente a mi ángel de la guarda, mi madre Lupita, quién empezó conmigo este viaje pero que por decisión divina tuvo que trascender a la mitad del proceso, no te preocupes que todo estará bien, ahora me encargaré yo.

Hay personas que su función en nuestras vidas solo es brindarnos aprendizaje, más no el objetivo en sí. Mi madre no era el destino sino una parte muy bella de este largo viaje llamado vida, el origen, por lo que... seguiré buscando mi verdadero destino.

Te amo y te amaré más allá.

ÍNDICE

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Dedicatorias	IV
CAPÍTULO 1. PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Propósito de la investigación.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivo general.....	5
1.5 Objetivos específicos.....	5
1.6 Alcances y limitaciones.....	5
1.6.1 Alcances.....	5
1.6.2 Limitaciones.....	6
1.7 Hipótesis.....	6
1.8 Conclusiones del protocolo de investigación.....	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Movilidad.....	8
2.2 Sistemas de transporte.....	8
2.2.1 Antecedentes.....	9
2.2.2 Definiciones importantes de sistemas de transporte.....	9
2.2.2.1 Administración de los sistemas de transporte.....	10
2.2.2.1.1 Transporte público	10
2.2.2.2 Transporte escolar.....	11
2.2.3 Ruteo de transporte.....	12
2.2.3.1 Tipos de ruteo de transporte.....	12
2.3 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH).....	13
2.3.1 Generalidades.....	13
2.3.2 Transporte escolar Garzabús.....	16
2.4 Conclusiones del marco teórico.....	17
CAPÍTULO 3. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN	18
3.1 Modelos de optimización.....	18
3.1.1 Formulación matemática.....	19
3.1.2 Métodos de resolución exactos.....	20
3.1.2.1 Puntos de origen y destino.....	20
3.1.2.2 Modelo de programación lineal.....	20
3.1.2.2.1 Programación lineal entera.....	21

3.1.3 Métodos de resolución heurísticos y meta-heurísticos.....	21
3.1.3.1 Algoritmos Genéticos.....	24
3.1.3.1.1 Selección.....	26
3.1.3.1.1.1 Selección por torneo.....	26
3.1.3.1.2 Elitismo.....	27
3.1.3.1.3 Cruce.....	27
3.1.3.1.4 Mutación.....	27
3.1.3.1.5 Evaluación.....	28
3.2 Problema de optimización.....	28
3.2.1 Problema del Agente Viajero – Travel Salesman Problem (TSP).....	29
3.3 Conclusiones del capítulo.....	32

CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS AL CASO DE ESTUDIO 33

4.1 Recolección y análisis de datos.....	33
4.1.1 Selección de paradas y/o nodos.....	33
4.1.2 Determinación de conjuntos.....	35
4.1.3 Cálculo de distancias y tiempos.....	38
4.1.3.1 Código en Python.....	39
4.1.4 Costo de combustible.....	40
4.2 Modelo de optimización.....	42
4.2.1 Formulación matemática.....	43
4.2.2 Método de optimización.....	44
4.2.3 Código en MATLAB.....	47
4.2.3.1 Introducción de datos de entrada del modelo y arreglos del algoritmo.....	47
4.2.3.2 Modular del Algoritmo Genético.....	48
4.2.3.3 Funciones o etapas del Algoritmo Genético.....	50
4.2.3.3.1 Generador de población (Diseño de cromosoma)...	51
4.2.3.3.2 Cálculo de costos.....	52
4.2.3.3.3 Selección de población con base a elitismo.....	52
4.2.3.3.4 Selección de población con base a torneo.....	53
4.2.3.3.5 Cruce de población.....	54
4.2.3.3.6 Mutación de población.....	57
4.2.3.4 Impresión de salidas.....	59
4.2.3.4.1 Ruta óptima.....	59
4.2.3.4.2 Cálculo del costo total del recorrido.....	59
4.2.3.4.3 Cálculo de tiempos interarribo de la ruta óptima...	60
4.3 Conclusiones de la implementación de técnicas.....	60

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	62
5.1 Resultados.....	62
5.1.1 Sistema existente.....	63
5.1.1.1 RUTA CIUDAD DEL CONOCIMIENTO – ICEA.....	64
5.1.1.2 RUTA ICEA – CIUDAD DEL CONOCIMIENTO.....	66
5.1.1.3 Programación de horarios.....	69
5.1.2 Propuesta con nodos existentes que no considerados para la población.....	70
5.1.2.1 RUTA TUZOS - CIUDAD DEL CONOCIMIENTO.....	70
5.1.2.2 RUTA CIUDAD DEL CONOCIMIENTO – TUZOS.....	73
5.1.3.3 Programación de horarios.....	75
5.1.3 Propuesta con nodos elegidos por la población.....	77
5.1.3.1 RUTA TULIPANES - CIUDAD DEL CONOCIMIENTO..	77
5.1.3.2 RUTA CIUDAD DEL CONOCIMIENTO – TULIPANES.	80
5.1.3.3 Programación de horarios.....	83
5.2 Análisis comparativo.....	84
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	86
CAPÍTULO 7. TRABAJO A FUTURO	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	
A: Productos Generados	92

CAPÍTULO 1. PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN

En este primer capítulo se introducirá de forma general a la problemática abordada en el caso de estudio a desarrollar, que es la propuesta de nuevas rutas del transporte escolar Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Este trabajo tiene la intención de apoyar a la comunidad estudiantil en sus necesidades de movilidad, mediante un servicio de transporte eficiente proporcionado por el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAEH que también facilita el traslado de los estudiantes hacia zonas cercanas a sus hogares.

1.1 Planteamiento del problema

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 como becas o incentivos, bibliotecas tanto presenciales como digitales, laboratorios con la mejor tecnología, equipos de computación, cursos interdisciplinarios, 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.

Hoy en día cualquier universidad debe considerar al servicio de transporte como una necesidad primordial y de igual manera atenderlo con las mejores características posibles, ya que permite ser un gran apoyo para los estudiantes que muestran dificultades económicas. Cabe mencionar que recientemente los costos para trasladarse de un punto a otro, tanto en transporte particular como público, son elevados, todo esto es a causa de diversos fenómenos económicos como la inflación que provocan un alza en el precio de la gasolina.

Es importante destacar la problemática que padecen una parte considerable de las organizaciones que pertenecen al giro educativo, desafortunadamente, en la mayoría de los casos, el transporte escolar no brinda la seguridad, la fiabilidad, ni tampoco la accesibilidad que se espera, esto se puede observar tanto en los tiempos de traslado como también en la selección de paradas, provocando que algunos estudiantes difícilmente lleguen a tiempo a

sus actividades diarias y posteriormente para regresar a sus hogares, más si se toma en cuenta si muchos de ellos radican lejos de su plantel educativo.

En la 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).

Algunos referentes han expuesto puntos de vista que son de gran importancia para desarrollar la presente investigación.

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 del número de vehículos, 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.

En un sistema de transporte escolar intervienen múltiples agentes, de esa manera se deja en claro que la naturaleza del problema sea multiobjetivo. En primera instancia se tiene al gobierno quién se encarga de establecer las restricciones y normas de vialidad, así como también ciertos aspectos ambientales que deben seguirse en un medio de transporte (Mandic, et al., 2015). Otro factor a considerar es la administración del transporte escolar quien da prioridad a la parte económica buscando la eficiencia en sus flotas, minimizando costos de transporte y tiempos de traslado. También las necesidades del alumno que van enfocadas en la puntualidad, la confianza y la seguridad (Dave, et al., 2013) y finalmente, los horarios de clase que imponen las escuelas.

El problema de enrutamiento del autobús escolar (SBRP, en sus siglas en inglés) es considerado en la literatura como un problema de optimización combinatoria (Oluwadare et al., 2018), este pretende diseñar rutas para una flota de autobuses escolares con el objetivo de minimizar el tiempo y los costos (Corberan, 2002) para proveer un servicio de transporte a los diferentes estudiantes a sus respectivas escuelas o colegios en áreas tanto rurales como urbanas (Lázaro et al., 2019).

Como lo mencionan (Bektaş, Elmastaş, 2007) la problemática del diseño de rutas de transporte escolar es muy importante y se deben emplear métodos científicos para tratarla. Sin embargo, normalmente las rutas son planificadas de forma intuitiva en la vida real, lo que puede resultar un riesgo para el transporte.

Dentro del contexto del problema se puede observar que durante los últimos años el transporte universitario Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo ha atravesado por una serie de cambios. Todo esto es debido a diversos factores como la pandemia del COVID-19 y las irregularidades que existen dentro de la administración del transporte, dichos cambios sin duda han afectado a los estudiantes que utilizaban normalmente el transporte universitario, ya que les permitía disminuir sus gastos de transporte considerablemente y apoyar a su economía.

Dado el contexto de la problemática, por medio de observaciones que se le han realizado al transporte universitario y tomando en cuenta las diferentes opiniones de la comunidad estudiantil, se procede a formular la pregunta de investigación que da origen al presente trabajo de investigación, la cual es:

¿Cómo formular un modelo de optimización que permita diseñar nuevas rutas de transporte universitario Garzabús que cumplan con las necesidades de movilidad de los alumnos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo?

Una vez planteada la interrogante mencionada anteriormente, se logró identificar la problemática y las diferentes variables que contribuirán al desarrollo del presente trabajo de investigación. Con ello se pretende obtener una alternativa de solución viable para la mejora del sistema de transporte universitario Garzabús, con el objetivo de que los estudiantes de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo obtengan un beneficio económico al utilizar

este servicio de manera cotidiana e incluso más alumnos de la institución puedan tener el acceso seguro y gratuito a un medio de transporte totalmente gratuito.

1.2 Propósito de la investigación

La principal intención en la presente investigación radica en realizar una propuesta de nuevas rutas del transporte escolar Garzabús en la UAEH, considerando diferentes aspectos relacionados con el transporte, normas de vialidad, administración de recursos, enfocándose principalmente en el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI).

La finalidad es primordialmente socioeconómica, dentro del ámbito social se toman en cuenta las necesidades que presenta el alumnado en aspectos de movilidad, así como también la seguridad en el traslado de los jóvenes, y la puntualidad que los estudiantes requieren para que estos puedan llegar a su dependencia en tiempo y forma. Por otro lado, se tiene el aspecto económico, en donde la propuesta pretende apoyar a la economía de algunos usuarios, disminuyendo sus gastos de transporte que en la actualidad van incrementando cada vez más.

Este documento pretende adentrarse en el estudio de técnicas de optimización de ingeniería que permitan modelar un escenario real de la problemática en cuestión y de esa manera se logre encontrar una alternativa viable para la mejora del transporte escolar Garzabús, y que también exista la posibilidad de implementarse dentro de la institución.

1.3 Justificación

La presente investigación pretende contribuir en la planificación de rutas, así como también la optimización de tiempos, distancias y costos del sistema de transporte escolar de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por medio de un modelo de optimización utilizando programación matemática en virtud del método de resolución meta-heurístico de Algoritmos Genéticos que sigue el principio de la evolución biológica de seres vivos, esto permitirá conocer las diversas rutas, los costos de combustible y los tiempos más óptimos en el servicio que propicia la institución educativa en un tiempo computacional rápido y eficaz.

El estudio pretende dar a conocer y sensibilizar al personal directivo para poner en práctica la propuesta y apoyar a la mayor cantidad de estudiantes que no tienen los recursos

necesarios para poder trasladarse al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, así como también al personal docente y administrativo que desee utilizar este medio de manera cotidiana para disminuir sus gastos de movilidad logrando un cambio significativo en el sistema de transporte que se encuentra actualmente.

1.4 Objetivo General

Diseñar y optimizar nuevas rutas para el transporte escolar de la UAEH mediante la implementación de un algoritmo genético modificado, con el fin de reducir los costos operativos y tiempos de traslado, además de mejorar la eficiencia operativa, proporcionando un servicio más ágil y accesible para los estudiantes.

1.5 Objetivos Específicos

- Recopilar información del alumnado y personal acerca de las preferencias de transporte y necesidades de movilidad.
- Elaborar propuestas de rediseño de nuevas rutas de transporte escolar empleando técnicas de optimización, utilizando las variables correspondientes para una mejor interpretación de la realidad.
- Interpretar y realizar análisis de los resultados obtenidos para dar la solución que mejor se adapte a las necesidades de la comunidad estudiantil.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

Esta propuesta pretende beneficiar únicamente a los alumnos, docentes, administrativos y personal que utilicen el transporte universitario Garzabús como medio de movilidad y que pertenezcan al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Se desarrollará un modelo de optimización matemática que sea capaz de diseñar diferentes rutas en diferentes partes de la ciudad de Pachuca Hidalgo, México y sus alrededores. Dicha técnica será lo suficientemente eficaz para beneficiar a una parte considerable de alumnos que utilicen el transporte escolar de la institución mencionada

anteriormente, alcanzando a cubrir la mayoría de zonas en donde exista una necesidad de movilidad considerable para el alumnado.

1.6.2 Limitaciones

Debido a la complejidad de realizar un muestreo en todas las dependencias de la UAEH causada por el tiempo que conllevaría la obtención e interpretación de los datos, el presente trabajo de investigación solo recabará información de personas que pertenezcan al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

La falta de actualización de diferentes datos por parte de la administración del transporte de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, cómo registros de tiempos, costos de combustible y mantenimiento, alcance del transporte, entre otros, será una limitante en la cual se verá inmersa la presente investigación por lo que el modelo solo podrá contar con los datos más recientes que se encuentren disponibles en la base de datos del departamento.

Para ello se deberán implementar diferentes tecnologías de la información que permitan obtener información relevante en relación a los tiempos, distancias y lugares de interés al igual que instrumentos de evaluación aplicados al alumnado.

1.7 Hipótesis

Mediante un modelo de optimización basado en Algoritmos Genéticos es posible encontrar un conjunto de rutas adecuadas para el sistema de transporte universitario Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, con el fin de que una parte considerable de la población estudiantil sea beneficiada.

1.8 Conclusiones del protocolo de investigación

En este capítulo se ha marcado la pauta del protocolo de investigación que orientará al caso de estudio, el cual es el desarrollo de un modelo de optimización basado en Algoritmos Genéticos para el diseño de nuevas rutas del transporte escolar Garzabús. Se ha definido claramente la problemática, así como también los objetivos y preguntas de investigación. De igual forma se discute la importancia y relevancia del tema, fundamentando

su pertinencia en el contexto académico, y estableciendo los alcances y limitaciones que se deben considerar.

Al pasar al siguiente capítulo, se desarrollará el marco teórico, que servirá como el pilar conceptual de este estudio. En el marco, se abordarán las teorías y conceptos clave que sustentan la presente investigación, proporcionando un análisis crítico de la literatura existente y delineando las perspectivas teóricas que el estudio pretende abordar.

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

En el siguiente capítulo se construirán y delimitarán diferentes bases teóricas que permitirán desarrollar un enfoque o perspectiva adecuado para abordar la problemática específica del presente trabajo de investigación.

Primeramente, se abordarán conceptos fundamentales de los sistemas de transporte para poder tener un mayor contexto del proyecto que se llevará a cabo y posterior a ello se concluirá con la explicación de diversas generalidades del entorno en el que se llevará a cabo la investigación que en este caso es la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH).

2.1 Movilidad

La movilidad es un parámetro o variable de carácter cuantitativo que mide la cantidad de desplazamientos de las personas o bienes de algún sistema socioeconómico. Otro termino importante que servirá para abordar la problemática es la accesibilidad, la cual es una variable, pero a diferencia de la movilidad anteriormente mencionada esta es cualitativa y nos indica la facilidad con que los individuos salvan la distancia que los separa de los lugares donde satisfacen sus necesidades (Estevan, Sanz, 1996).

En términos más 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.

2.2 Sistemas de transporte

Primeramente, antes de definir que es sistema de transporte, es necesario dejar en claro que es un sistema, lo cual como mayormente lo describen diversos autores como un conjunto de elementos relacionados entre sí para lograr un objetivo (Van Gigch, 2017). Transponiendo la definición anterior al concepto de transporte podemos deducir con mayor facilidad que un sistema de transporte, es un conjunto de instalaciones fijas (redes y terminales), entidades de flujo (vehículos) que permiten movilizar eficientemente personas y bienes, para satisfacer necesidades humanas de movilidad.

La eficacia de un sistema de transporte hace referencia a la capacidad de un sistema para alcanzar sus objetivos. El principal objetivo del sistema de transporte colectivo es el traslado de personas entre diversos lugares donde se realizan actividades urbanas, fomentando la integración territorial (García, 2017).

2.2.1 Antecedentes

El transporte ha sido de gran relevancia para el desarrollo económico de la humanidad, las necesidades han sido cambiantes a lo largo del tiempo. El autor (Acosta, 2023) muestra un panorama general de los antecedentes históricos de los sistemas de transporte, primeramente, menciona que las culturas antiguas, las guerras, la necesidad de comerciar y la movilidad de individuos fueron algunas de las causas para que se fomentaran nuevos cambios.

El transporte y la maquinaria moderna tuvieron sus inicios desde la invención de la rueda, dando pauta al desarrollo económico y tecnológico de diferentes culturas, los principales pueblos comerciantes antiguos fueron los romanos y los fenicios en el año 2800 a.C. Los romanos se caracterizaron por el excelente trazo de sus vías comerciales terrestres que facilitaban el intercambio de diferentes productos mientras que los fenicios fueron precursores del comercio marítimo, así fue como se creó el arte de navegar.

Con la revolución industrial se inició la evolución del medio de transporte masivo de bienes y colectivo de personas que fueron indispensables para el desarrollo de la economía.

Otro evento que permitió el desarrollo de los sistemas de transporte es la aparición del motor de combustión por este invento crece el ferrocarril y se desarrolla la navegación marítima. Posteriormente se presenta el vehículo automotor que desplazo al transporte ferroviario gracias a su flexibilidad y a su mayor velocidad, a pesar de que el ferrocarril ofrecía diversas ventajas las inversiones se orientaron a la construcción de carreteras.

2.2.2 Definiciones importantes de sistemas de transporte

Existen diversas temáticas relevantes dentro de esta área de la ingeniería, una de ellas son los modos de transporte, estas son diferentes formas en las que puede ser transportado un bien o usuario de un lugar a otro, ya sea de forma terrestre, aérea o marítima. Los cinco

modos de transportación que más se usan en la actualidad son las carreteras, vías fluviales, ferrocarriles, vías aéreas y tuberías.

Algunos modos de transporte no permiten una conexión puerta a puerta entre ningún origen y destino y, por tanto, deben utilizarse conjuntamente con otros modos a esto se le denomina transporte intermodal (Ghiani, et al., 2022).

2.2.2.1 Administración de los sistemas de transporte

La administración de los sistemas de transporte juega un papel crucial dentro de las compañías que desean movilizar bienes o individuos. (Ghiani, et al., 2022) argumentan que esta gestión normalmente es adoptada en organizaciones que transportan todo tipo de productos como empresas manufactureras, minoristas, comercio electrónico y escuelas. Para poder gestionar los sistemas de transporte de cualquier empresa se establecen tres fases: planeación, ejecución y monitoreo.

En la fase de planeación se revisan y seleccionan las actividades y los aspectos más relevantes relacionadas con la transportación, así como el análisis de diversos costos, distancias, locaciones y paradas específicas para proveer un buen servicio al cliente o usuario. Posteriormente se tiene la fase de ejecución en donde se incluyen actividades más operativas como el manejo de la unidad, el seguimiento del transporte en tiempo real, el ruteo y la comunicación con los conductores y proveedores. Finalmente se tiene la fase de monitoreo en donde se evalúa la eficiencia y la efectividad de todas las operaciones del sistema de transporte por medio de reportes, bitácoras, tableros e indicadores de desempeño (Ghiani, et al., 2022).

2.2.2.1.1 Transporte público

El transporte público tiene como particularidad que los usuarios deben adaptarse a los horarios y a las rutas que pueda proveer el sistema de transporte y de igual forma dependen de la regulación del gobierno con normas de tránsito y vialidad.

Los elementos que tiene un sistema de transporte público son que la demanda está dada por las personas (usuarios) y la oferta está dada por los vehículos, la infraestructura, los servicios y los operadores (conductores).

Normalmente los usuarios deben compartir el vehículo de transporte y la flota de unidades están disponibles para todo el público en general.

El transporte público puede ser proporcionado por una o varias empresas privadas o por consorcios de transporte público. El servicio se establece mediante el cobro de forma directa e inmediata a los usuarios antes de abordar la unidad y dichos servicios son regulados por autoridades locales o nacionales. En algunos lugares los servicios suelen ser gratuitos para el viajero, normalmente se realiza en comunidades marginadas, instituciones educativas o en alguna empresa que provee a sus trabajadores esta prestación (Romo de Vivar, 2019).

Algunas ventajas que provee el transporte público es que permite el desplazamiento de personas de un punto a otro en el área de una ciudad y es, por tanto, parte esencial de las ciudades, también ayuda a disminuir la contaminación, ya que se usan menos automóviles. Esto es visto de forma positiva por autoridades gubernamentales y en algunas ocasiones es subsidiado con fondos públicos por su gran función que tiene dentro de la sociedad.

2.2.2.2.2 Transporte escolar

El transporte escolar es una subclasificación del sistema de transporte público, En (Educa, 2023) se menciona que este medio tiene como misión principal transportar a estudiantes dentro del mismo municipio o entre distintos municipios a sus instancias educativas donde estudian o laboran según sea el caso y a sus hogares o cerca de ellos.

Entre las características más importantes del transporte escolar se encuentran que debe existir una mampara de separación entre el conductor y los pasajeros. Los asientos deben de contar con cinturones de seguridad. A parte de esto, deben ir dotados de martillos rompe cristales, un botiquín de primeros auxilios, extintores, al igual que sus salidas de emergencia.

Los estudiantes tienen la obligación de cumplir normas básicas a la hora de usar el transporte escolar. Tanto a la hora de subir al vehículo como cuando estén en su interior.

El uso del transporte escolar tiene múltiples beneficios tanto a los estudiantes como a sus familias. Para los padres y madres supone un ahorro de tiempo, combustible y atascos viales. Algunas de ellos son:

- Provee seguridad ya que los estudiantes estarán acompañados en todo momento por conductores profesionales.
- Favorece la integración y socialización entre estudiantes, así como también que sean más responsables y organizados con sus tiempos.
- Reduce la contaminación.
- Fomenta la tolerancia y el seguimiento de normas.
- Favorece la puntualidad ya que la gran mayoría de transportes escolares son precisos en su programación de horarios y tiempos.

2.2.3 Ruteo de transporte

El ruteo es el proceso de planificar las rutas que seguirán los conductores o choferes de algún sistema de transporte para llevar a cabo los servicios que ofrece cualquier organización. Es una actividad de suma importancia ya que un ruteo óptimo permite el ahorro de tiempo y por ende la reducción de costos y mejorar la eficiencia general de la operación vehicular. Por el caso contrario, un ruteo inapropiado trae como consecuencia retrasos, pérdida de productividad y costos adicionales innecesarios.

El ruteo es un aspecto clave para la operación logística y vale la pena tomarse el tiempo para planificar y ejecutar correctamente.

En (Pluxee, 2024) se menciona que tener un plan de ruteo es esencial para cualquier organización que cuente con flotas vehiculares para desempeñar actividades de transporte. Entre las ventajas que se pueden encontrar están:

- Optimizar las rutas de tus conductores.
- Reducir tiempos de carretera.
- Minimizar costos de combustible y de mantenimiento.
- Aumentar la satisfacción del cliente.

2.2.3.1 Tipos de ruteo de transporte

(Pluxee, 2024) indica diferentes tipos de ruteo que pueden ser útiles para la optimización de rutas y flotas, algunas de ellos son:

- **Ruteo fijo:** Aquí se planifican rutas para una cantidad determinada de días y horarios. Es útil cuando se entregan productos o servicios en rutas regulares y predecibles, como, por ejemplo, en rutas escolares o de recolección de basuras.
- **Ruteo dinámico:** Este tipo de ruteo planifica las rutas en tiempo real y se ajusta los diferentes cambios que se producen en la ruta, como el tráfico o las condiciones meteorológicas. Se utiliza normalmente para rutas impredecibles como entregas comerciales, comercio electrónico o servicios de emergencia como ambulancia o el cuerpo de bomberos.
- **Ruteo optimizado:** En este tipo de ruteo se utilizan herramientas de tecnología informática como softwares de programación u optimización que permitan encontrar la ruta más eficiente posible tomando en cuenta diversos factores cómo la distancia, tiempo de viaje, aspectos de vialidad y tránsito, capacidad de carga y restricciones de entrega.
- **Ruteo por zonas:** Implica dividir el territorio por diferentes zonas para que se asigne un grupo de conductores a cada zona para poder satisfacer la demanda. Es utilizado normalmente para entregas y recolecciones frecuentes en alguna zona específica.
- **Ruteo combinado:** Este tipo de ruteo combina varios tipos de ruteo mencionados anteriormente para maximizar aún más la eficiencia de las rutas. Un buen ejemplo es que se utilice el ruteo optimizado para planificar la ruta general, y luego utilizar el ruteo dinámico para realizar ajustes en tiempo real a medida de cómo se esté comportando las ordenes de entrega y la demanda.

2.3 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH)

2.3.1 Generalidades

Hoy en día la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) es la institución de enseñanza de mayor antigüedad dentro de dicho estado de la república y por ende es considerada como la Máxima Casa de Estudios del Estado de Hidalgo. La UAEH tiene como oferta educativa un programa de bachillerato, 62 carreras de licenciatura, 17 especialidades, así como también posgrados a nivel maestría (26) y doctorado (16) contando con las

instalaciones necesarias para ejercerlos, y docentes competentes y comprometidos con el aprendizaje de los jóvenes.

La UAEH posee campus en dieciocho municipios del Estado de Hidalgo los cuales son mostrados a detalle en la Figura 1 las dependencias a nivel media superior y la Figura 2 las del nivel superior.; su principal sede es Pachuca de Soto y sus zonas metropolitanas ya que ahí se localizan la mayoría de las instalaciones y también sus oficinas centrales que se ocupan para desempeñar diversas labores administrativas. Entre las entidades en donde se localizan las diferentes dependencias de la UAEH están Actopan, Apan, Atotonilco de Tula, Huejutla de Reyes, Lolotla, Mineral de la Reforma, Mineral del Monte, San Agustín Tlaxiaca, San Bastolo Tutotepec, Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Tepeapulco, Tepeji del Río de Ocampo, Tizayuca, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, Tulancingo de Bravo y Zimapán.



Figura 1: Mapa que muestra la localización de todas las dependencias de nivel media superior de la UAEH dentro del estado de Hidalgo. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Marco Geoestadístico Nacional.

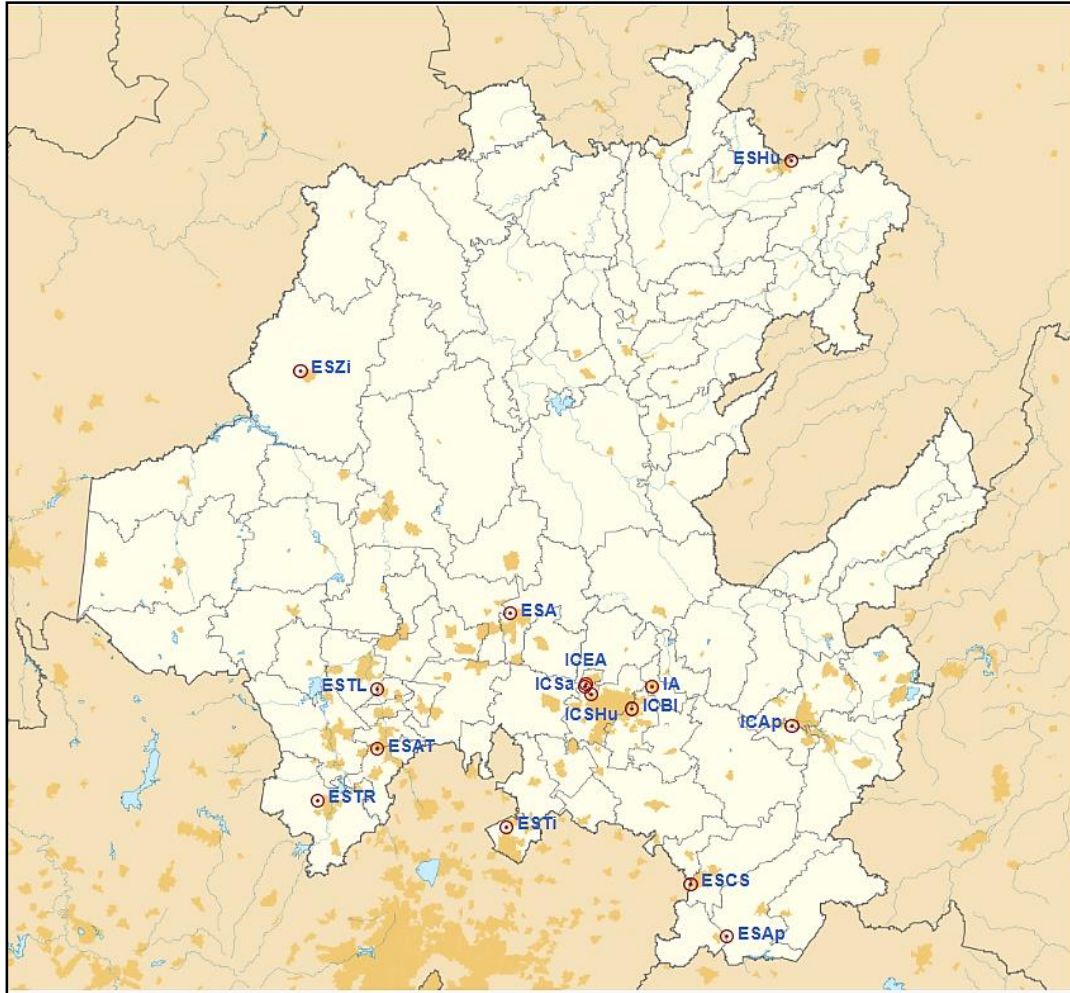


Figura 2: Mapa que muestra la localización de todas las dependencias de nivel superior de la UAEH dentro del estado de Hidalgo. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Marco Geoestadístico Nacional.



Figura 3: Escudo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Fuente: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.



Figura 4: La Garza localizada en el Edificio Central de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Fuente: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

2.3.2 Transporte escolar Garzabús

El sistema de transporte escolar Garzabús mostrado en la Figura 5 brinda un servicio de movilidad de una manera segura, cordial y eficiente con operadores calificados, con buena presentación y con cordialidad a los usuarios, cumpliendo con las rutas y horarios establecidos. (UAEH, s.f). Actualmente esta red cuenta con 24 rutas y 44 unidades brindando servicios en diferentes dependencias de la entidad federativa cómo las Escuelas Superiores de Actopan, Atotonilco de Tula, Ciudad Sahagún, Huejutla, Tepeji del Río, Tizayuca, Tlahuelilpan, Tulancingo y Zimapan (UAEH, 2019). Cabe mencionar que la ubicación en donde toma mayor relevancia el transporte, con un total de 13 rutas distintas, es la zona metropolitana de Pachuca de Soto y sus alrededores que cuenta con los siguientes municipios: Mineral del Monte, Mineral de la Reforma, San Agustín Tlaxiaca y el mencionado anteriormente Pachuca de Soto, esto es debido a la gran cantidad de dependencias localizadas y por ende existirá una mayor demanda de transporte en esta zona.

Un aspecto relevante a considerar es que las rutas, paradas y horarios están sujetos a modificaciones de acuerdo a las necesidades institucionales, cierres viales o desviaciones en los trayectos, así como a las observaciones emitidas por las autoridades o del departamento de transporte quienes son los encargados de llevar la gestión de la red.



Figura 5: Unidad de transporte Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Fuente: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

2.4 Conclusiones del marco teórico

El presente capítulo ha proporcionado un análisis exhaustivo de la literatura existente acerca de los sistemas de transporte y el entorno en el que se desenvuelve el caso práctico, se ha establecido un marco conceptual y teórico que sustenta la investigación.

El análisis crítico ha permitido identificar diversas áreas de interés que se indagan en el ámbito del transporte para poder cimentar de forma concreta las bases del estudio asegurando una coherencia interna dentro de la teoría, lo cual es un factor crucial para la validez y fiabilidad de los hallazgos de esta tesis y así mismo llevar a cabo de forma correcta los capítulos que vendrán a continuación.

CAPÍTULO 3. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

En el siguiente capítulo se pretende adentrar en los diferentes conceptos que refieren a la optimización y su modelado para poder tener un panorama más amplio de las diferentes herramientas que se emplearán y de esa forma aplicarlas de la mejor manera posible.

Después se mencionarán los métodos de resolución tanto exactos como heurísticos y meta-heurísticos, haciendo hincapié en la técnica que se aplicará al modelo propuesto, los Algoritmos Genéticos, y finalmente se hablará de la metodología del problema que adoptará el entorno de investigación, el Problema del Agente Viajero.

3.1 Modelos de optimización

Primeramente, para abordar la temática de modelos de optimización se comenzará por definir cada uno de sus conceptos, el primero es “modelo”. Un modelo es una abstracción de un sistema, situación, problema, objeto o individuo del mundo real que sirve para estudiar su comportamiento y posterior a ello tomar una decisión en relación a él, teniendo en cuenta la ventaja que ofrece al no experimentar con el sistema real. También (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.

Una vez definidos los dos conceptos anteriores, se puede definir que es un modelo de optimización. Un modelo de optimización es la abstracción de un problema real: al cual se le aplicaran ciertas consideraciones matemáticas para solucionar la situación por medio de la

obtención de resultados óptimos, teniendo como ventaja no correr ningún riesgo experimentando con el sistema real.

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). De igual forma mencionan una recomendación importante, antes de aplicar el modelo los directivos de las empresas realicen un análisis detallado de sus decisiones con respecto a ellas y que sobre todo no se fíen plenamente del modelo.

3.1.1 Formulación matemática

Los modelos matemáticos son representaciones idealizadas, pero deben de ser expresados en términos de símbolos y expresiones matemáticas. En el caso de los problemas de Investigación de Operaciones (IO) el modelo está formulado por un sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas que describen la esencia del problema. De esta forma, si deben tomarse n decisiones cuantificables relacionadas entre sí, se representan como **variables de decisión** (x_1, x_2, \dots, x_n) para las que se deben determinar los valores respectivos. Posteriormente, la medida de desempeño adecuada (por decir, la ganancia) se expresa como una función matemática de estas variables de decisión, esta función se denomina **función objetivo** ($P=3x_1+2x_2+\dots+5x_n$). De igual manera se expresan en términos matemáticos todas las limitaciones que se puedan imponer sobre el modelo, casi siempre en forma de ecuaciones o desigualdades ($x_1+3x_1x_2+2x_2 \leq 10$), normalmente estas expresiones matemáticas reciben el nombre de **restricciones** (Hillier & Lieberman, 2010).

El modelo matemático se resume a que debe elegir los valores de las variables de decisión de manera que se minimice o maximice la función objetivo, sujeta a las restricciones dadas.

3.1.2 Métodos de resolución exactos

La investigación científica en el campo logístico ha dedicado en los últimos tiempos un gran esfuerzo en el desarrollo de técnicas adecuadas para resolver modelos tanto teóricos como prácticos de transporte. La escasez de recursos y las restricciones legales y medioambientales y de igual forma las características del medio ambiente empresarial moderno conllevan que dentro del análisis de este tipo de problemas se deban considerar todas las variables que intervienen teniendo como fin último el aumento de los ingresos y la disminución de costo de transporte gracias a la optimización de los recursos empleados (Cogollo-Florez, 2017).

3.1.2.1 Puntos de origen y destino

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.

3.1.2.2 Modelo de programación lineal

La programación lineal es un enfoque de solución de problemas elaborado para ayudar en la toma de decisiones. Los problemas que ataca la programación lineal se caracterizan por tener una sola función objetivo, ya sea maximizar o minimizar cantidades; la función objetivo está sujeta a restricciones y, la función objetivo y las restricciones, las cuales deben ser proporcionales al nivel de desempeño de cada producto o servicio (Cogollo-Florez, 2017). A continuación, se mostrará un ejemplo de un modelo de programación lineal de tres variables de decisión, una función objetivo y tres restricciones, la cual una es de no negatividad, que implica que ningún valor de alguna variable de decisión puede ser negativo.

$$Z = X_1 + 4X_2 + 3X_3 \quad (1)$$

$$s. a \quad 2X_1 + X_2 + 5X_3 = 40 \quad (2)$$

$$X_1 + 2X_2 - 3X_3 \geq 22 \quad (3)$$

$$X_1, X_2, X_3 \geq 0 \quad (4)$$

3.1.2.2.1 Programación lineal entera

Existen varios problemas que se modelan como programas lineales con el requerimiento adicional de que una o más variables deben ser enteros, se tiene un programa lineal sólo con enteros, si algunas variables, pero no todas deben ser enteras, se tiene un programa lineal de enteros mixto. En muchas aplicaciones de programación lineal entera se requiere que una o más variables enteras sean igual a 0 o a 1. Dichas variables se denominan binarias (Cogollo-Florez, 2017).

Las variables enteras brindan un mejor modelamiento, ya que permiten un mayor número de aplicaciones abordables con un grado de dificultad más riguroso dentro del método de programación lineal.

La aplicación de estas herramientas se enmarca en diversas organizaciones dentro de las áreas de producción, servicios, ambiente, logística, mercadeo, proyectos, finanzas, salud, etc., todas con la finalidad de mejorar la productividad, aprovechar eficientemente los recursos, reducir costos de gestión, satisfacer a los clientes, todo ello a la par con el desarrollo sostenible (Bermúdez-Colina, 2011). De igual forma (Hiller & Libermann, 2010) mencionan que la aplicación de la programación lineal entera se encuentra en áreas como: programación de producción, transporte, salud, investigación de mercado, logística, finanzas, lo cual coloca a la programación lineal entera como herramienta ineludible en la toma de decisiones.

3.1.3 Métodos de resolución heurísticos y meta-heurísticos

La escasa difusión dada a las técnicas más novedosas para la solución de problemas complejos de gestión de operaciones tiene como consecuencia directa que diferentes organizaciones pierden oportunidades de operar a menores costos y mayor eficiencia (Velez & Montoya, 2007).

En ocasiones se deben enfrentar problemas en los que encontrar una solución posee un alto grado de complejidad computacional o en algunos casos no se cuenta con un algoritmo para encontrar esta solución. Para resolver este tipo de problemas se deben emplear métodos de búsqueda heurísticos, los cuales son capaces de encontrar una buena solución al problema (Hooker, 1995).

Según el diccionario de la Real Academia Española, la heurística es la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc. (RAE, 2012). A nivel computacional, una heurística es una regla que permite, frente a un número grande de posibles soluciones, elegir una que supuestamente tiene una mayor probabilidad de contribuir a la solución final del problema, con el objetivo de ahorrar tiempo de procesamiento (Cogollo-Florez, 2017).

Recientemente se ha observado un aumento en el desarrollo de métodos heurísticos para abordar problemas de optimización en ingeniería. Este acontecimiento está reflejado en revistas especializadas para la difusión de este tipo de temáticas; una de ellas es: “Journal of Heuristics” lanzada por primera vez en el año 1995 (Cáceres, 2009).

Los métodos heurísticos son usados permanentemente en la solución de problemas complejos. La mejor elección de estos métodos, obviamente dependiendo del problema que se va a atacar, puede encontrar soluciones excelentes y, algunas veces, totalmente óptimas.

Una importante ventaja que presentan las técnicas heurísticas respecto a las técnicas exactas es que, por lo general, brindan una mayor flexibilidad para el manejo de las características del problema. Además, pueden ofrecer más de una solución, lo cual permite ampliar las posibilidades de elección, sobre todo cuando existen factores que no han podido ser añadidos en el modelo, pero que también deben ser considerados. (Cogollo-Florez, 2017).

Con el desarrollo tecnológico y científico que ha surgido a través del tiempo se han desarrollado diversos métodos bajo el nombre de meta-heurísticos con el objetivo de obtener mejores resultados que los alcanzados por los heurísticos tradicionales (Osman & Kelly, 1996). Los meta-heurísticos brindan un panorama general para la creación de nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos (Glover & Kochenberger, 2003).

Los problemas reales que enfrentan a diario los profesionales encargados de las áreas de administración de operaciones y logística son de una gran complejidad, debido a que la cantidad de soluciones posibles o la región de búsqueda es muy grande, y explorarlo exhaustivamente para encontrar la solución óptima suele ser bastante difícil con la tecnología de programación lineal convencional. Este hecho ha impulsado el desarrollo de técnicas no

convencionales de optimización que, como los meta-heurísticos, permiten encontrar soluciones aceptables en un tiempo computacional mínimo con la incorporación de ideas innovadoras copiadas del comportamiento de la naturaleza.

Los meta-heurísticos constituyen ideas generales que permiten un margen de maniobra muy amplio dentro de la programación. Es esta gran versatilidad la que los hace muy atractivos, ya que es posible adaptarlos a casi cualquier problema de optimización combinatoria (Velez & Montoya, 2007).

Debido al gran desarrollo que han alcanzado los procedimientos meta-heurísticos, se han realizado diversas alternativas en cuanto a la clasificación de estos, entre ellas se encuentra una propuesta de los autores (Blum & Roli, 2003).

- **Meta-heurísticas de trayectoria simple:** El proceso de búsqueda que desarrollan estos métodos se caracteriza por una trayectoria en el espacio de soluciones; es decir partiendo de una solución inicial, son capaces de generar un camino o trayectoria en el espacio de búsqueda a través de operaciones de movimiento. Algunas de las meta-heurísticas que pertenecen a esta clasificación son las siguientes: *búsqueda tabú, recocido simulado, busque de vecindades variables, búsqueda local guiada, búsqueda local iterativa, entre otras.*
- **Meta-heurísticas poblacionales:** Son aquellas que emplean un conjunto de soluciones (población) en cada iteración del algoritmo, en lugar de utilizar una única solución como las meta-heurísticas del grupo anterior. Estas proveen un mecanismo de exploración paralelo del espacio de soluciones, y su eficacia depende de cómo se manipule dicha población. Algunas de las meta-heurísticas que pertenecen a esta clasificación son las siguientes: *algoritmos evolutivos, algoritmos basados en inteligencia colectiva, colonia de hormigas, entre otras.*

A continuación, en la Figura 6 se muestra una taxonomía de las principales meta-heurísticas que existen en la actualidad.

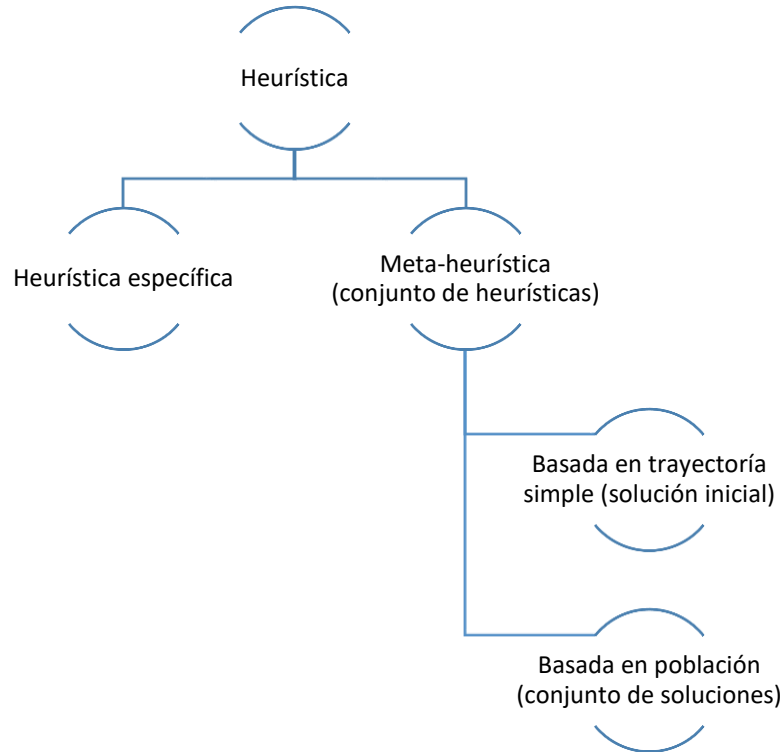


Figura 6: Taxonomía de los métodos heurísticos.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.1 Algoritmos Genéticos

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 Charles Darwin en 1859.

Dicha técnica utiliza poca información heurística sobre el ámbito del problema. Es por ende que tiene 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** y de igual forma se ilustra la secuenciación de sus actividades en la Figura 7.

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

- **Alelo:** Son los distintos valores con los cuales se puede representar un gen.
- **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.

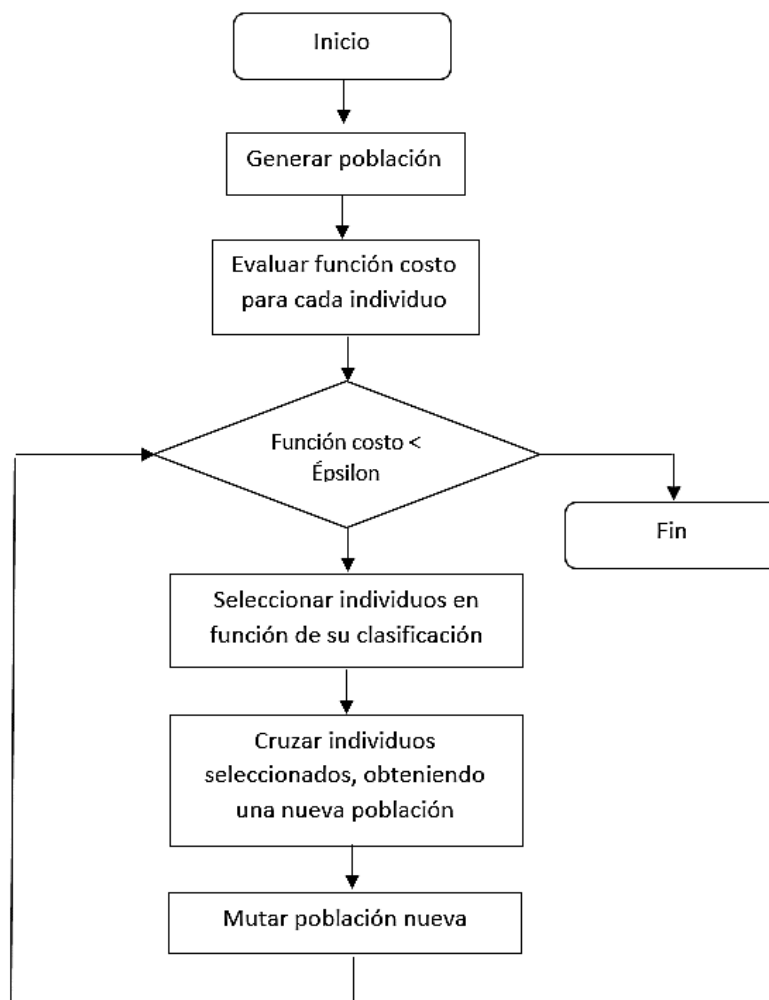


Figura 7: Diagrama de flujo del proceso de un algoritmo genético.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.1.1 Selección

Los algoritmos de selección se encargan de escoger que individuos van a disponer de oportunidades para reproducirse y cuáles no. En este tipo de algoritmos se trata de imitar lo que ocurre en la naturaleza, así que se otorga mayor probabilidad de reproducción a los individuos más aptos en relación a su valor de ajuste. Cabe mencionar que no se deben de eliminar las opciones de individuos menos aptos, ya que las generaciones de pocos individuos la población se volverá homogénea.

Existen dos tipos de clasificación de los algoritmos de selección, estos pueden ser **probabilísticos** y **determinísticos**.

El primer tipo adjudica estas posibilidades con un componente basado en el azar, en donde se encuentran la selección por ruleta y la selección por torneo, los cuales son los más utilizados en esta en este operador genético.

Dentro de la segunda clasificación se engloba una serie de algoritmos que permite asignar a cada individuo el número de veces que será escogido para reproducirse, algunos de estos algoritmos son sobranste estocástico, universal estocástica o el muestreo determinístico (Gestal, et al., 2010).

3.1.3.1.1.1 Selección por torneo

El principal objetivo de este método de selección consiste en escoger a los individuos por medio de una comparación entre sus genotipos.

Dentro de este método existen dos versiones, el torneo determinístico y el torneo probabilístico.

En el torneo se selecciona al azar un número de individuos (normalmente se escogen dos) y se ponen a competir entre ellos poniendo como indicador el valor obtenido en la función costo, posteriormente entre los individuos seleccionados se escoge al más apto en función a la necesidad del problema que se esté atacando para pasarlo a la siguiente generación.

En la versión probabilística únicamente se diferencia en que en lugar de escoger al mejor se genera un número aleatorio entre 0 y 1 (normalmente se toman valores en el rango

$0.5 < p < 1$), si es mayor que un parámetro p se escoge el individuo más alto y en caso contrario el menos apto.

Dependiendo del número de individuos que participan en cada torneo se debe modificar la presión, cuando se tienen demasiados individuos, la presión de selección es mucha y los peores individuos tienen muy poca probabilidad de reproducción, y por el contrario si el tamaño de la población es bajo, la presión disminuye y los peores individuos tienen más probabilidad de ser seleccionados.

Si se opta por un método con una alta presión de selección se centra la búsqueda de las soluciones en un entorno próximo a las mejores soluciones actuales. Por el contrario, optando por una presión de selección menor se deja el camino abierto para la exploración de nuevas regiones del espacio de búsqueda (Gestal, et al., 2010).

3.1.3.1.2 Elitismo

Elitismo es un operador genético particular que consiste en copiar siempre a los mejores individuos de una generación para seguir conservando sus genes dominantes e incluirlos en la siguiente generación para garantizar que el proceso de búsqueda siempre vaya hacia adelante en relación a la calidad de la mejor solución (Gestal, et al., 2010).

3.1.3.1.3 Cruce

Una vez seleccionados los individuos, éstos deberán volverse a combinar para producir la descendencia que se insertará en la siguiente generación. Cabe mencionar que el cruce es una estrategia de reproducción sexual teniendo como idea principal que si se toman dos individuos correctamente adaptados al medio y se obtiene una descendencia que comparta genes de ambos, existe la posibilidad de que los genes heredados sean los de mejor calidad. Al compartir buenas características de dos individuos, la descendencia, o al menos parte de ella, debería tener mejores características que cada uno de los padres por separado (Gestal, et al., 2010).

3.1.3.1.4 Mutación

La mutación de un individuo provoca que alguno de sus genes, generalmente uno sólo, varíe su valor de forma aleatoria.

Aunque se pueden seleccionar los individuos directamente de la población actual y mutarlos antes de introducirlos en la nueva población, la mutación se suele utilizar de manera conjunta con el operador de cruce. Primeramente, se seleccionan dos individuos de la población para realizar el cruce. Si el cruce tiene éxito entonces uno de los descendientes, o ambos, se muta con cierta probabilidad. Se imita de esta manera el comportamiento que se da en la naturaleza, pues cuando se genera la descendencia siempre se produce algún tipo de error, por lo general sin mayor trascendencia, en el paso de la carga genética de padres a hijos.

La probabilidad de mutación es muy baja, generalmente menor al 1%. Esto se debe sobre todo a que los individuos suelen tener un ajuste menor después de mutados. Sin embargo, se realizan mutaciones para garantizar que ningún punto del espacio de búsqueda tenga una probabilidad nula de ser examinado (Gestal, et al., 2010).

3.1.3.1.5 Evaluación

Para el funcionamiento de un Algoritmo Genético se debe tener un procedimiento que indique si los individuos de la población son buenas soluciones o no al problema que se está atacando. En cada problema se deriva un método diferente, al igual que la codificación de los individuos.

Para ello se debe de crear una función de evaluación, que establece una medida numérica del puntaje de una solución, recibiendo el nombre de ajuste o adecuación de un individuo.

El proceso de evaluación consiste en crear una medida de ajuste para cada individuo de la población generada por medio de un método bien definido (Gestal, et al., 2010).

3.2 Problema de optimización

La resolución de un problema de optimización es hallar la mejor solución posible a un problema formulado matemáticamente, donde el criterio que evalúa la calidad de la solución es de carácter cualitativo, generalmente se relaciona a un costo y es denominado como función objetivo. En un problema combinatorio de optimización se desea encontrar un orden específico sobre un conjunto de elementos discretos (Aarts & Lenstra, 2003).

Ante un problema de optimización, la primera cuestión que nos debemos de hacer es si es fácil o difícil de resolver. Aunque puede significar una pregunta un tanto sosa, es de gran importancia para determinar la complejidad computacional a la que vamos a estar sometidos al tratar de resolver dicha problemática. La complejidad computacional determina si un problema es fácil o no de acuerdo con los algoritmos conocidos para resolverlo (Velez & Montoya, 2007).

Los problemas que tienen una solución con orden de complejidad lineal, es decir, que se resuelven en un tiempo que se relaciona linealmente con su tamaño y son agrupados en la clase P. Aunque actualmente la mayoría de los algoritmos que resuelven problemas de ingeniería poseen una complejidad polinómica, es decir, que la relación entre el tamaño y el tiempo es polinómica, estos son asignados en la clase NP (Cortez, 2004).

Dentro de la complejidad computacional se tiene una escala para medir la complejidad, esta complejidad incluye (Cortez, 2004):

- **P:** Resoluble en tiempo polinómico.
- **P-Completo:** Los problemas más difíciles en P.
- **NP:** Problemas con respuestas positivas verificables en tiempo polinómico.
- **NP-Completo:** Los más difíciles problemas de NP.
- **NP-Hard:** Problema al menos tan complejo cómo NP.
- **NP-Easy:** Problema como mucho tan difícil como NP.
- **NP-Equivalente:** Problema igualmente difícil que NP.

Aunque esta clasificación parezca sólo de interés teórico, es de gran importancia para elegir que técnica se adecua más a la problemática abordada. Saber si un problema se puede resolver en unos cuantos segundos o minutos o si, por el contrario, llevara más tiempo encontrar una respuesta óptima.

3.2.1 Problema del Agente Viajero – Travel Salesman Problem (TSP)

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 fue publicado en 1954, teniendo por nombre:

“Solutions of a large scale Traveling Salesman Problem“ publicado por George Dantzig, Ray Fulkerson, y Selmer Johnson.

Es catalogado como un problema de optimización combinatoria, es decir, donde se manejan cierto número de variables y cada variable puede tener N diferentes valores, cabe destacar el número de combinaciones de los valores es de carácter exponencial, lo que da lugar a múltiples soluciones óptimas.

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

Para poder resolverlo se emplean diferentes métodos, entre los cuales, los principales se encuentran las heurísticas y meta-heurísticas teniendo como objetivo principal, generar soluciones de buena calidad en un tiempo computacional mínimo, soluciones óptimas en tiempo y respuesta.

(Fuentes-Penna, s.f.) indica que en la actualidad se han propuesto diversas técnicas para dar solución al TSP, de los cuales se pueden mencionar:

- **Algoritmos genéticos:** Consiste en encontrar un individuo cuya combinación de genes den solución al problema de visitar todas las ciudades una vez. Normalmente cada gen es una ciudad y el orden será el que indique como deben ser visitadas.
- **Redes neuronales:** Simula las conexiones entre los nodos, y cada recorrido por las diferentes neuronas genera un camino que indica el tour por todas las ciudades visitadas una sola vez.
- **Colonia de hormigas (ACO):** Las hormigas encuentran el camino más corto entre 2 puntos, de igual forma se considera el punto de inicio como el punto final, de esta forma las hormigas deben recorrer todas las ciudades en un circuito, sin pasar 2 veces por la misma ciudad.

- **Project Scheduling Problem (PSP):** Busca la solución considerando el mínimo de recursos durante cada recorrido.

Existe la opción de combinar algoritmos para crear meta-heurísticas con mayor efectividad, mejorando las soluciones que ofrece el algoritmo individual, como Algoritmos Genéticos con Redes Neuronales, PSP con Colonia de Hormigas, entre otras combinaciones.

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 d_{ij} entre las ciudades i y j ($d_i = \infty$ si las ciudades i y j comunicadas o si el punto $i = j$).

El máximo de recorridos en una situación de n ciudades es $(n - 1)!$ y se vuelve simétrico si $d_{ij} = d_{ji}$ para todas las i y j . De lo contrario, el modelo es asimétrico.

El modelo TSP se formula matemáticamente de la siguiente manera:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se llega a la ciudad } j \text{ desde la ciudad } i \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

$$d_{ij} = \infty \text{ para todas las } i = j \quad (7)$$

$$s. t \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1; j = 1, 2, \dots, n; \text{entra una vez a cada ciudad} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; i = 1, 2, \dots, n; \text{deja una vez cada ciudad} \quad (9)$$

$$\mu_i + 1 \leq \mu_j + n * (1 - x_{ij}); \text{rompe subtours} \quad (10)$$

$$\text{para } i = 2, \dots, n; i \neq j; j = 2, \dots, n \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}; \text{para todo } i \text{ y } j \quad (12)$$

$$\mu_i \geq 1, \text{para todo } i \quad (13)$$

3.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se exploraron los fundamentos y la aplicación de los modelos de optimización, proporcionando una visión integral de cómo estas herramientas matemáticas pueden abordar problemas complejos en diversos contextos.

Además, se han discutido técnicas clave para resolver estos modelos, como los métodos exactos, heurísticos, y metaheurísticos, cada uno de los cuales ofrece diferentes ventajas en términos de precisión y eficiencia computacional.

La teoría expuesta en este capítulo sienta las bases para la aplicación práctica que se abordará a continuación. El próximo capítulo se centrará en la implementación de estas técnicas en un caso de estudio concreto, proporcionando un puente entre la teoría abstracta y su aplicación en un escenario real.

CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS AL CASO DE ESTUDIO

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de las etapas de recolección y análisis de datos, así como también la formulación matemática y construcción del modelo de optimización. Para el desarrollo del caso de estudio se empleó los lenguajes de programación Python, el cual fue ocupado para el generador de entradas del modelo, y MATLAB para la construcción del modelo optimización.

4.1 Recopilación y manejo de datos

En esta sección se mostrará cómo se eligieron las diferentes paradas para las propuestas de rutas, de igual forma se definirá cómo se obtuvo el cálculo de distancias, los tiempos de tráfico y el costo de combustible en función del tipo de vehículo a utilizar, que posteriormente fungirán como datos de entradas válidas para los modelos que se desarrollan a continuación.

4.1.1 Selección de paradas y/o nodos

En primera instancia 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 el planteamiento del problema.

La búsqueda fue realizada por medio de la aplicación Garzabús desarrollado por el personal del Centro de Electrónica y Desarrollo de Aplicaciones Inteligentes (CEDAI), dicha aplicación tiene las características de mostrar todas las rutas disponibles de absolutamente todos los campus que provee la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), en formato de imagen, así como también la programación de horarios de cada una, cabe destacar que es de uso libre y está disponible para los sistemas operativos de teléfonos inteligentes más utilizados en la actualidad, Android y Apple. La interfaz de la aplicación en el sistema operativo Android se muestra a detalle en la Figura 8.

Es importante mencionar que dicha aplicación facilitó la obtención de datos de entrada para el modelo de optimización.



Figura 8: Interfaz de la aplicación “Garzabus” desarrollada por el Centro de Electrónica y Desarrollo de Aplicaciones Inteligentes (CEDAI) para el sistema operativo Android. Fuente: Google Play.

A continuación, se muestra un conjunto de veintidós paradas (validadas por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo), tanto para rutas matutinas como vespertinas, que fueron encontrados en la aplicación “Garzabús” para la programación de posibles rutas para Ciudad del Conocimiento – Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) y que pertenecen a la zona metropolitana de Pachuca de Soto, Hidalgo y sus alrededores (Tabla 1).

Lugar	Turno
ADO Tulipanes	Matutino
Arcos de Villas	Matutino
Av. Universidad (Esq. Av. San Martín de Porres)	Matutino
Bombonera Estadio	Vespertino
Fernández de Lizardi (Esq. Gasoducto)	Vespertino
Gasoducto (Esq. Fernández de Lizardi)	Matutino
Gasolinera Mobil Quinta Bonita (Blvd Nuevo Hidalgo Puente Peatonal OXXO)	Matutino
Gasolinera de Tuzos	Vespertino
Glorieta de Villas	Matutino
Julían Villagrán	Vespertino
Los Arcos	Vespertino
Parada Colinas del Valle (Esq. Edificio PRI Pachuca)	Matutino
Parada Esq. Plaza Bella	Matutino
Parque Pasteur (Enfrente de la Facultad de Medicina UAEH Ramírez Ulloa)	Vespertino

Parque Pasteur (Frente al Centro de Salud)	Matutino
Preparatoria No. 4	Matutino y vespertino
Puente Real de la Plata (Enfrente de Quinta Bonita)	Vespertino
Puente Río de las Avenidas (Parte de atrás de Plaza Bella)	Vespertino
Puente SAMS Club	Matutino
Soriana del Valle	Vespertino
Tuzos Paradero (Casi Esq. Río de las Avenidas)	Matutino y vespertino
Venta Prieta (18va. Zona Militar)	Vespertino

Tabla 1: Conjunto de nodos o paradas para turno matutino y vespertino que han sido validadas por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH).

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Determinación de conjuntos

Se obtuvieron dos conjuntos de paradas para la elaboración de la primera 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.

Cabe mencionar que se eligió a Tuzos como nodo de origen y de destino para ambos conjuntos debido a que el sistema de transporte de la institución lo ha manejado de esa manera para otra ruta ya existente, y por ende será utilizado tanto para la ruta matutina (nodo de origen) como para la ruta vespertina (nodo de destino), y dentro del sondeo fue uno de los asentamientos más solicitados por la comunidad estudiantil, de la misma manera se eligió a Ciudad del Conocimiento ya que es el campus que se pretende beneficiar en la presente

investigación. A continuación, se muestran en la Tabla 2 y la Tabla 3 los conjuntos generados para ambos turnos.

Nodo	Lugar
1 (Origen)	Tuzos Paradero (Esq. Río de las Avenidas)
2 (Viaje)	Caseta de Tulipanes
3 (Viaje)	Gasolinera Mobil Quinta Bonita (Blvd Nuevo Hidalgo Puente Peatonal OXXO)
4 (Viaje)	Parada Colinas del Valle (Esq. Edificio PRI Pachuca)
5 (Viaje)	Parada Esq. Plaza Bella
6 (Viaje)	Parque Pasteur (Frente al Centro de Salud)
7 (Viaje)	Puente SAMS Club
8 (Destino)	Ciudad del Conocimiento

Tabla 2: Conjunto de paradas existentes para turno matutino que han sido elegidas por la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

Nodo	Lugar
1 (Origen)	Ciudad del Conocimiento
2 (Viaje)	Bombonera Estadio
3 (Viaje)	Caseta de Tulipanes
4 (Viaje)	Parque Pasteur (Enfrente de la Facultad de Medicina UAEH Ramírez Ulloa)
5 (Viaje)	Puente Río de las Avenidas (Parte de atrás de Plaza Bella)
6 (Viaje)	Soriana del Valle
7 (Destino)	Tuzos paradero (Casi esq. Río de las Avenidas)

Tabla 3: Conjunto de paradas existentes para turno vespertino que han sido elegidas por la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

En la segunda propuesta, se generó nuevamente un par de conjuntos de nodos, pero a diferencia de la primera propuesta que fue una elección de nodos ya validados por el departamento de transporte de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), han sido propuestos en su totalidad por la comunidad estudiantil de Ciudad del Conocimiento – Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) gracias a un sondeo realizado, el cual tenía como objetivo obtener información acerca de las necesidades de transporte del alumnado, abordando cuestiones cómo la frecuencia de uso del transporte Garzabús, horarios de entrada y salida, lugar de residencia, así como también la opinión y diferentes propuestas de lugares

para asentar una parada de Garzabús. Dentro de la segunda propuesta se obtuvieron los siguientes conjuntos de nodos mostrados en la Tabla 4 para el turno matutino y la Tabla 5 para el turno vespertino.

Nodo	Lugar
1 (Origen)	Caseta de Tulipanes
2 (Viaje)	1er. Puente de Parque Los Encinos
3 (Viaje)	2do. Puente de San Fernando (Av. Las Torres)
4 (Viaje)	Arco de entrada Fraccionamiento Providencia
5 (Viaje)	Farmacia Guadalajara Paseos de Chavarría
6 (Viaje)	Gasolinera bp
7 (Viaje)	Gasolinera Shell Paseos de Chavarría
8 (Viaje)	OXXO de Forjadores
9 (Viaje)	Paradero San Cristóbal Providencia
10 (Viaje)	Paseo de las Reynas
11 (Viaje)	Valle de las estrellas (3B Circuito Providencia)
12 (Destino)	Ciudad del Conocimiento

Tabla 4: Conjunto de paradas para turno matutino que han sido propuestas por la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

Nodo	Lugar
1 (Origen)	Ciudad del Conocimiento
2 (Viaje)	1er. Puente de Paseo de las Reinas
3 (Viaje)	2do. Puente de San Fernando (Av. Las Torres)
4 (Viaje)	3er. Puente de Parque los Encinos Bodega Aurrera Entrada de Providencia
5 (Viaje)	Bodega Aurrera La Providencia Siglo XXI
6 (Viaje)	Fraccionamiento San Cristóbal
7 (Viaje)	Frente a Gasolinera bp Esq. Parada Tuzobus
8 (Viaje)	OXXO Paseos de Chavarría
9 (Viaje)	Rinconadas del Venado
10 (Viaje)	Tienda 3B Paseos de Chavarría
11 (Viaje)	Caseta de Tulipanes
12 (Destino)	Ciudad del Conocimiento

Tabla 5: Conjunto de paradas para turno vespertino que han sido propuestas por la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 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.

El tipo de distancias que se tomaron en cuenta para obtener resultados reales en el modelo fueron distancias de carreteras y de esa forma considerar los recorridos entre las diferentes paradas o nodos de los conjuntos seleccionados anteriormente, estos se obtuvieron mediante la herramienta de georreferenciación Microsoft Bing Maps mostrando su interfaz de ordenador en la Figura 9 con el sistema de coordenadas geográficas mundial WGS 84 tomando como criterio el obtener la ruta más rápida para automóviles (El-Rabbany, 2020).

Los tiempos obtenidos fueron de tráfico real utilizando la misma herramienta mencionada anteriormente, es importante comentar que las mediciones se realizaron en horarios matutinos o vespertinos, dependiendo del conjunto de asentamientos, para tener un acercamiento más exacto a la realidad y como consecuencia el modelo pueda arrojar resultados bastante acertados.

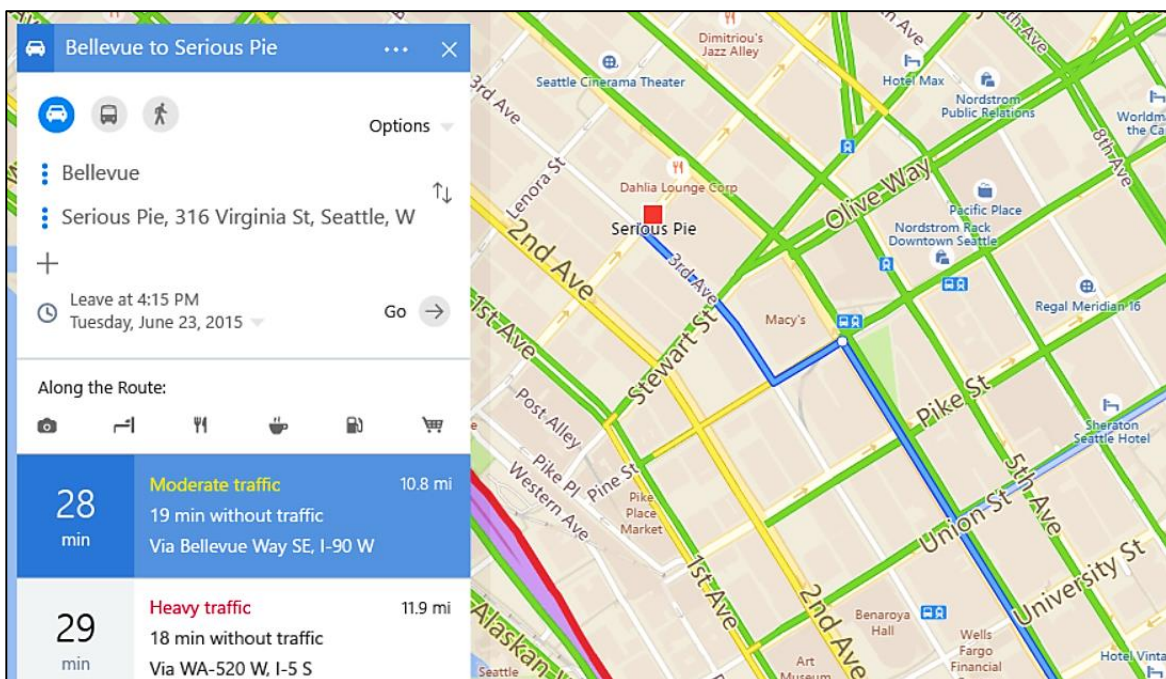


Figura 9: Interfaz de la herramienta de georreferenciación "Microsoft Bing Maps" para ordenador. Fuente: Microsoft.

4.1.3.1 Código en Python

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, la cual 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).

Este código utiliza la API de Bing Maps para calcular y registrar tiempos y distancias entre múltiples ubicaciones, procesándola y exportándola para su uso en el modelo de optimización. Cabe resaltar que se implementó una función de control de peticiones para poder respetar la cuota de solicitudes de la API, haciendo que el proceso sea robusto y eficiente (Código 1).

```
import pybing
import time
import numpy as np
import pandas as pd

from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

n=7
bing = pybing.Bing('LLAVE')

lugares = ([[20.09451, -98.71071], [20.06170, -98.77493], [20.05979, -
98.76795], [20.11714, -98.73242], [20.11353, -98.74343], [20.09654, -
98.76056], [20.05566, -98.75444]])
print(lugares)

time_matrix = [[0 for i in range(n)] for j in range(n)]
distanceMatrix = [[0 for i in range(n)] for j in range(n)]
```



```

# Función para pausar el código para no exceder el número de peticiones
por unidad de tiempo
def pausar_cada_minuto(tiempo_inicio):
    tiempo_transcurrido = time.time() - tiempo_inicio

    if tiempo_transcurrido >= 150:
        print(f"Por cada 150 segundos transcurridos se pausará el código
por 25 segundos.")
        time.sleep(25)
        return time.time()
    return tiempo_inicio

tiempo_inicio = time.time()

for i in range(0, n):
    iLat = lugares[i][0]
    iLon = lugares[i][1]
    start = (iLat, iLon)
    for j in range(0, n):
        jLat = lugares[j][0]
        jLon = lugares[j][1]
        end = (jLat, jLon)

        # Pausar cada cierto tiempo
        tiempo_inicio = pausar_cada_minuto(tiempo_inicio)

        distanceMatrix[i][j] = bing.travelDistance(start, end)
        time_matrix[i][j] = bing.travelTime(start, end)/60

matriz_tiempo = np.array(time_matrix)
matriz_distancia = np.array(distanceMatrix)

print(matriz_distancia)
print(matriz_tiempo)

matriz_tiempo= pd.DataFrame(matriz_tiempo)
matriz_distancia= pd.DataFrame(matriz_distancia)

matriz_tiempo.to_excel("time.xlsx")
matriz_distancia.to_excel("distancia.xlsx")

```

Código 1: Generador de matrices de distancias y tiempos de utilizando la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) "Pybing" de Microsoft desarrollado en el lenguaje de programación Python.

4.1.4 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, mostrando sus especificaciones físicas en la Figura 10, los cuales se caracterizan por brindar soluciones eficientes a una creciente demanda de movilidad masiva, 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 (Figura 11), 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, también incluye con una certificación de emisiones EPA-04 (DINA, 2019).

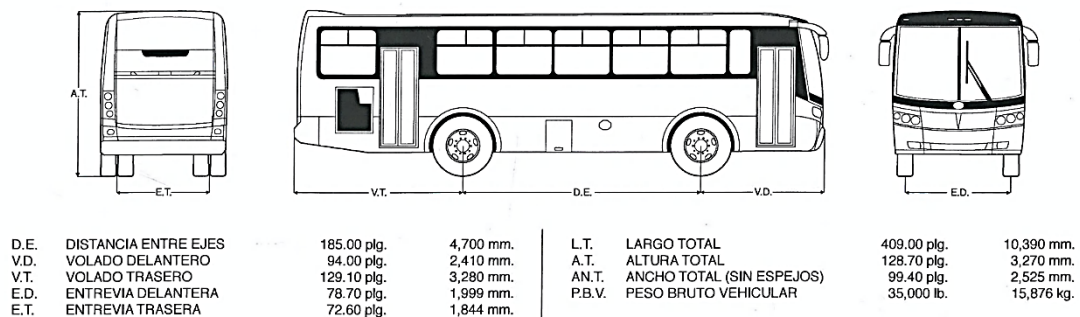


Figura 10: Diseño de autobús DINA LINNER utilizado para las necesidades de transporte del alumnado de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Fuente: DINA.

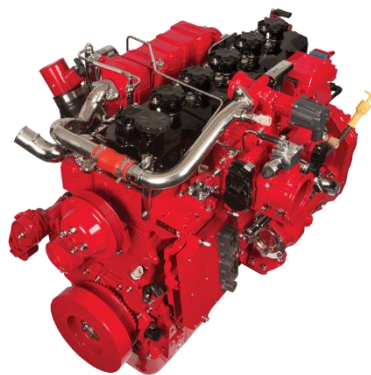


Figura 11: Motor Cumminis ISB6.7 Fuente: Cumminis.

Otra entrada importante dentro modelo es el costo de diésel en la actualidad, el cual ronda entre los \$24.35 MXN (pesos mexicanos).

4.2 Modelo de optimización

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 válido 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, un nodo de origen, un nodo de destino y los 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 12).

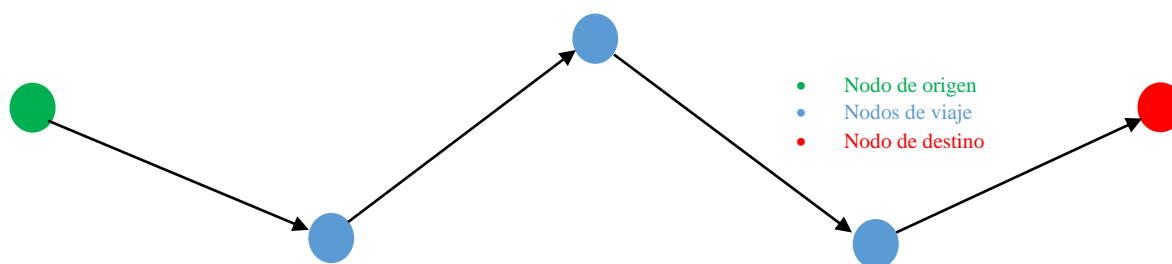


Figura 12: Representación gráfica de la adaptación del TSP: “Travel Salesman Problem with Walking Route (TSP-WR)”. Fuente: Elaboración propia.

Cómo factor de optimización se tomará a la distancia de carretera obtenida por medio de Microsoft Bing Maps gracias al código Pybing, es elegida debido a que juega un papel de mayor relevancia dentro del sistema de transporte universitario, minimizando la distancia se podrá reducir el consumo de combustible y de igual forma reducir el kilometraje de cada unidad vehicular y de esa forma no se realice mantenimiento frecuentemente.

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 de gran utilidad para tener un panorama más amplio de la ruta obtenida y analizar si esta se acerca a la realidad y verificar si es viable en relación al tiempo para poder llevarla a cabo dentro de la universidad.

4.2.1 Formulación matemática

A continuación, se presentará la formulación matemática de la adaptación del problema 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)
- $x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se llega a la ciudad } j \text{ desde la ciudad } i \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad \mathbf{V.D.} \quad (14)$

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij} x_{ij} \quad (15)$$

Sujeto a:

1. Cada ciudad debe ser visitada exactamente una vez:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

2. No puede haber subtours:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j \neq i} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq \{1, 2, \dots, n\}, |S| \geq 2 \quad (18)$$

3. Restricción del nodo de origen:

$$\sum_{j=1, j \neq o}^n x_{oj} = 1 \quad (19)$$

Donde o es el nodo de origen

4. Restricción del nodo de destino:

$$\sum_{i=1, i \neq d}^n x_{id} = 1 \quad (20)$$

Donde d es el nodo de destino

5. Calculo de tiempos de tráfico interarribo:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n t_{ij} x_{ij} + s \quad (21)$$

6. Calculo del costo de combustible del recorrido:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij} x_{ij} cp \quad (22)$$

4.2 Método de optimización

Para la puesta en marcha de la construcción del modelo de optimización, tuvo que seleccionarse una técnica adecuada en función a la dificultad del problema, dado que el Problema del Agente Viajero - PAV (Travel Salesman Problem - TSP, en inglés) es un problema clasificado cómo NP-Hard dentro de la optimización combinatoria y NP-Completo en el campo de la complejidad computacional, el tiempo computacional aumentará de forma exponencial con respecto al número de ciudades que aborde el entorno en donde se aplicará.

Con la justificación anterior podemos inferir que un método exacto tardaría demasiado tiempo computacional en encontrar una respuesta óptima al problema, y más si es un problema con aplicación real que requiere una respuesta en el momento, haciendo más ineficiente esa opción por lo que se tendría que buscar una técnica meta-heurística para encontrar una buena solución en un tiempo adecuado.

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 de los Algoritmos Genéticos.

Esta técnica ofrece una codificación numérica bastante coherente al momento de interpretar rutas, además de que resulta muy sencilla de interpretar y no es necesario aprender conocimientos específicos sobre el problema que se intenta resolver debido al principio biológico de evolución que es implementado para las resoluciones.

La metodología que seguirá el Algoritmo Genético se ejemplifica en el diagrama de flujo de la Figura 13 y es descrito de la siguiente manera:

- **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.
- **Paso 2 – Evaluar población:** Se calcularán los costos de cada individuo 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 en la cual 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.

- **Paso 5 – Cruzar población:** Se generan nuevas soluciones mediante una serie de cruces entre dos individuos de la nueva población.
- **Paso 6 – Mutar población:** Se realiza una mutación en algunas poblaciones para mejorar la descendencia.
- **Paso 7 – Reemplazar población:** Se reemplaza la nueva población mejorada en la población original.

Este proceso se repetirá dependiendo el número de iteraciones que le sea asignado para que de esa forma las siguientes generaciones vayan mejorando la descendencia de la población y tratar de llegar al óptimo global del problema.

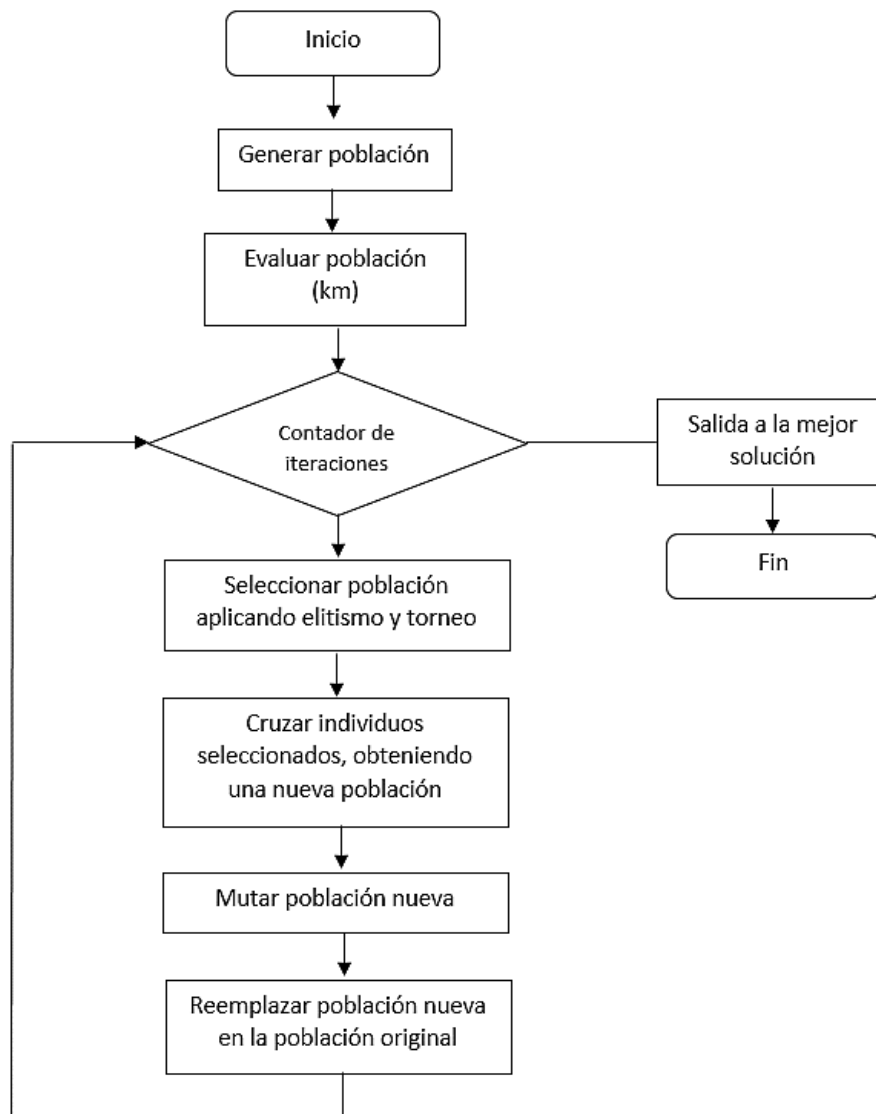


Figura 13: Diagrama de flujo de la metodología que seguirá el Algoritmo Genético propuesto. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Código en MATLAB

Para la construcción del modelo de optimización se eligió el lenguaje de programación MATLAB debido a su alto nivel para realizar cálculos científicos y de ingeniería y que también ofrece una gran facilidad para poder operar con arreglos matriciales.

4.3.2.1 Introducción de datos de entrada del modelo y arreglos del algoritmo

Primeramente, se deben de introducir las entradas al modelo (Código 2), las cuales en este contexto se dividen en dos, los datos del problema y los datos del algoritmo, los datos del problema son las siguientes:

- Matriz de distancias entre ciudades, nodos o paradas (la cual es importada del primer archivo de Excel generado del código Pybing)
- Matriz de distancias entre ciudades, nodos o paradas (el cual es importado del segundo archivo de Excel generado del código Pybing)
- Tiempo de parada del autobús
- Número de ciudades, nodos o paradas
- Precio de diésel
- Consumo de diésel

Para el segundo conjunto de entradas, los datos del algoritmo del modelo son las siguientes:

- Número de población
- Número de elitismo
- Número de iteraciones

```
clear all;
clc;
close all;

rng('shuffle');

%DATOS

%Datos del problema
dist = xlsread('distancia', 1);
time = xlsread('time', 1);
timeStop = 1;
```



```

nCiudades = 4; %SIN TOMAR EN CUENTA EL PUNTO DE ORIGEN %NODO (1)= PUNTO
DE ORIGEN %NODO (NCIUDADES+1)= PUNTO DE DESTINO
precioDiesel = 24.35; %PESOS POR LITRO
consumoDiesel = 0.4; %LITROS POR KILOMETRO

%Datos del algoritmo
nPoblacion = 40;
nElitismo = 4;
nIter = 10;

```

Código 2: Datos de entrada del modelo de optimización desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB.

Otro aspecto importante en el modelo de optimización es la creación de arreglos matriciales para almacenar de una forma más eficiente (en términos de tiempo computacional) el conjunto de individuos que serán parte tanto de la población general como de la nueva población que contiene a los individuos seleccionados por medio del elitismo y del torneo, así como también sus diferentes costos,

Para ello se deben de elaborar matrices y vectores que contengan ceros, eso hará alusión a un arreglo vacío el cual se llenará con diferentes valores numéricos como se muestra a continuación en el Código 3.

```

%Arreglos del algoritmo
costoP = zeros(nPoblacion,1);
costoP;

nv_pob = zeros(nPoblacion,nCiudades+1);
nv_pob;

nv_costoP = zeros(nPoblacion,1);
nv_costoP;

Hijos = zeros(nPoblacion,nCiudades+1);

```

Código 3: Arreglos matriciales de ceros del modelo de optimización desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.2 Modular del Algoritmo Genético

Una de las actividades primarias de la construcción del modelo de optimización de este caso práctico es la programación un modular que gestione las diferentes funciones o etapas que sigue un Algoritmo Genético.

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 fácil realizar modificaciones sobre este debido a que todo está interconectado de manera ordenada.

También en el modular se creará un arreglo el cual almacena el mínimo por cada iteración realizada con el fin de poder analizar posteriormente el comportamiento de la función objetivo y observar gráficamente en que iteración tiende al mínimo global y se obtiene la mejor ruta posible con el objetivo de disminuir la cantidad de iteraciones y hacer que el programa no trabaje de más (Código 4).

```

%MODULAR

%Generar poblacion
Poblacion = generar_poblacion(nPoblacion,nCiudades);
%Calcular costos de la poblacion
for i=1:nPoblacion
    ind = Poblacion(i,:);
    costoP(i) = calcular_costo(ind, dist, nCiudades);
end

    %ARREGLO DE MINIMOS POR ITERACION
    minimos=zeros(nIter,1);
tic
for i = 1:nIter
    i;
    %Elitismo
    [Pob_sel,Costo_sel] =
seleccionar_poblacion_elitismo(Poblacion,costoP,nElitismo,nPoblacion);
    nv_pob(1:nElitismo,:)=Pob_sel(1:nElitismo,:);
    nv_costoP(1:nElitismo,:)=Costo_sel(1:nElitismo,:);
    %Selección Torneo
    [Pob_sel_tor,Costo_sel_tor] =
seleccionar_poblacion_torneo(Pob_sel,Costo_sel,nElitismo);
    nv_pob(nElitismo+1:end,:)=Pob_sel_tor; %ESTO ES LO QUE SALIO DEL
TORNEO Y POR ENDE VA A SER LA ENTRADA DEL CRUCE
    nv_costoP(nElitismo+1:end,:)=Costo_sel_tor;
    %Cruce
    %LLAMAR A LA FUNCION DE CRUCE (LA DE ABAJO) PARA QUE LA HAGA NPOB/2
DE VECES
    for j = 1:nPoblacion/2
        %SELECCION / LLAMAR DE PADRES DE LA POBLACION COPIADA (NV_POB)
        ic = zeros(nPoblacion/2,2); %GENERO UN ARREGLO DE ZEROS
        t1 = randperm(nPoblacion/2); %GENERA UN VECTOR QUE CONTENGA
NUMEROS DEL 1 AL NPOB/2 DUDA
        t2 = randperm(nPoblacion/2)+nPoblacion/2; %GENERA UN VECTOR QUE
CONTENGA NUMEROS DEL NPOB/2 EN ADELANTE DUDA
        ic(:,1) = t1'; %SE LLENA EL ARREGLO DE ZEROS CON LOS VECTORES
GENERADOS EN LA PRIMER COLUMNA
        ic(:,2) = t2'; %SE LLENA EL ARREGLO DE ZEROS CON LOS VECTORES
GENERADOS EN LA SEGUNDA COLUMNA
    end
end

```

```

P1 = nv_pob(ic(j,1),:);
P2 = nv_pob(ic(j,2),:);
[H1,H2] = cruzar_poblacion(P1,P2,nv_pob,nCiudades,nPoblacion);
Hijos(j*2-1,:)=H1;
Hijos(j*2,:)=H2;
end
%Mutacion
[Hijos_mutados,Costos_mutados]=mutar_poblacion(Hijos, nPoblacion,
dist, nCiudades); %PASAR EN UN ARREGLO A LOS HIJOS MUTADOS
%Union de nv_pob con Hijos_mutados y de nv_costoP con Costos_mutados
Pob_tot=[nv_pob;Hijos_mutados];
Cost_tot=[nv_costoP;Costos_mutados];
%Ordenar a la Pob_tot y a Cost_tot de menor a mayor
[valores,indices]=sort(Cost_tot);
Pob_tot_ord = Pob_tot(indices,:);
%Seleccionar poblacion total ordenada en base al numero de poblacion
(partirla a la mitad, se quedan los 30 mejores)
Pob_tot_sel = Pob_tot_ord(1:nPoblacion,:);
Costo_tot_sel = valores(1:nPoblacion);
%Reemplazar poblaciones y costos totales en poblaciones y costos
originales
Poblacion=Pob_tot_sel;
costoP=Costo_tot_sel;
minimos(i)=min(costoP);
end

```

Código 4: Modular que gestiona las diferentes funciones o etapas del Algoritmo Genético desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.3 Funciones o etapas del Algoritmo Genético

Cómo se había mencionado en la sección pasada el modelo de optimización desarrollado en MATLAB está compuesto por seis funciones, las cuales representan una etapa del algoritmo genético.

Estas funciones son programadas dentro del mismo código o script con el objetivo de disminuir el tiempo a la hora de ejecutar el algoritmo, ya que si se programa cada función en un diferente código sería demasiado tardado para el programa.

Las seis funciones se mencionarán a continuación:

- **Función 1:** Generar población.
- **Función 2:** Calcular costo.
- **Función 3:** Elitismo.
- **Función 4:** Torneo.

- **Función 5:** Cruce.
- **Función 6:** Mutación.

4.2.3.3.1 Generador de población (Diseño de cromosoma)

En esta primera etapa se debe generar una población de individuos en función al número de individuos y el número de ciudades los cuales se tienen que establecer desde los datos de entrada para que se pueda crear un arreglo de ceros y llenarlo por medio de combinaciones de números aleatorias.

Los individuos tienen la particularidad de que el primer gen y el último 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 combinaciones de números aleatorios, ya que estos son las diferentes asignaciones que pueden tener los nodos de viaje.

A continuación, en la Figura 14 se muestra un ejemplo gráfico de la codificación del cromosoma que es utilizada como propuesta para la resolución del problema y de igual forma la programación del mismo en el Código 5.



- **Nodos de viaje generados por combinación de números aleatorios.**
- **Nodo de origen fijo.**
- **Nodo de destino fijo.**

Figura 14: Codificación propuesta para abordar la problemática TSP-WR mediante Algoritmos Genéticos. Fuente: Elaboración propia.

```
%Funcion para generar poblacion inicial
function Pob = generar_poblacion(nPoblacion,nCiudades)
Pob = zeros(nPoblacion, nCiudades+1);
for i = 1:nPoblacion
    perm = randperm(nCiudades-1);
    Pob(i,:)=[1,perm+1,nCiudades+1]; %TRUCO / MODIFICACION ORIGEN (1) -
    DESTINO (NCIUDADES+1)
end
end
```

Código 5: Función que genera la población del Algoritmo Genético desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.3.2 Cálculo de costos

Es importante mencionar que cada individuo hace referencia a una posible ruta de Garzabús y como se comentaba anteriormente cada gen es un nodo o parada, por lo que una vez generada la población de individuos se debe calcular el costo total (kilómetros) de cada uno.

Para ello se tendrá que calcular la distancia interarriba entre cada par de nodos, hasta finalizar con el cálculo de la ruta completa mediante una función programada en el Código 6. Para ello la función programada se encargará de buscar las distancias dentro de la matriz generada por el código Pybing, la cual fue ingresada cómo una entrada del modelo.

```
%Funcion para obtener /evaluar el costo de los individuos  
function costo = calcular_costo(individuo,dist,nCiudades)  
costo = 0;  
for i=1:nCiudades  
    inicio = individuo(i);  
    fin = individuo(i+1);  
    valor = dist(inicio,fin);  
    costo = costo + valor;  
end  
end
```

Código 6: Función que calcula los costos de cada individuo de la población generada por el Algoritmo Genético desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.3.3 Selección de población con base a elitismo

Una vez generada la población y obtenidos sus costos se procederá a realizar la etapa de selección en donde primeramente se aplicará elitismo, esto se realizará con la finalidad de evitar que el mejor individuo de la población actual fracase en producir sus descendientes para la próxima generación (Prendes-Gero, et al., 2002).

Para poder llevar a cabo esta selección se debe ordenar de menor a mayor la población generada tomando como referencia sus costos evaluados y posterior a ello copiar una parte de los mejores individuos de la población en un arreglo matricial vacío, a esta copia la denominaremos cómo “élite”, cabe mencionar que el nivel de elitismo se encuentra establecido en las entradas del modelo de optimización. Para este caso particular se utilizó un nivel de elitismo de cuatro individuos.

A continuación, se mostrará la programación utilizada para poder llevar a cabo esta primera parte del proceso de selección en el Código 7.

```
%Funcion para seleccionar la poblacion con base a elitismo
function [Pob_sel,Costo_sel] =
seleccionar_poblacion_elitismo (Poblacion,costoP,nElitismo,nPoblacion)
%Ordenar valores de costo de menor a mayor
[valor,idx]=sort(costoP);
Pob_ord = Poblacion(idx,:);
%Seleccionar poblacion con elitismo (poblacion de individuos)
Pob_sel = Pob_ord(1:nPoblacion,:);
Costo_sel = valor(1:nPoblacion);
end
```

Código 7: Función que selecciona a los individuos elitistas de la población generada por el Algoritmo Genético desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.3.4 Selección de población con base a torneo

En la segunda parte de la etapa de selección se aplicará el torneo, implica realizar varios duelos o enfrentamientos entre dos diferentes individuos de la población ($K=2$), los cuales serán elegidos aleatoriamente. El ganador de cada duelo será el que tenga menor costo, será seleccionado para ser parte de la nueva población junto con los demás individuos elitistas y de igual forma participará para las siguientes etapas: cruce y mutación (Figura 15).

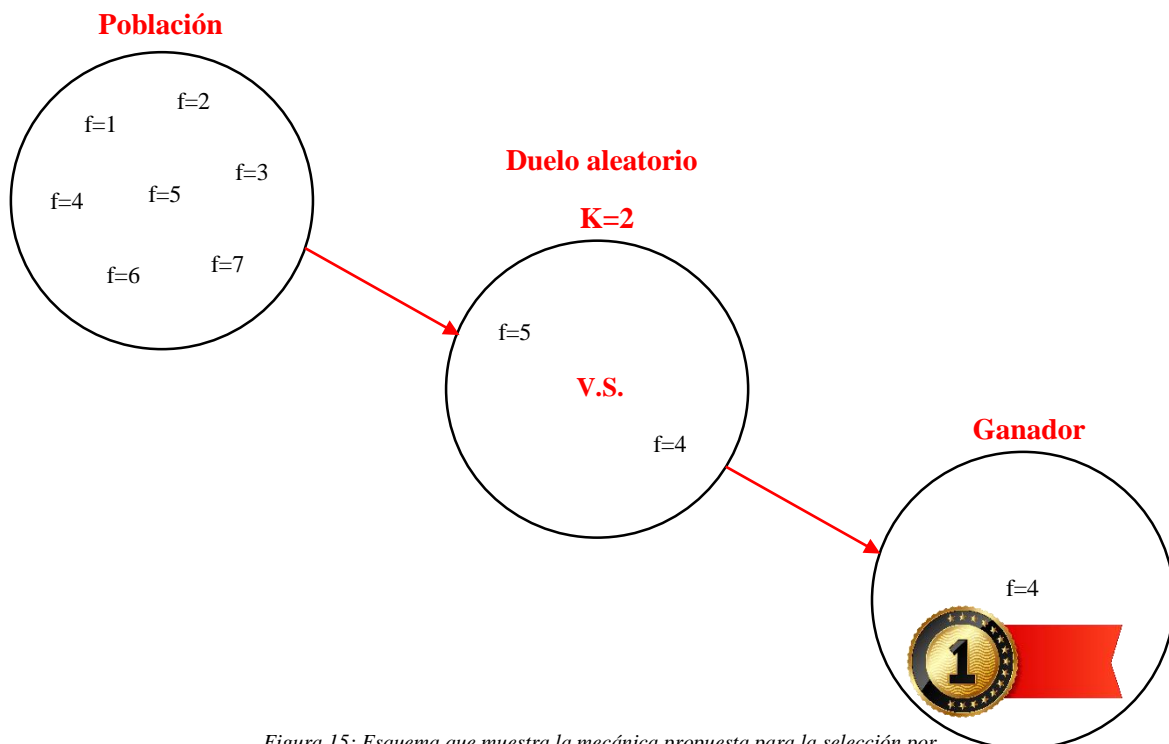


Figura 15: Esquema que muestra la mecánica propuesta para la selección por torneo para Algoritmos Genéticos. Fuente: Elaboración propia.

Una característica peculiar de esta propuesta es que el torneo solo podrá jugarse con individuos que no sean elitistas con el fin de que exista mayor diversificación dentro de la nueva población y se obtengan mejores resultados de forma eficaz. También se realizarán enfrentamientos hasta que se logre llenar el arreglo matricial de la nueva población, cómo se expresa en la siguiente formula:

$$N_t = N_i - N_e \quad (23)$$

Donde:

N_t – Número de torneos

N_i – Número de individuos de la población

N_e – Número de individuos elitistas

De esa forma se muestra en el Código 8 la función para poder concluir la etapa de selección de individuos.

```
%Funcion para seleccionar la poblacion con base a torneo
function [Pob_sel_tor, Costo_sel_tor] =
seleccionar_poblacion_torneo(Pob_sel, Costo_sel, nElitismo)
[R C] = size(Pob_sel);
%Vector que contiene los individuos seleccionados
idx_t = zeros(1, R-nElitismo);
t1 = randperm(R-nElitismo)+nElitismo;
t2 = randperm(R-nElitismo)+nElitismo;
fc = [t1', t2'];
for i = 1: R-nElitismo
    if (Costo_sel(fc(i,1)) < Costo_sel(fc(i,2)))
        idx_t(i) = fc(i,1);
    else
        idx_t(i) = fc(i,2);
    end
end
Pob_sel_tor = Pob_sel(idx_t,:); %Ya tengo mi salida de variable para los
individuos pero tambien necesito una para los costos (Costo_sel_tor)
Costo_sel_tor = Costo_sel(idx_t);
end
```

Código 8: Función que selecciona a los individuos mediante torneo desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.3.5 Cruce de población

Cómo paso inicial para llevar a cabo la etapa de cruce en la población de Algoritmos Genéticos se deben importar los dos padres los cuales serán tomados al azar de la nueva

población que está conformada por los individuos elitistas y los individuos ganadores del torneo.

Enseguida deberán crearse un par de arreglos matriciales vacíos, del tamaño de las ciudades elegidas para el desarrollo del modelo, para introducir al par de hijos engendrados por los dos padres previamente seleccionados.

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, 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 en el sistema de transporte universitario (Figura 16).



- Nodos de viaje seleccionables para la etapa de cruce
- Nodos de origen y destino no aptos para la etapa de cruce

*Figura 16: Genes seleccionables y genes no aptos para la etapa de cruce del Algoritmo Genético.
Fuente: Elaboración propia.*

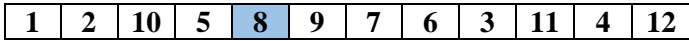
Una vez definidas, las posiciones y la cantidad de genes de los padres (posiciones), serán asignadas a los respectivos hijos, inmediatamente los genes sobrantes de los padres se asignarán al hijo contrario. Pero es de gran importancia mencionar que, si en dado caso de que exista un gen repetido en la 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.

A continuación, la Figura 17 ejemplifica de mejor manera el cruce propuesto para el desarrollo del Algoritmo Genético al igual que su programación en el Código 9.

Padre 1



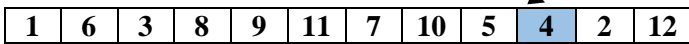
Hijo 1



Padre 2



Hijo 2



- Genes fijos
- Genes asignados al respectivo hijo
- Genes asignados al hijo contrario
- Gen faltante asignado al respectivo hijo para completar el arreglo

Figura 17: Cruce propuesto para el Algoritmo Genético. Fuente: Elaboración propia..

```
%Funcion para cruzar la poblacion
function [H1,H2] = cruzar_poblacion(P1,P2,nv_pob,nCiudades,nPoblacion)

%CUANTOS Y CUALES
tot = randi([1 (nCiudades-1)]);
pos = 1+randperm(nCiudades-1, tot);

%ARREGLO DEL PRIMER HIJO
H1 = zeros(1,nCiudades+1);
H1(1) = 1;
H1(nCiudades+1) = nCiudades+1;
%ARREGLO DEL SEGUNDO HIJO
H2 = zeros(1,nCiudades+1);
H2(1) = 1;
H2(nCiudades+1) = nCiudades+1;

%PASAR LOS GENES SELECCIONADOS DE LOS INDIVIDUOS PADRES A LOS ARREGLOS DE
%LOS HIJOS
H1(pos) = P1(pos);
H2(pos) = P2(pos);

%VECTOR DE POSICIONES QUE SERA UTILIZADO COMO PUNTO DE COMPARACION PARA
EL
%SETDIFFF
vecpos=2:nCiudades;
```

```

%OBTENER LAS POSICIONES FALTANTES QUE NO FUERON SELECCIONADAS EN EL PADRE
2 PARA EL PRIMER HIJO
posf=setdiff(vecpos,pos);

%CRUZA DE GENES ENTRE LOS DOS PADRES PARA CREAR AL PRIMER HIJO
CONSERVANDO EL ORDEN POR MEDIO DE
%SETDIFF STABLE
aux=setdiff(P2,H1,'stable');
H1(posf)=aux;
%CRUZA DE GENES ENTRE LOS DOS PADRES PARA CREAR AL SEGUNDO HIJO
CONSERVANDO EL ORDEN POR MEDIO DE
%SETDIFF STABLE
aux=setdiff(P1,H2,'stable');
H2(posf)=aux;
end

```

Código 9: Función que cruza a los individuos desarrollada en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.3.6 Mutación de población

Se explicará la última función desarrollada para el funcionamiento del Algoritmo Genético, la cual es mutación.

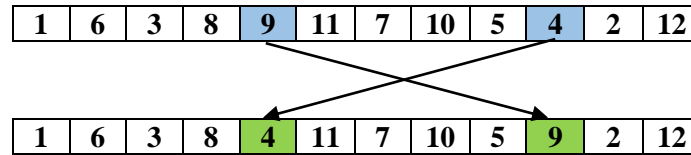
Análogo a la mutación biológica, una mutación de Algoritmo Genético causa pequeñas alteraciones en puntos determinados de la codificación del individuo, normalmente suele realizarse después del cruce aplicado a los descendientes, mutando con cierta probabilidad (Angulo, 2021).

La mutación brinda aleatoriedad a los individuos de la población ya que se encarga de aumentar o reducir el espacio de búsqueda proporcionando variabilidad o diversificación genética entre los individuos con el objetivo de lograr mejores resultados (Sosa, et al., 2014).

En esta problemática se propone abordar un operador sencillo y común, para empezar, se establecerá una probabilidad 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 siguiente.

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) ilustrado de mejor forma en la Figura 18. También se muestra su programación en el Código 10.



- Genes seleccionados aleatoriamente para la mutación
- Genes que intercambiaron su posición debido a la mutación

Figura 18: Mutación propuesta para el Algoritmo Genético. Fuente: Elaboración propia..

```

%Funcion para mutar la poblacion
function [Pob_mut,mut_costoP] = mutar_poblacion(Hijos, nPoblacion, dist,
nCiudades)

%DATOS
probmud = 0.3;

%ARREGLO QUE CONTENDRA A LOS COSTOS DE LOS INDIVIDUOS MUTADOS
mut_costoP = zeros(nPoblacion,1);

%ARREGLO QUE CONTENDRA A LOS DOS INDIVIDUOS MUTADOS
Pob_mut = Hijos;
for i = 1:nPoblacion
    %AQU? SE DETERMINA SI SE VA A REALIZAR O NO LA MUTACION
    if rand() <= probmud
        locus1 = randi([2 nCiudades]);
        locus2 = randi([2 nCiudades]);
        while locus2 == locus1
            locus2 = randi([2 nCiudades]);
        end
        %SE HACE LA MUTACION CON UN CAMBIO DE GEN POR CADA INDIVIDUO
        %ELEGIDO DE FORMA ALEATORIA
        temp = Pob_mut(i,locus1);
        Pob_mut(i,locus1) = Pob_mut(i,locus2);
        Pob_mut(i,locus2) = temp;
    else
        %NO SE REALIZA LA MUTACION
        [Pob_mut] = [Pob_mut; Pob_cru(i,:)];
        continue
    end
    %EXTRAIGO LOS COSTOS DE LA POBLACION MUTADA
    mut_costoP(i) = calcular_costo(Pob_mut(i,:),dist,nCiudades);
end
end

```

Código 10: Función que muta a los individuos desarrollada en el lenguaje de programación MATLAB.

4.2.3.4 Impresión de salidas

La salida de un modelo son los datos sin procesar, es decir que aún no representan necesariamente la realidad o los objetivos del problema ya que todavía no son interpretados ni analizados de forma diplomática, dichos datos son generados en función a los parámetros de entrada, las suposiciones, las reglas y la lógica que se ha especificado en un inicio.

Es importante mencionar que la salida que arroja el modelo de optimización ayudará a mostrar un panorama general del escenario que se está estudiando y de esa forma aportar soluciones viables a la problemática.

Para este caso de estudio se debe obtener la siguiente información.

- Ruta optima
- Distancia total de la ruta
- Costo total del combustible de la ruta
- Tiempos interarribo por cada parada de la ruta

4.2.3.4.1 Ruta óptima y distancia total

Cómo se había mencionado anteriormente los individuos generados por el Algoritmo Genético hacen referencia a una ruta de transporte por lo que el mejor individuo, será el que arroje el modelo cómo resultado definitivo.

Para determinar cuál es el mejor individuo se debe tomar en cuenta el factor de optimización previamente seleccionado, el cual en este caso es minimizar la distancia total recorrida en kilómetros.

El individuo resultante será el que tenga el menor kilometraje de todas las iteraciones.

4.2.3.4.2 Cálculo del costo total del recorrido

Un indicador importante para determinar si una ruta es óptima y viable es el costo total del recorrido, para calcularlo 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:

$$CT = dCvP \quad (24)$$

Donde:

CT – Costo total del recorrido

d – Distancia total de la ruta

Cv – Consumo vehicular

P – Precio de combustible

4.2.3.4.3 Cálculo de tiempos interarribo de la ruta óptima

Una particularidad relevante de las salidas que ofrece el modelo es que puede calcular los tiempos acumulados entre cada parada o arribo de la mejor ruta que fue obtenida y secuenciada por el Algoritmo Genético.

Para ello tuvo que programarse un código similar al que fue creado en la función que calcula los costos, teniendo como diferencia principal que su entrada es la matriz de tiempos de tráfico generada antes por el código Pybing.

Otra diferencia es que por cada parada tiene que considerar el tiempo de parada, es decir el tiempo el cual el chofer se detiene a esperar a los estudiantes que arribaran el autobús.

A continuación, se muestra el Código 11 que fue programado para realizar este cálculo.

```
%CALCULO DE TIEMPOS
tiempo=0;
for i=1:nCiudades
    inicio = ruta(i);
    fin = ruta(i+1);
    valor = time(inicio,fin)+timeStop;
    disp('Tiempo inter-arribo por parada (minutos):')
    tiempo = tiempo + valor
end
```

Código 11: Cálculo de tiempos interarribo de la ruta óptima generada por el Algoritmo Genético desarrollada en el lenguaje de programación MATLAB.

4.3 Conclusiones de la implementación de técnicas

En este capítulo se abordó la implementación de diversas técnicas para resolver la problemática previamente planteada. Las metodologías aplicadas, incluyen a los Algoritmos

Genéticos como herramienta principal, adaptando Problema del Agente Viajero (PAV) de tal forma que se logró adaptar a las características particulares del entorno en el que se está aplicando.

La implementación de estos métodos ha sido llevada a cabo con el objetivo de proporcionar un conjunto de soluciones que no solo sean óptimas en términos de costos operativos, sino también presente flexibilidad para la implementación en un contexto real.

La siguiente fase de este estudio consiste en un análisis detallado de los resultados obtenidos. El próximo capítulo, "Análisis y comparación de resultados", se enfocará en evaluar las distintas rutas generadas por las técnicas aplicadas. Este análisis proporcionará una visión integral sobre las ventajas y limitaciones de cada enfoque en la práctica. A través de la comparación de los resultados, se busca ofrecer recomendaciones fundamentadas que faciliten la toma de decisiones para la planificación y ejecución del servicio de transporte universitario Garzabús.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del modelo de optimización, el cual abordará el diseño de los diferentes recorridos, la programación de horarios en función al sistema de transporte universitario Garzabús y una comparativa entre los recorridos existentes y las nuevas propuestas de investigación, tomando como indicadores el costo, la distancia y el tiempo.

5.1 Resultados

El resultado de un modelo es la interpretación y el análisis minucioso de la salida del modelo en relación con el planteamiento de la problemática real que se está tratando de resolver capturan la relevancia y las implicaciones del problema, es de suma importancia ya que refleja los diferentes niveles de abstracción y validez del modelo.

La validación de resultados es el proceso de comprobar si el resultado del modelo es útil, por lo que automáticamente valida el modelo y lo atribuye como relevante, creíble y aplicable al problema real, y que además logra proporcionar información y recomendaciones que pueden respaldar la toma de decisiones. Para ello se pueden aplicar técnicas como la calibración, la validez aparente, el juicio de expertos, el análisis de escenarios y la más importante, experimentación con el sistema real.

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 de cada corrida del modelo cómo el número de iteraciones, los parámetros del Algoritmo Genético (número de población, nivel de elitismo y nivel de mutación), el tiempo computacional, el tiempo de espera utilizado en cada parada, permitiendo 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.

Con el fin de ilustrar todas las rutas obtenidas por el modelo, se trazó cada recorrido en la herramienta Google Maps con el fin de tener una mejor apreciación dentro de un mapa digital de la zona metropolitana de Pachuca de Soto y sus alrededores. También se imprime una gráfica que muestra el valor mínimo por cada iteración para observar el momento en cuando el algoritmo tiende al mínimo más óptimo (Figura 19).

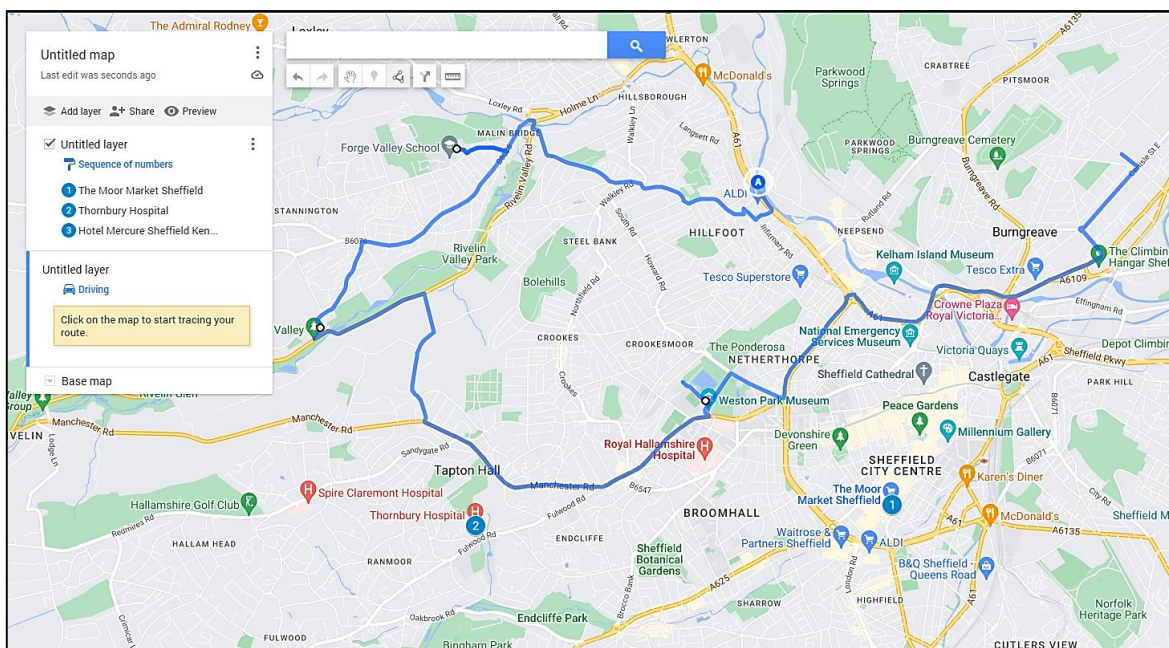


Figura 19: Interfaz de la herramienta de georreferenciación “Google Maps” para ordenador, trazando una ruta.
Fuente: Google.

5.1.1 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.

5.1.1.1 RUTA CIUDAD DEL CONOCIMIENTO - ICEA

Cómo se menciona en el apartado anterior, para esta ruta se utilizarán los mismos nodos o paradas de un recorrido que se encuentra disponible en el sistema de transporte Garzabús considerando a la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento mostrados en la Tabla 6. Es importante mencionar que esta ruta contempla el viaje de ida y posteriormente el viaje de vuelta del conjunto de rutas en cuestión. De igual manera se muestran los resultados obtenidos por el modelo en la Tabla 7 y los tiempos interarribo entre cada parada en la Tabla 8.

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 6: Conjunto de paradas para el recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA con sus respectivas coordenadas. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 7: Resultados obtenidos del recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 8: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA. Fuente: Elaboración propia.

Se puede deducir que es una ruta que contempla muy pocas paradas, dada la distancia que recorre se observa que puede aprovecharse de mejor manera el recorrido, asentando más nodos, otro aspecto a considerar es que, debido al bajo número de asentamientos, se beneficia la ruta resulta más eficiente en tiempo ya que no se detiene tanto y eso reduce el tiempo de ejecución. De igual forma el recorrido se puede caracterizar cómo extenso ya que contempla una distancia de 17.2 km. lo cual es demasiado para una ruta de transporte dentro de la zona metropolitana de Pachuca de Soto y sus alrededores y hace que por ende también el costo de la ruta sea elevado.

Los tiempos entre cada parada consideran un tiempo de espera para subir alumnos de 2 minutos entre cada parada, se muestran irregulares al principio del recorrido, en los últimos tres nodos ya se encuentran la uniformidad con 6 minutos entre cada arribo.

Se realizaron con 10 iteraciones para el Algoritmo Genético con una población de 40 individuos, un nivel de elitismo de 4 individuos y una probabilidad de mutación de 0.3%.

El tiempo computacional en el que el programa encontró una solución fue de 0.18 segundos.

A continuación, se puede apreciar en la siguiente Figura 20 que el algoritmo tiende al valor óptimo a partir de la segunda iteración debido al bajo número de nodos contemplados.

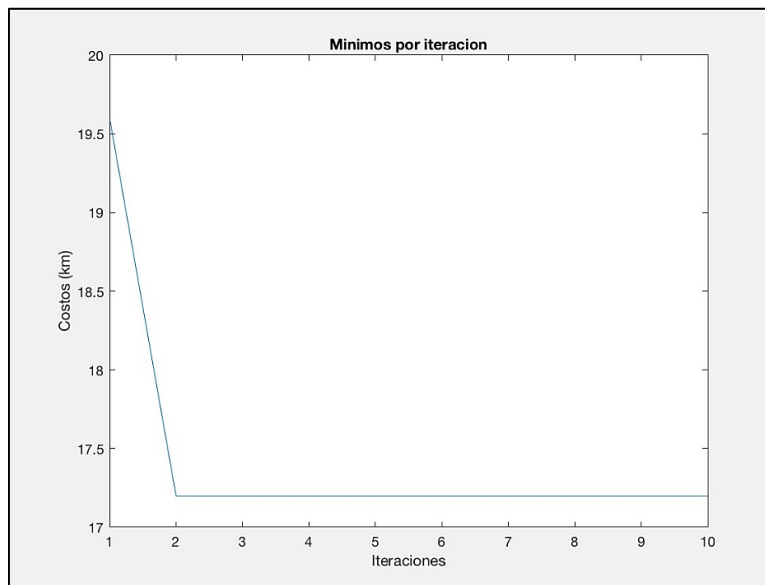


Figura 20: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Ciudad del Conocimiento – ICEA. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se muestra la ruta trazada en un mapa digital utilizando únicamente distancias de carretera del sistema WGS 84 utilizadas previamente en la generación de matrices de entrada teniendo como finalidad ofrecer una apreciación total y real del recorrido generado por el modelo.

Se puede percibir en la Figura 21 que la ruta pasa por zonas no tan céntricas de Pachuca de Soto y de poco tránsito 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.

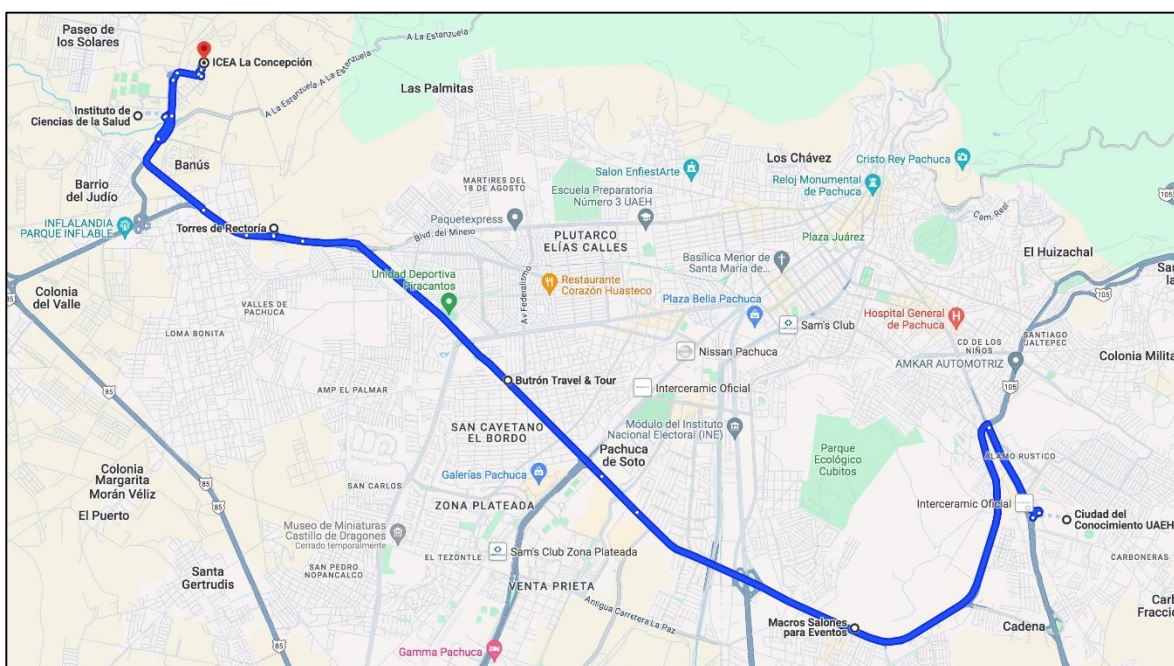


Figura 21: Ruta Ciudad del Conocimiento – ICEA. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2 RUTA ICEA – CIUDAD DEL CONOCIMIENTO

De igual forma para este recorrido se utilizarán nodos o paradas de un recorrido ya existente en el sistema de transporte Garzabús (Tabla 9), solo que ahora se considerarán los nodos para un viaje de vuelta que considera el mismo conjunto de rutas. Se muestran también los resultados obtenidos y los tiempos en la Tabla 10 y la Tabla 11 respectivamente.

Nodo	Lugar	Latitud	Longitud
1 (Origen)	ICEA	20.14121	-98.805
2 (Viaje)	Gran Foro (Arboledas de San Javier 42086 TB1R)	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 (Punto Café)	20.08339	-98.73564

Tabla 9: Conjunto de paradas para el recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento con sus respectivas coordenadas. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 10: Resultados obtenidos del recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	ICSa (Entrada)	4
2	ICSa (Bioterio)	7
3	ICSHu	15
4	Gran Foro (Arboledas de San Javier 42086 TB1R)	21
5	Semáforos del Chacón (Punto Café)	30
6	Plaza Q	35
7	Ciudad del Conocimiento	44

Tabla 11: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

El recorrido posee una parada más que el viaje de ida ocasionando que aumente su tiempo en carretera ocho minutos, al igual que la ruta anterior se puede aprovechar su larga distancia de recorrido (18.9 km.) para poder ubicar un mayor número de paradas, y de esa forma se logre dejar a más estudiantes cerca de sus hogares ya que esta ruta pertenece a un turno vespertino y en esos horarios la población se vuelve muy vulnerable al peligro.

Los tiempos de parada para subir alumnos son de 2 minutos entre cada parada, mostrando irregularidad de tiempos inter-arribo durante todo el recorrido, esto es gracias a las largas distancias que hay entre cada arribo.

Se realizaron con 10 iteraciones para el Algoritmo Genético con una población de 40 individuos, un nivel de elitismo de 4 individuos y una probabilidad de mutación de 0.3%. El tiempo computacional en el que el programa encontró una solución fue de 0.19 segundos.

A continuación, se puede apreciar en la Figura 22 que el algoritmo tiende al valor óptimo a partir de la quinta iteración debido a que se aumentó un nodo al recorrido y en consecuencia la búsqueda del valor óptimo se torne más extensa por el incremento exponencial de soluciones factibles por cada nodo adicional.

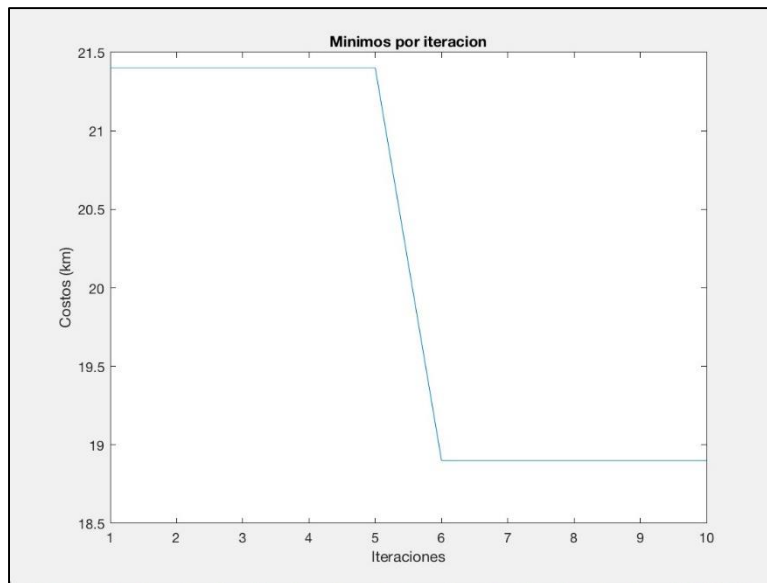


Figura 22: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra en la Figura 23 la ruta trazada en un mapa digital y se observa 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.

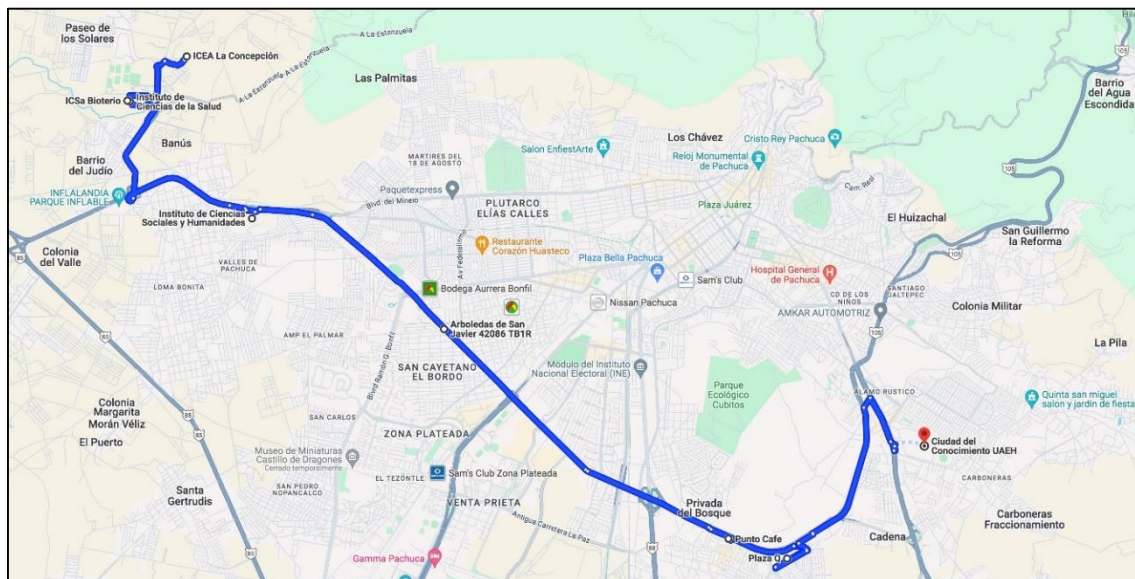


Figura 23: Ruta ICEA - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.3 Programación de horarios

Este par de recorridos ya tiene definidos sus horarios, 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.

Para el primer recorrido, la ruta Ciudad del Conocimiento – ICEA, tiene como objetivo beneficiar a la población estudiantil que estudia o que simplemente necesitan llegar al Instituto de Ciencias Económicas (ICEA) y Administrativas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y que a su vez tiene un domicilio cercano o se encuentra ubicada en Ciudad del Conocimiento es por ello que tiene como destino a dicho instituto, maneja horarios desde las 6 de la mañana ya que se enfoca principalmente en los alumnos que pertenecen al turno matutino, de igual forma funciona para aquellos alumnos que tienen la necesidad de moverse a ICEA perteneciendo a Ciudad del Conocimiento (Tabla 12).

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 hrs.

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 12: Paradas oficiales del recorrido Ciudad del Conocimiento - ICEA. Fuente: Elaboración propia.

El segundo recorrido tiene como objetivo principal beneficiar a la población estudiantil que pertenece a Ciudad del Conocimiento, es decir, el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) y los alumnos de la Escuela Preparatoria No. 1 que estudian en dicho instituto, pretende beneficiar los alumnos que pertenecen al turno vespertino, ya que maneja horarios nocturnos cómo las de la tarde en adelante, de igual forma tiene la funcionalidad de apoyar a todo alumno que tiene la necesidad de moverse a Ciudad del Conocimiento perteneciendo a ICEA. A continuación, se mostrará en la Tabla 13 las paradas y horarios programados para el recorrido mencionado anteriormente.

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 hrs.

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

Tabla 13: Paradas oficiales del recorrido ICEA - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Propuesta con nodos existentes que no son 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.

5.1.2.1 RUTA TUZOS – CIUDAD DEL CONOCIMIENTO

En esta ruta se manejarán paradas disponibles en otros recorridos que transitan por la zona metropolitana de Pachuca de Soto considerando a la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento como la principal beneficiaria, los cuales son mostrados en la Tabla 14. Al igual que el conjunto de rutas anterior, se contempla tanto el viaje de ida como el viaje de vuelta para el presente conjunto. De igual forma se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 15 y también los tiempos interarribo por cada nodo seleccionado en la Tabla 16.

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 14: Conjunto de paradas para el recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento con sus respectivas coordenadas. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 15: Resultados obtenidos del recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 16: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

La ruta generada tiene una cantidad de paradas aceptable para poder satisfacer a la población en función a la distancia que debe de recorrer, se puede inferir que no se tiene mucho kilometraje en comparación con las rutas que ya existen en el sistema real por lo que sería una opción más económica el implementarla en la universidad.

Se toman en cuenta dos minutos por cada parada que realiza, de igual manera no muestra tanta regularidad en cuanto a los tiempos, debido a la variabilidad de distancia que existe entre cada parada. Pero eso no es un factor que desmerite la factibilidad del recorrido ya que presenta un buen tiempo total para lograr mover a los beneficiarios.

En cuanto a los aspectos informáticos del modelo se realizan 10 iteraciones en el Algoritmo Genético con una población de 40 individuos, un nivel de elitismo de 4 individuos y una probabilidad de mutación de 0.3% tardando un tiempo computacional de 0.19 segundos.

En la Figura 24 el algoritmo tiende al valor óptimo a partir de la segunda iteración debido a que el recorrido posee una cantidad baja de nodos lo cual resulta más sencillo para poder encontrar la mejor secuenciación de ruta.

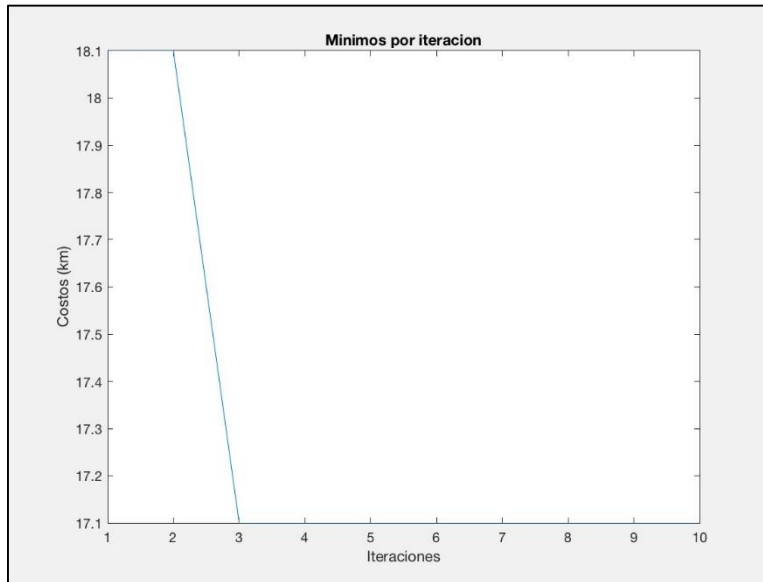


Figura 24: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 25 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.

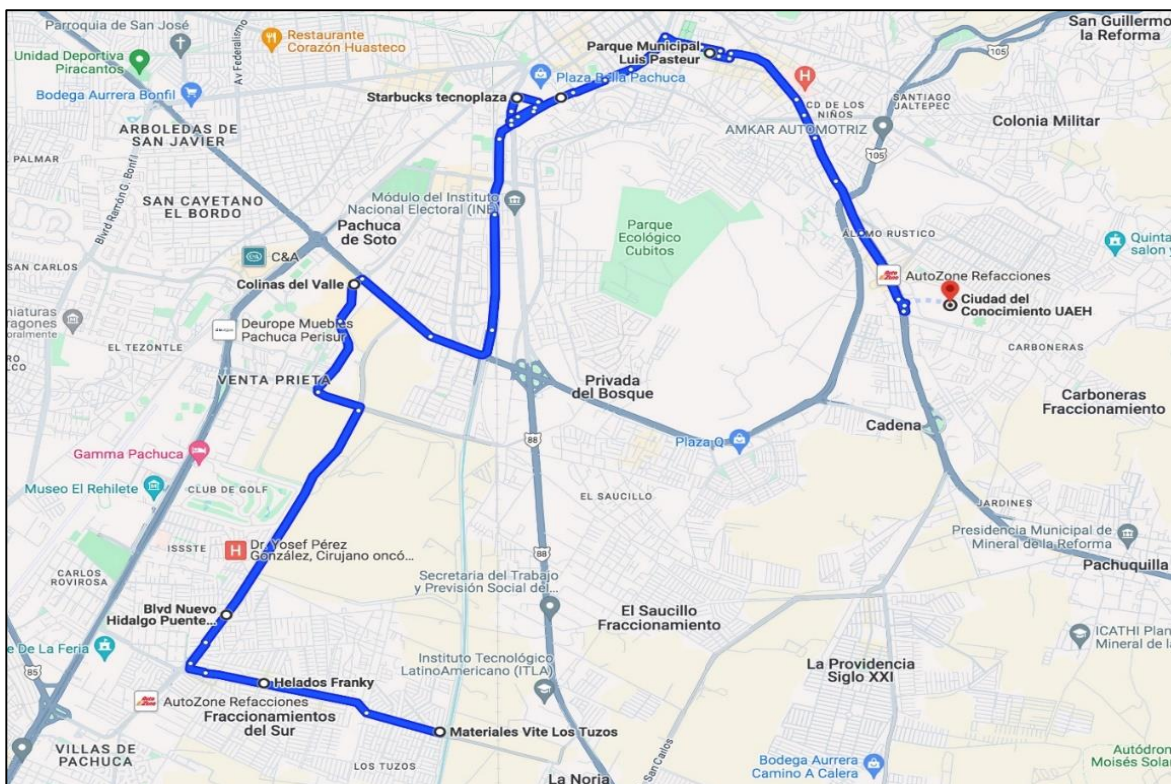


Figura 25: Ruta Tuzos – Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2 RUTA CIUDAD DEL CONOCIMIENTO - TUZOS

Para el presente recorrido de vuelta se tomarán en cuenta nodos existentes de Garzabús, mostrados en la Tabla 17, los cuales son paralelos en carretera con las paradas seleccionadas del viaje de ida con el fin de seguir la misma mecánica que sigue el sistema de transporte universitario y por ende sean viables en el entorno que se pretenden implementar. De igual forma se muestran los resultados obtenidos del recorrido en la Tabla 18 y los diferentes tiempos interarribo entre cada asentamiento.

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 17: Conjunto de paradas para el recorrido Ciudad del Conocimiento – Tuzos con sus respectivas coordenadas. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 18: Resultados obtenidos del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 19: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos. Fuente: Elaboración propia.

La presente ruta posee un número adecuado de paradas en función de su kilometraje recorrido, que es más más bajo en comparación con el conjunto de rutas ya existentes siendo una opción más económica debido a la reducción del costo de combustible.

Se toma en cuenta un tiempo de parada de dos minutos, y muestra una regularidad de tiempos tanto al principio cómo en el final de la ruta de un promedio de 5 minutos, en la parte media del recorrido también se encuentra una regularidad de 10 minutos por entre cada parada, esto es gracias a la uniformidad de distancias que hay entre cada nodo.

Se realizaron con 10 iteraciones para el Algoritmo Genético con una población de 40 individuos, un nivel de elitismo de 4 individuos y una probabilidad de mutación de 0.3%.

El tiempo computacional en el que el programa encontró una solución fue de 0.19 segundos.

Se puede apreciar en la Figura 26 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 resulte mucho más sencilla.

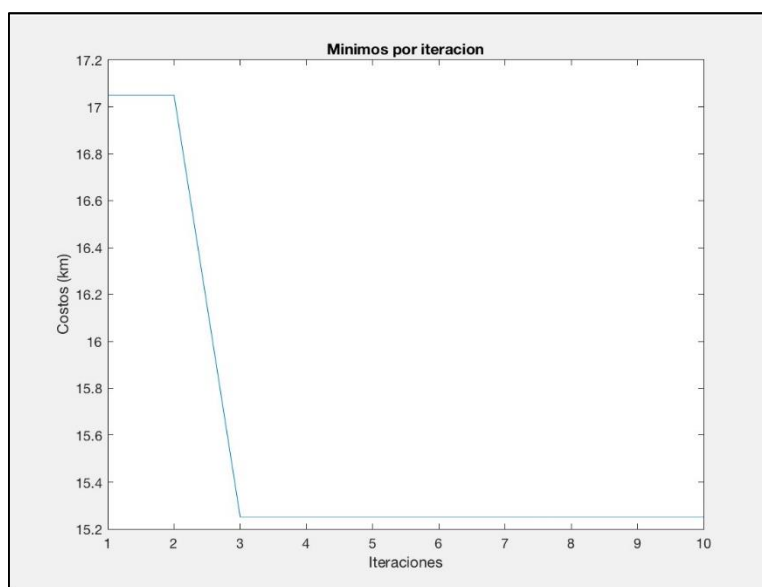


Figura 26: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos. Fuente: Elaboración propia.

Se muestra en la Figura 27 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.

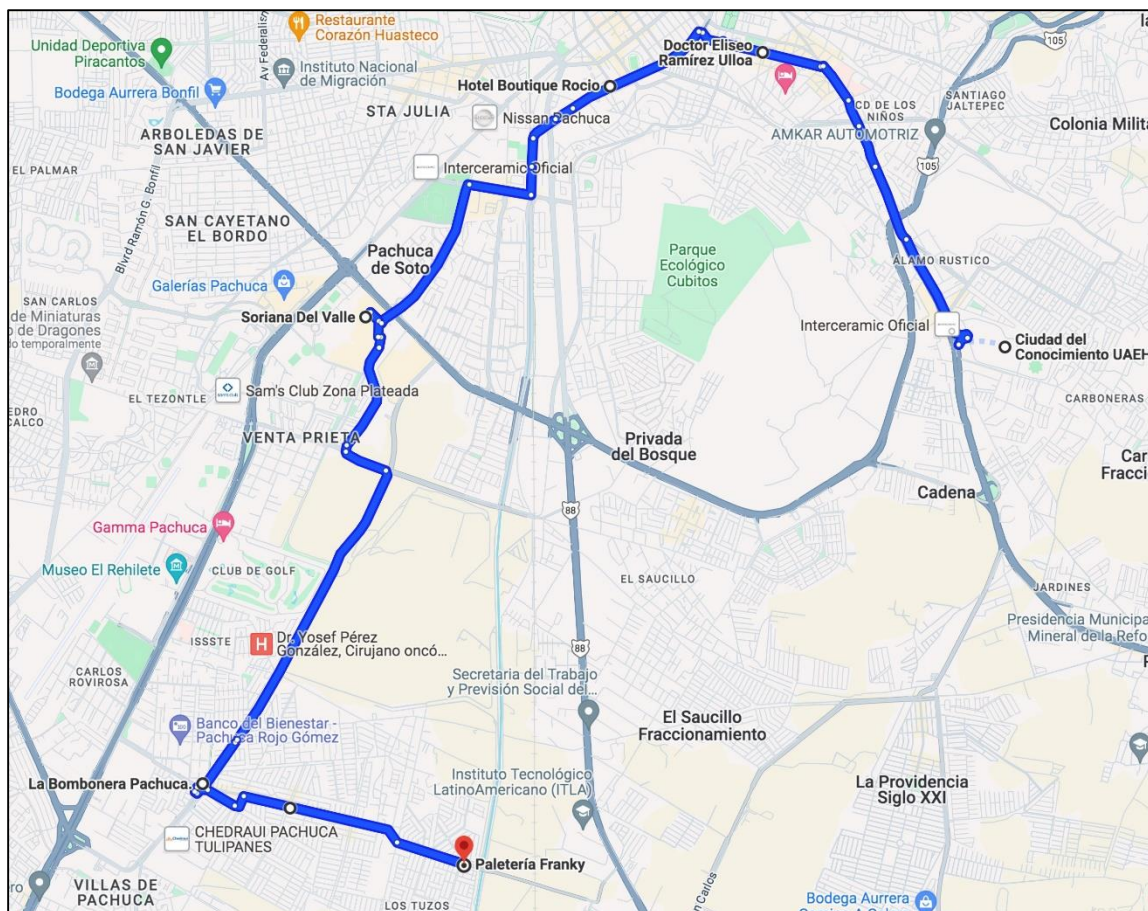


Figura 27: Ruta Ciudad del Conocimiento - Tuzos. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.3 Programación de horarios

Para el primer recorrido, la ruta Tuzos – Ciudad del Conocimiento, tiene como objetivo beneficiar a la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento, es decir, el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) y los alumnos de la Escuela Preparatoria No. 1 que estudian en dicho instituto, que pretende llegar a sus primeras clases. Mientras que el segundo recorrido, la ruta Ciudad del Conocimiento – Tuzos, se encarga de dejar a los alumnos cerca de sus domicilios al acabar su jornada académica.

Es importante mencionar que cada recorrido del conjunto pretende beneficiar tanto al turno matutino como al vespertino por lo que cada ruta considera horarios en diferentes partes del día, dándole prioridad al objetivo destinada para cada ruta (llegar puntual a las clases y dejar a los alumnos cerca de sus domicilios) más no a los turnos de cada jornada como se establece en el conjunto de rutas anterior.

A continuación, se muestra en la Tabla 20 y en la Tabla 21 las paradas oficiales con sus respectivos horarios programados para cada ruta.

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 20: Paradas oficiales del recorrido Tuzos - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

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)

Tabla 21: Paradas oficiales del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tuzos. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 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 viabilidad con herramientas de georreferenciación como Google Maps para verificar si el lugar propuesto es realmente viable para el Garzabús y por ende pueda realizar una parada sin ningún inconveniente. De igual forma, como se observa en los conjuntos de rutas anteriores, se contempla tanto el viaje de ida como el viaje de vuelta para el presente conjunto.

5.1.3.1 RUTA TULIPANES - CIUDAD DEL CONOCIMIENTO

Para este recorrido de ida se tomarán en cuenta paradas propuestas por los estudiantes, las cuales son partes de la zona metropolitana de Pachuca de Soto considerando a la población de Ciudad del Conocimiento como la principal beneficiaria.

En esta ruta se manejarán paradas disponibles en otros recorridos que transitan por la zona metropolitana de Pachuca de Soto y sus alrededores mediante el sistema de transporte Garzabús considerando a la población estudiantil de Ciudad del Conocimiento como la principal beneficiaria. Al igual que el conjunto de rutas anterior, se contempla tanto el viaje de ida como el viaje de vuelta para el presente conjunto. A continuación, se mostrará en la Tabla 22 los nodos seleccionados para el recorrido, en la Tabla 23 las salidas del modelo para dichas entradas y finalmente en la Tabla 24 los tiempos interarribo entre cada nodo.

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 22: Conjunto de paradas para el recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento con sus respectivas coordenadas. Fuente: Elaboración propia.

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	41.5	\$152.02

Tabla 23: Resultados obtenidos del recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	OXXO de Forjadores	2.5
2	Gasolinera bp	5
3	1er. Puente de Parque Los Encinos	11
4	2do. Puente de San Fernando (Av. Las Torres)	15
5	Farmacia Guadalajara Paseos de Chavarría	17
6	Gasolinera Shell Paseos de Chavarría	19
7	Valle de las estrellas (3B Circuito Providencia)	26
8	Paradero San Cristóbal Providencia	27.5
9	Arco de entrada Fraccionamiento Providencia	31.25
10	Paseo de las Reynas (Tienda El Zorro)	38
11	Ciudad del Conocimiento	41.5

Tabla 24: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

La ruta en cuestión incluye un número adecuado de paradas, optimizando al máximo los kilómetros recorridos. De este modo, se lograría ofrecer un beneficio significativo a la comunidad de estudiantes que reside en las áreas por las que transita.

Se contempla un tiempo de parada de dos minutos para recoger a los estudiantes, lo que genera cierta irregularidad en los tiempos al inicio y a la mitad del recorrido, debido a las distancias entre los diferentes asentamientos incluidos. Sin embargo, es importante señalar que en las últimas cuatro paradas se observa una regularidad de tiempos de cuatro minutos. La optimización de estos trayectos no solo mejora la eficiencia, sino que también puede tener un impacto positivo en la vida escolar.

Se realizaron con 40 iteraciones para el Algoritmo Genético con una población de 40 individuos, un nivel de elitismo de 4 individuos y una probabilidad de mutación de 0.3%. Para poder encontrar una solución óptima se incrementó el número de iteraciones a 40 debido a que se aumentó el número de asentamientos seleccionados para el recorrido.

El tiempo computacional en el que el programa encontró una solución fue de 0.3 segundos.

Se logra observar en la Figura 28 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.

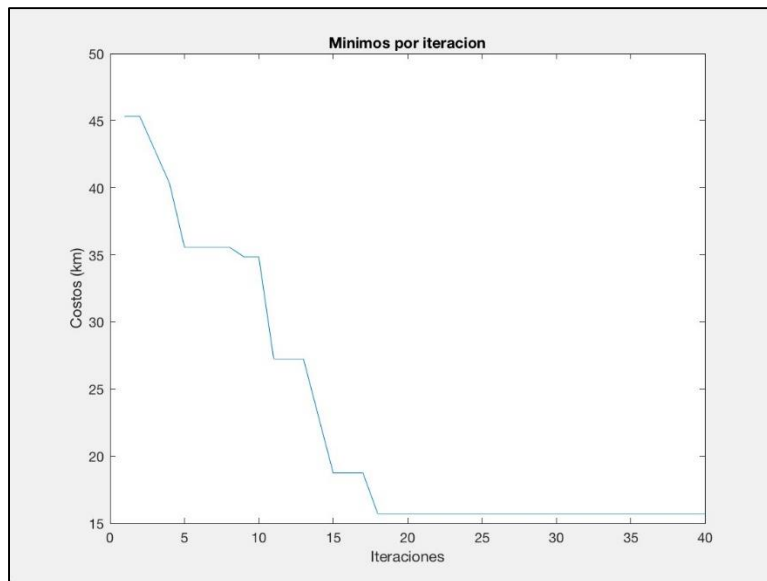


Figura 28: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 29 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 tránsito de transporte público por esas zonas.

Un aspecto notable a resaltar es que el recorrido abarca zonas adyacentes de la ciudad, lo que reduce significativamente el tráfico. Esta disminución en la congestión vial favorece la eficiencia de la ruta, acortando considerablemente el tiempo de traslado. Como resultado, se logra reducir tanto la distancia recorrida como el costo de combustible, lo que representa un beneficio considerable para el transporte en general.

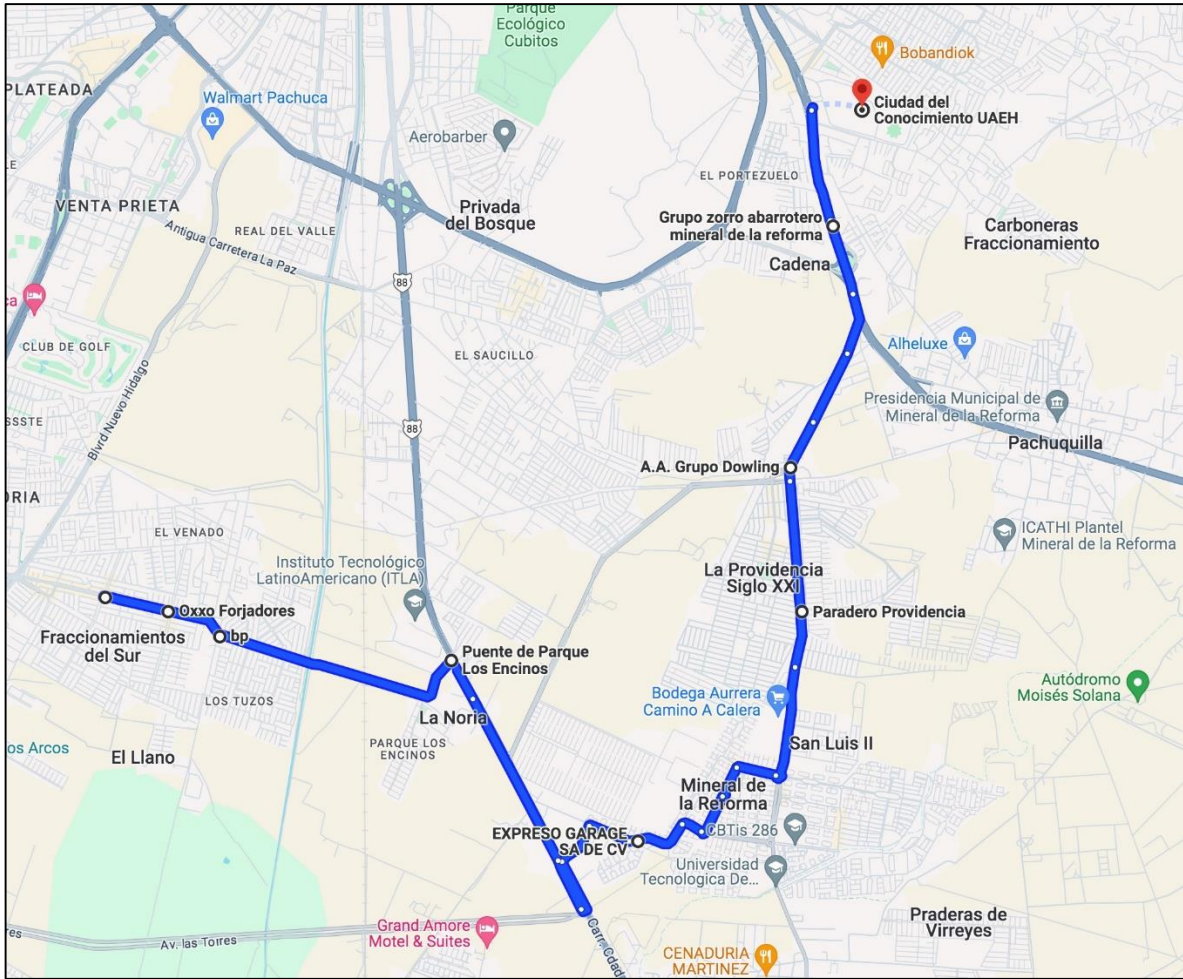


Figura 29: Ruta Tulipanes - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.2 RUTA CIUDAD DEL CONOCIMIENTO - TULIPANES

Se logran exhibir en la Tabla 25 los datos de entrada para el diseño del recorrido de vuelta, en la Tabla 26 los resultados generados por medio del Algoritmo Genético y en la Tabla 27 los tiempos interarribo entre cada nodo.

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 25: Conjunto de paradas para el recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes con sus respectivas coordenadas. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla 26: Resultados obtenidos del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes. Fuente: Elaboración propia.

Arribo	Parada	Tiempo inter-arribo acumulado por parada (minutos)
1	1er. Puente de Paseo de las Reinas	5.5
2	Bodega Aurrera Entrada de Providencia	9
3	Fraccionamiento San Cristóbal	13.25
4	Bodega Aurrera L Providencia Siglo XXI	16
5	Tienda 3B Paseos de Chavarría	21
6	OXXO Paseos de Chavarría	23.5
7	2do. Puente de Parque los Encinos	27.5
8	Frente a Gasolinera bp Esq. Parada Tuzobus	35.5
9	Rinconadas del Venado	37.5
10	Caseta de Tulipanes	40

Tabla 27: Tiempos interarribo por cada parada del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes. Fuente: Elaboración propia.

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.

Se prevé un tiempo de parada de dos minutos para la llegada de los estudiantes. Es importante destacar que se observa una notable uniformidad en los tiempos de arribo, lo cual se debe a la elección estratégica de los asentamientos que buscan beneficiar a la población estudiantil.

El programa tardó un poco más en encontrar el óptimo global cómo se puede apreciar en la Figura 30, primeramente, el 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.

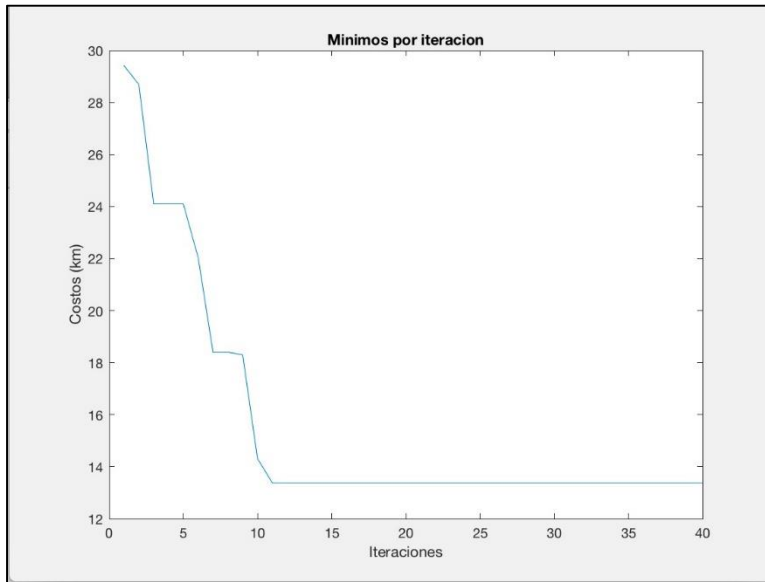


Figura 30: Gráfica de valores mínimos por cada iteración realizada por el Algoritmo Genético para la generación del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se muestra en la Figura 31 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.

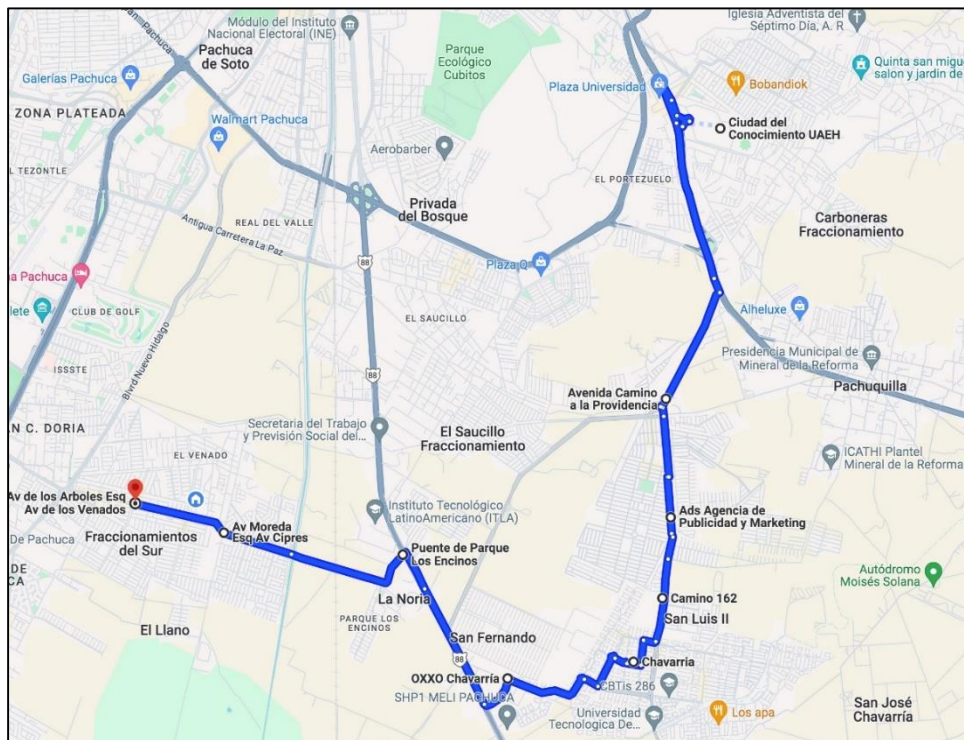


Figura 31: Ruta Ciudad del Conocimiento - Tulipanes. Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.3 Programación de horarios

Para el presente conjunto de rutas se utilizará el mismo criterio abordado en la propuesta de nodos existentes 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 28 y la Tabla 29 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.

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

Tabla 28: Paradas oficiales del recorrido Tulipanes - Ciudad del Conocimiento. Fuente: Elaboración propia.

Ruta Ciudad del Conocimiento - Tulipanes

13:05, 14:05, 15:05, 16:05, 19:05, 20:05 y 21:05

No.	Parada
1	Ciudad del Conocimiento
2	1er. Puente de Paseo de las Reinas
3	2do. Puente de Parque los Encinos
4	Bodega Aurrera Entrada de Providencia
5	Bodega Aurrera L Providencia Siglo XXI
6	Fraccionamiento San Cristóbal
7	Frente a Gasolinera bp Esq. Parada Tuzobus
8	OXXO Paseos de Chavarría
9	Rinconadas del Venado
10	Tienda 3B Paseos de Chavarría
11	Caseta de Tulipanes

Tabla 29: Paradas oficiales del recorrido Ciudad del Conocimiento - Tulipanes. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Análisis comparativo

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 30 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.

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

Tabla 30: Comparación de diferentes parámetros de los recorridos generados por el modelo de optimización.

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.

CAPÍTULO 6. 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.

De igual forma debe mencionarse que para la implementación de la propuesta queda pendiente la gestión administrativa con el departamento de transporte de la UAEH, así como también comentarles las diversas ventajas que ofrecen los recorridos, ya que ellos son la autoridad para tomar la decisión de poner en marcha las rutas diseñadas en el presente trabajo de investigación.

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.

CAPÍTULO 7. TRABAJO A FUTURO

El trabajo realizado a lo largo del presente trabajo de investigación, muestra dos alternativas de propuesta para la implementación de rutas del sistema de transporte universitario Garzabús de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Sin embargo, de igual forma abre las puertas a diversos estudios más minuciosos adentrándose en este entorno de investigación. El estudio presentado es solo una parte de lo que conlleva diseñar e investigar acerca de sistemas de transporte escolares.

Es necesario considerar desde una etapa temprana del proyecto diversos aspectos de gestión administrativa para la puesta en marcha cómo los servicios de trámite necesarios, el mantenimiento vehicular, gestión de flota vehicular, los seguros vehiculares, los conductores y su capacitación, el aspecto ambiental, las normativas viales, la seguridad pública y el financiamiento total del proyecto.

Estas vertientes influyen directamente para la implementación de nuevas rutas de transporte universitario y cada una de ellas tiene una repercusión en términos monetarios que se deben considerar para realizar los estudios económicos y financieros pertinentes.

Algunos temas que pueden ser abordados para complementar el estudio se presentan a continuación:

- **Número de vehículos a considerar (flota vehicular).**
- **Capacidad de cada vehículo.**
- **Sanciones ambientales (costos ambientales).**
- **Sanciones de puntualidad.**
- **Costos de mantenimientos preventivos cada cierto ciclo.**
- **Variables estocásticas cómo la demanda de alumnos por cada parada o asentamiento, el costo de combustible, los tiempos de tráfico y el consumo vehicular.**
- **Simulación visual de rutas en función del tiempo (modelo dinámico).**
- **Incorporar al tiempo cómo un factor de optimización para hacer un modelo multiobjetivo.**

BIBLIOGRAFÍA

- Aarts, E. y Lenstra, JK (2003). *Búsqueda local en optimización combinatoria*. Eindhoven y Atlanta: Princeton University Press, pág. 1-137.
- Acosta, F. (2023). *Antecedentes históricos de los medios de transporte*. Obtenido el 6 de septiembre de 2023 de Vlex: <https://vlex.com.mx/vid/antecedentes-medios-transporte-497942534>
- Angulo, R. (2021). *Algoritmos Genéticos*. Obtenido el 14 de mayo de 2024 de Revista Laberintos & Infinitos – Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM):
- Ballou, R. (2004). *Logística, administración de la cadena de suministro*. México: Prentice Hall.
- Bermudez-Colina, Y. (2011). Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*. 7, 85-104.
- Bektaş, T., & Elmastaş, S. (2007). Solving school bus routing problems through integer programming. *The Journal of the Operational Research Society*, 58, 1599-1604.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM COMPUTING SURVEYS*, 35, 268–308.
- Cáceres, A. Y. P. (2009). *Desarrollo de meta-heurísticas poblacionales para la solución de problemas complejos*. Departamento de Ciencia de la Computación. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara.
- 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.
- Corberan, A., Fernandez, E., Laguna, M., Marti, R., Corberán, A., Fernández, E., & Martí, R. (2002). Heuristic solutions to the problem of routing school buses with multiple objectives. *Journal of the Operational Research Society*, 53(4), 427–435.
- Cortez, A. (2004). TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL Y TEORÍA DE LA COMPUTABILIDAD. *Rev. investig. sist. inform.* 1(1), 102-105.
- Dave, S. M., Raykundaliya, D. P., & Shah, S. N. (2013). Modeling Trip Attributes and Feasibility Study of co-ordinated Bus for School Trips of Children. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 650–659.
- Davis, L. (1991). *Handbook of genetic algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold.

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

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>

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

Estevan, A., & Sanz, A. (1996). *Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*. España: Bakeaz.

Fuentes-Penna, A. (s.f.). *Problema del Agente Viajero*. Obtenido el 16 de mayo de 2024 de UAEH: https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/tlahuelilpan/n3/e5.html#nota0&as_qdr=y15

García, M. (2017). Evaluación de la dimensión operativa del transporte colectivo en el área metropolitana de Mendoza, Argentina. *Perspetiva Geográfica*, 22, 29-46.

Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J., Pazos, A. (2010). *Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética*. Coruña: Universidade da Coruña.

Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2022). *Introduction to Logistics Systems Management*. Oxford: Wiley.

Glover, F., & Kochenberger, G. A. (2003). Handbook of metaheuristics. Kluwer Academic Publishers. *International Series in Operations Research & Management Science*, 57.

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.

Hooker, J. N. (1995). Testing Heuristics: We Have It All Wrong. *Journal of Heuristics*, 1, 33-42.

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.

Lazaro, P., Arias, J., & Orejula, J. (2019). School bus routing problem with environmental considerations using granular tabu search. *Scientia Et Technica*, 24, 652-659.

Mandic, S., de la Barra, S. L., Bengoechea, E. G., Stevens, E., Flaherty, C., Moore, A., & Skidmore, P. (2015). Personal, social and environmental correlates of active transport to

school among adolescents in Otago, New Zealand. *JOURNAL OF SCIENCE AND MEDICINE IN SPORT*, 18(4), 432–437.

Oluwadare, S. A., Oguntuyi, I. P., & Nwaiwu, J. C. (2018). Solving school bus routing problem using genetic algorithm-based model. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 10 (March), 50–58.

Osman, I. H., & Kelly, J. P. (1996). *Meta-heuristics: theory and applications*. Kluwer Academic.

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.

Pluxee. (2024). *El ruteo en la operación logística*. Obtenido el 25 de noviembre de 2024 de Pluxee Colombia: <https://www.sodexo.co/blog/ruteo-logistica/#:~:text=Tener%20un%20plan%20de%20ruteo%20es%20esencial%20para%20cu%20alquier%20empresa,que%20pasan%20en%20la%20carretera>.

Prendes-Gero, M. B., Bello-García, A., Del Coz-Díaz, J. J. (2002). APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO “ELITISTA” A LA OPTIMIZACIÓN DE NAVES INDUSTRIALES. Obtenido el 25 de abril de 2024 de Departamento de Construcción e Ingeniería de la Fabricación. E.U.I.T. de Minas de Mieres: https://www.aepro.com/files/congresos/2002barcelona/ciip02-1794_1804.2060.pdf

Real Academia Española. (2012). *Diccionario de la lengua española*. 22 ed. Obtenido el 18 de septiembre de 2012 de Real Academia Española: <https://lema.rae.es/drae/?val=heuristica>

Romo de Vivar, C. P. (2019). *Opciones para el transporte masivo de personas*. Obtenido el 25 de noviembre de 2024 de Comisión Nacional de Uso Eficiente de la Energía: <https://sites.google.com/conuee.gob.mx/micrositio-comunidad-transport/movilidad-urbana/transporte-p%C3%BAblico>

Sosa, H., Villagra, S., Villagra, A. (2014). *Operadores de Mutación en Algoritmos Genéticos Celulares Aplicados a Problemas Continuos*. Obtenido el 13 de mayo de 2024 de Universidad Nacional de la Patagonia Austral - Unidad Académica Caleta Olivia: <https://publicaciones.unpa.edu.ar/index.php/ICTUNPA/article/download/559/538>

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.

UAEH. (s.f.). *Transporte Universitario*. Obtenido el 9 de noviembre de 2023 de UAEH: https://www.uaeh.edu.mx/transporte_universitario/

UAEH. (2019). *GARZABÚS TE LLEVA A TU DESTINO*. Obtenido el 9 de noviembre de 2023 de UAEH: <https://www.uaeh.edu.mx/garceta/2019/febrero/garzabus.html>

Van Gigch, J. P. (2017). *Teoría General de Sistemas*. México: Trillas.

Velez, M., Montoya, J. (2007). METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. *Revista EIA*, 8.

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, 341-344.

ANEXOS

A: Productos Generados

- **Artículos de investigación indexados:**

En noviembre del 2023 se publicó un artículo científico en la revista indexada *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*: Quijano-Crisóstomo, I. A., & Montúfar-Benítez, M. A. (2023). Minería de textos aplicada a la literatura sobre el problema de enrutamiento del autobús escolar (SBRP). *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 11(Especial3), 1-14. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11393>

En noviembre del 2024 se publicó un artículo científico en la revista indexada *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*: Quijano-Crisóstomo, I. A., Seck-Tuoh-Mora, J. C., Medina-Marín, J., Hernández-Romero, N., & Anaya-Fuentes, G. E. (2024). Modelo de optimización basado en Algoritmos Genéticos para el diseño de nuevas rutas de transporte escolar en una Universidad Pública del Estado de Hidalgo. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 12(Especial3), 141-155. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13420>

- **Ponencia en seminario de investigación:**

De igual forma se participó en una ponencia en el XXIV Seminario de Investigación “*Avanzando juntos: construyendo el futuro con ingeniería sustentable, arquitectura innovadora y sistemas organizacionales eficaces*” organizado por el Área Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el cual fue llevado a cabo el 8 de noviembre del 2024 en la ciudad de Mineral de la Reforma, Hidalgo.

- **Certificación TOEFL:**

Se obtuvo una certificación TOEFL Nivel B2 mediante un examen de inglés que evalúa las habilidades de comprensión lectora, comprensión auditiva, uso de idioma (escritura y gramática), obteniendo un resultado de 570 puntos equivalentes al nivel B2 del Marco Común Europeo de Referencia para las lenguas (MCER).