

Proposal of Routes with Capacity Constraints for UNITEC Tegucigalpa through Linear Programming

Abstract

Amidst the resumption of in-person classes at UNITEC Tegucigalpa in 2022, the implementation of a transportation system aimed to facilitate commuting on diverse routes and schedules. However, the route assignment process was grounded in empirical methods, leading to widespread dissatisfaction attributed to the evident overcrowding on specific routes. To alleviate this issue, a comprehensive research initiative was launched with the primary goal of formulating a strategic route plan that meticulously factors in the capacity of transport units, with the specific aim of eradicating the predicament of standing passengers.

The research meticulously analyzed two pivotal routes—the morning and afternoon circuits—each navigating through 98 and 80 stops, respectively, strategically dispersed across the central district of the city. The intricacies of this investigation extended to a mathematical model that accentuated the critical role of bus capacity in optimizing the overall transportation system. This mathematical model framed the problem as a variant of the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), introducing the challenge of managing different capacities within the vehicle routing paradigm.

Instrumental to this study were various data collection methods, including interviews with key stakeholders responsible for orchestrating the transportation system. Additionally, the integration of Google Maps software and a graph tool served as indispensable components in solving the CVRP, offering a multidimensional approach to the problem at hand.

The proposed route plan emerges as a groundbreaking solution, ensuring seats for 100% of users while entirely eliminating the predicament of standing passengers, which previously affected 8% of commuters. The resultant 16% increase in unit efficiency attests to the plan's efficacy in optimizing the utilization of transportation resources. The validation process corroborates the plan's feasibility, advocating for its implementation under the stipulation that demand and bus availability adhere to the consistent parameters established in the study. Ultimately, the presented plan not only rectifies student dissatisfaction stemming from overcrowded buses but also introduces a methodically structured solution to route assignment, effectively streamlining the UNITEC Tegucigalpa transportation system for enhanced efficiency and user satisfaction.

Keywords: CVRP, route optimization, GrafoS, linear programming, vehicle assignment

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Propuesta de rutas con restricciones de capacidad al transporte de UNITEC Tegucigalpa mediante programación lineal

I. INTRODUCCIÓN

Resumen Ejecutivo

En medio de la reanudación de clases presenciales en UNITEC Tegucigalpa en 2022, se implementó un sistema de transporte destinado a facilitar los desplazamientos en diversas rutas y horarios. Sin embargo, el proceso de asignación de rutas se basaba en métodos empíricos, lo que llevó a una amplia insatisfacción atribuida al evidente hacinamiento en rutas específicas. Para aliviar este problema, se lanzó una iniciativa de investigación integral con el objetivo principal de formular un plan de ruta estratégico que tenga en cuenta meticulosamente la capacidad de las unidades de transporte, con el objetivo específico de erradicar la situación de pasajeros de pie.

La investigación analizó minuciosamente dos rutas clave: los circuitos de la mañana y la tarde, cada uno navegando a través de 98 y 80 paradas, respectivamente, estratégicamente dispersas en el distrito central de la ciudad. Las complejidades de esta investigación se extendieron a un modelo matemático que destacaba el papel crítico de la capacidad del autobús en la optimización del sistema de transporte en general. Este modelo matemático enmarcaba el problema como una variante del Problema de Enrutamiento de Vehículos Capacitados (CVRP), introduciendo el desafío de gestionar diferentes capacidades dentro del paradigma de enrutamiento de vehículos.

Instrumentales para este estudio fueron varios métodos de recopilación de datos, incluyendo entrevistas con actores clave responsables de orquestar el sistema de transporte. Además, la integración del software Google Maps y una herramienta de grafo sirvieron como componentes indispensables para resolver el CVRP, ofreciendo un enfoque multidimensional al problema en cuestión.

El plan de ruta propuesto emerge como una solución innovadora, asegurando asientos para el 100% de los usuarios y eliminando completamente la situación de pasajeros de pie, que anteriormente afectaba al 8% de los viajeros. El resultado de un aumento del 16% en la eficiencia de las unidades atestigua la eficacia del plan en la optimización del uso de los recursos de transporte. El proceso de validación corrobora la viabilidad del plan, abogando por su implementación bajo la estipulación de que la demanda y la disponibilidad de autobuses se adhieran a los parámetros consistentes establecidos en el estudio. En última instancia, el plan presentado no solo corrige la insatisfacción de los estudiantes derivada de autobuses abarrotados, sino que también introduce una solución metodológicamente estructurada para la asignación de rutas, optimizando eficazmente el sistema de transporte de UNITEC Tegucigalpa para mejorar la eficiencia y la satisfacción del usuario.

Palabras clave: CVRP, optimización de rutas, Programación lineal, asignación de buses, Grafos

El problema en que se centró este estudio tiene relación con una deficiente asignación de rutas de transporte. Con el retorno paulatino a la modalidad de aprendizaje presencial a inicios del año 2022 en la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) en el campus de Tegucigalpa, habilitó el sistema de transporte de buses a los estudiantes trabajando con la empresa JM Transportes, pero la asignación de las rutas de recorrido se realizó de manera empírica en ese momento, y el plan realizado en su momento se mantiene y genera cierto grado de insatisfacción en los estudiantes, ya que en ciertas rutas, la cantidad de usuarios rebasa la capacidad de las unidades de transporte.

Los objetivos de la investigación en los que se basó el presente artículo se propusieron, entre otros, generar un plan de rutas de recorrido con restricciones de capacidad al sistema de transporte de buses de UNITEC en el campus de Tegucigalpa utilizando herramientas de investigación de operaciones, específicamente, programación lineal. De manera puntual, se definieron las variables y restricciones relevantes para la formulación del modelo matemático, la búsqueda de soluciones y la validación. El propósito fue proponer un plan que elimine la cantidad de pasajeros que viajan de pie en los recorridos, enfocándose en cumplir la demanda sin que se rebasa la capacidad de los buses

Estudios similares se han realizado en diferentes regiones, tal fue el estudio desarrollado en Colombia sobre el transporte escolar en la ciudad de Bogotá que tenía como fin encontrar el diseño óptimo de rutas de buses escolares para una red de diferentes zonas residenciales con los colegios del norte de la ciudad de Bogotá, Colombia, en donde a su vez se estimó el impacto de la implementación de una estrategia de cooperación entre operadores logísticos de transporte escolar, a través de un modelo matemático de programación entera mixta [1].

Por otro lado, en Chile se realizó una investigación con una empresa minera que desarrollaba operaciones de transporte al llevar a los trabajadores desde sus hogares hasta los destinos de trabajo, así como la ruta opuesta, desde el lugar de trabajo hasta las zonas de residencia, en donde se desarrolló un modelo matemático con restricciones específicas de la capacidad del sistema con el objetivo de brindar una solución óptima a las rutas de recorrido de las unidades de transporte [2].

En Honduras se desarrolló una investigación con el propósito de determinar rutas óptimas para la selección de

destinos de viaje en localidades turísticas del país haciendo uso de un modelo de Problema de Agente viajero o Traveling Salesman Problem (TSP) resuelto con la implementación de métodos heurísticos. Esta investigación brindaba una solución a un problema de viaje en el cual se desea recorrer todos los sitios seleccionados recorriendo la menor distancia, a la vez que se cuenta con un presupuesto limitado [3].

Finalmente, en el contenido de este artículo se encuentran diferentes secciones, en las que se incluyó un apartado dedicado a la metodología empleada, así como los resultados obtenidos y las conclusiones correspondientes a cada objetivo planteado, además de recomendaciones de investigación, un apartado sobre la aplicabilidad e implementación de la investigación y finalmente, una sección sobre el trabajo futuro.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque y alcance

Esta investigación se realizó con un enfoque cuantitativo, ya que en los objetivos planteados se utilizaron herramientas de ingeniería Industrial y de Sistemas para el desarrollo de las diferentes etapas de la investigación, en las que se incluyen la recolección de datos, la construcción y resolución de un modelo matemático y la validación de este último. Las conclusiones brindadas a su vez son medibles y se expresaron en valores cuantitativos.

La investigación se realizó con un alcance correlacional al desarrollarse con la finalidad de conocer la relación que se genera entre la demanda de cada una de las localidades por las que se debe transportar estudiantes, así como la capacidad de las unidades de transporte con la ruta optima generada que aglomere los distintos puntos que debe recorrer el bus.

B. Población, muestreo y muestra

i. En relación a las estaciones de parada

Se tenía una población de estaciones de paradas por las que debían recorrer los buses. La población total fue de 98 paradas para el recorrido de la mañana y 80 paradas para el recorrido de la tarde.

A su vez, se realizó un muestreo probabilístico, en el cual todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidos, y los elementos muestrales tendrán valores muy parecidos a los de la población, de manera que las mediciones en el subconjunto, generarán valores más precisos del conjunto mayor [4]. Se tomó el grado de confiabilidad más alto para las muestras con la finalidad de tener una muestra de estudio fiable utilizando la ecuación (1).

$$n = \frac{N(Z)^2(P)(Q)}{e^2[N-1] + Z^2(P)(Q)} \quad (1)$$

Al realizar el muestreo probabilístico, este arrojó una muestra con los mismos valores de la población detallada, por lo que las muestras analizadas en esta investigación fueron de 98 estaciones de paradas para el recorrido que realizan los buses

por la mañana, 80 estaciones de paradas para el recorrido que realizan los buses por la tarde.

ii. En relación a los conductores

Se determinó necesario definir una segunda población para analizar a los involucrados propiamente en el proceso de transporte, específicamente, los conductores, quienes a la fecha de realización de esta investigación eran un total de 9, que es la misma cantidad de vehículos que puede circular simultáneamente. Similar al primer muestreo, a través de un muestreo aleatorio simple con un grado de confiabilidad de 99.7, se seleccionaron los 9 conductores como muestra.

C. Variables

En la presente investigación, se definieron 8 variables entre dependientes e independientes a su vez fueron representadas en el modelado matemático (función objetivo y restricciones). Estas mismas se definieron a través de entrevistas realizadas a los 9 sujetos definidos como la muestra en el apartado B. *Población, muestreo y muestra*, con el fin de generar el modelo con datos relevantes sobre el sistema de transporte.

En primer lugar, las variables independientes se caracterizan por ser aquellas que componen el modelo matemático y son necesarias para su realización [5]. En esta investigación las variables independientes consideradas fueron:

- i. Conjunto total de paradas.
- ii. Distancia entre paradas
- iii. Demanda de las paradas
- iv. Conjunto de vehículos disponibles.
- v. Capacidad medida en asientos de los vehículos.

Por otro lado, las variables dependientes son aquellas aparecen como resultado de la resolución del modelo matemático [6]. En la presente investigación, se consideraron como variables dependientes las siguientes:

- i. Ruta: conjunto de paradas que serán recorridas por un bus.
- ii. Tipo de bus: vehículo asignado a la ruta según su capacidad.
- iii. Distancia recorrida: distancia recorrida total por todas las rutas simultáneamente.

D. Instrumentos y técnicas

Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- i. Entrevistas: herramienta utilizada por el investigador para recolectar y registrar la información mediante preguntas abiertas y/o cerradas, en la cual, para las primeras se consideran opciones de respuesta de una amplia variedad y para el ultimo tipo de preguntas solo se consideran respuestas delimitadas de antemano por el investigador [7]. Se realizó un cuestionario con 7 preguntas abiertas y cerradas aplicada a los 9 conductores. La entrevista fue revisada y validada previo a la aplicación.

- ii. Google Maps: Servidor de aplicaciones de imágenes de mapas desplazables con opción de visualización de distancia entre puntos seleccionados.

Las técnicas de análisis del estudio fueron las siguientes:

- i. Estadística básica: rama de las matemáticas que recopila, organiza y analiza datos seleccionados u observados.
- ii. Programación lineal: rama de la programación matemática que estudia la asignación eficiente de recursos limitados [8]. Se utilizó esta técnica para transformar el modelo de variables y restricciones en un plan de rutas de recorrido para el sistema de transporte.
- iii. Grafos: software de resolución de problemas de ruteo que aplica diferentes algoritmos y módulos según las variantes de problemas [9]. Se utilizó este software como herramienta de resolución de problemas de programación lineal para el caso específico de problemas de ruteo de vehículos.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Recolección de información a través de entrevistas a conductores de buses

Como se planteó en el muestreo ii. En relación a los conductores, se realizaron entrevistas a los 9 conductores encargados de realizar los recorridos de los buses en las diferentes rutas, dentro de los hallazgos más relevantes para definir el modelo matemático se establecieron:

- i. Se tienen 9 buses disponibles para realizar recorridos simultáneamente. Estos mismos 9 buses operan tanto en la mañana como en la tarde.
- ii. Se tienen 6 buses con capacidad para 54 pasajeros sentados y 3 buses con capacidad para 45 pasajeros sentados.
- iii. Para el recorrido de la mañana, se tienen un total de 98 estaciones de paradas por las que deben circular los buses.
- iv. Para el recorrido de la tarde, se tienen un total de 80 estaciones de paradas por las que deben circular los buses.
- v. La demanda total del recorrido de la mañana en sus diferentes rutas es de 438 pasajeros.
- vi. La demanda total del recorrido de la tarde en sus diferentes rutas es de 447 pasajeros.

B. Modelo matemático

La función objetivo se define como una relación matemática entre las variables de decisión, los coeficientes de las propias variables y la magnitud que es el objetivo central del modelo que, dependiendo del problema, se expresa en función de maximizar o minimizar esa magnitud [10]. Para esta investigación, se planteó como función objetivo minimizar la distancia recorrida total de todas las rutas, respetando las restricciones de capacidad definidas. Expresada en términos de

nomenclatura matemática, la función objetivo se define mediante la ecuación (2).

$$\text{Min } \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^V c_{ij} \sum_{k=1}^K X_{ijk} \quad (2)$$

Descripción de nomenclatura matemática de la función objetivo:

i = nodo o parada de origen.

j = nodo o parada de destino.

V = conjunto total de paradas i y j .

c_{ij} = distancia entre la parada i y la parada j .

K = conjunto de vehículos disponibles.

X_{ijk} = variable binaria que indica si el vehículo k recorrerá el arco ij .

Las restricciones desde el punto de vista de investigación de operaciones se definen como toda limitante que restrinja la libertad de los valores entre los que pueden oscilar las variables de decisión. Las restricciones permiten que el fenómeno investigado se acerque lo más posible a la realidad analizada, ya que en cualquier ambiente se tienen recursos limitados. La solución del modelo matemático que se encuentre satisfaciendo las restricciones será una respuesta factible [11].

Para el presente estudio se plantearon 5 restricciones:

- i. Ecuación (3): se debe atender una estación de parada por un único vehículo.
- ii. Ecuación (4): todos los vehículos deben partir del nodo origen, definido como el campus de UNITEC.
- iii. Ecuación (5): los vehículos deben regresar al nodo origen.
- iv. Ecuación (6): en la mañana las primeras estaciones de paradas son las más lejanas al nodo origen.
- v. Ecuación (7): en la tarde las primeras estaciones de paradas son las más cercanas al nodo origen.

$$\sum_{k=1}^K Y_{ik} = 1, i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K Y_{0k} = K \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^V \sum_{k=1}^K Y_{ik} = 0, i \in V \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^V \sum_{i=1}^V X_{jik} = y_{ik}, i, j \in V, k = 1 \dots K$$

(6)

$$\sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^V X_{ijk} = y_{ik}, i \in V, k = 1 \dots K$$

(7)

Nomenclatura matemática de las restricciones:

i: nodo o parada de origen.

j: nodo o parada de destino.

V: conjunto total de paradas *i* y *j*.

c_{ij}: distancia entre la parada *i* y la parada *j*.

d_i: demanda de la parada *i*.

K: conjunto de vehículos disponibles.

ck: capacidad medida en asientos del vehículo *k*.

X_{ijk}: variable binaria que indica si el vehículo *k* recorrerá el arco *ij*.

Y_{ik}: variable binaria que indica si el nodo *i* con demanda *d_i* será atendido por el vehículo *k*.

C. Solución de modelo matemático

Se contaban con un total de 98 estaciones de paradas para el recorrido de la mañana y 80 para el recorrido de la tarde distribuidas en la ciudad del Distrito Central, cada una con una demanda asociada. A su vez, se extrajo la información referente a las distancias medidas en kilómetros entre las estaciones mencionadas. Cada una de estas distancias fueron ingresadas en la matriz de distancias por el software Grafos, de las cuales se descartaron los valores demasiado grandes, asignándoles un valor de 1000. En la figura 1 se muestra un resumen de la matriz de distancias.

Origen/Destino	UNITEC	Villas del Sol	Gradas del Hato	Cascadas Mall	Las Brisas	Metronall	Colegio Central Vicente Caceres	Colonia 21 de febrero	Estación Tres Postes	Centroamerica	Canchas del Central	Mall Premier	
UNITEC	2.6	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Villas del Sol	2.6	0.7	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Gradas del Hato	1000	0.7	2.9	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Cascadas Mall	1000	1000	2.9	1.1	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Las Brisas	1000	1000	1000	1.1	0.5	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Metronall	1000	1000	1000	1000	0.5	0.8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Colegio Central Vicente Caceres	1000	1000	1000	1000	1000	0.8	1.4	1000	1000	1000	1000	1000	
Colonia 21 de febrero	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1.4	0.4	1000	1000	1000	1000	
Estación Tres Postes	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.4	0.9	1000	1000	1000	
Centroamerica	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.9	1.12	1000	1000	
Canchas del Central	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1.12	0.8	1000	
Mall Premier	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.8	
Entrada Campo Calo	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.5
Cerro Grande Zona 2 La Posta	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Fig. 1 Matriz de distancias
Fuente: Elaboración propia

Es relevante indicar que se descartaron ciertas distancias con la finalidad de que el software no considere rutas irreales como opciones. Por ejemplo, si se conoce cuál es la ruta más corta para ir de un punto A a un punto B, no es conveniente incluir en el software otras distancias conociendo de antemano que serán descartadas por este. Las distancias descartadas se hicieron con el criterio de la ruta más corta, es decir, seleccionar la vía más corta para ir de una parada a la siguiente [12].

A su vez, según la información proveída a la fecha de aplicación del instrumento, en noviembre de 2023, se compartió que la empresa de transporte cuenta con 9 buses, con las

capacidades especificadas. Esta información se agregó en la ventana de flota de buses del software Grafos. El ingreso de datos se muestra en la figura 2.

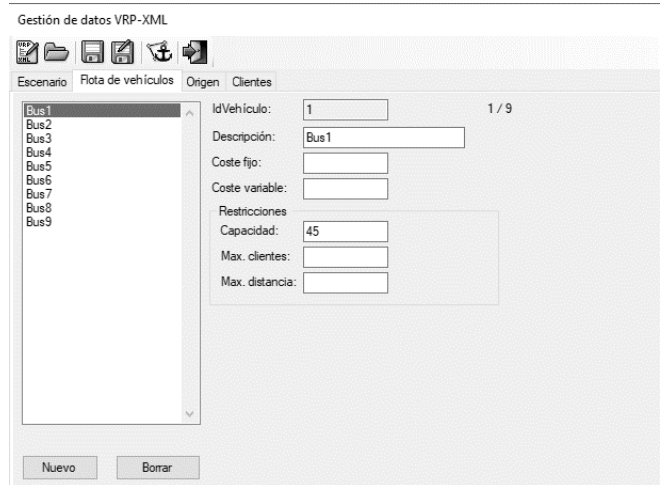


Fig. 2 Flota de buses
Fuente: Elaboración propia

El software Grafos incluye dentro de sus métodos de resolución, una funcionalidad de solución de problemas de Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), que se define como una flota de vehículos con capacidades distintas que deben satisfacer las demandas de un grupo de clientes mediante diferentes rutas que parten del almacén y que deben regresar a este mismo, todo esto tratando de reducir la distancia sujeta a las restricciones [13]. Para el ingreso de estos datos, se seleccionó esta modalidad de resolución.

la función objetivo del modelo matemático formulado buscó minimizar la distancia de recorrido total a la vez que se respetaban las restricciones de capacidad de los buses. se ingresaron en el software Grafos en su modalidad de resolución de CVRP.

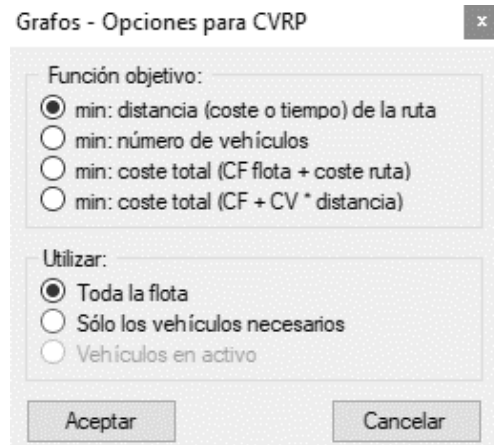


Fig. 3 Función objetivo
Fuente: Elaboración propia

En la ventana de selección de datos de CVRP de Grafos, se seleccionó la opción de minimizar distancia de la ruta, a la vez que se seleccionó la función de utilizar toda la flota, ya que el modelo matemático contempla realizar la distancia mínima de recorrido sin importar cuantas unidades se utilicen. La función de utilizar los vehículos necesarios se reserva para modelos en los que se busque reducir costos.

Luego de resolver el modelo matemático con la restricción, función objetivo y demás factores especificados, fue conveniente analizar la distribución mostrada por el software, con el fin de comparar la propuesta generada con los datos del sistema como se desarrolla actualmente.

En primer lugar, en esta investigación se realizó una comparativa por cada ruta asignada a un bus referente a la cantidad de pasajeros de pie que se presentan tanto en el plan propuesto como en el actual. Además, se analizó el aprovechamiento de las unidades de transporte, ya que este valor implica una asignación eficiente de las paradas con relación a la capacidad de los buses. Un valor más cercano al 100% implica una asignación más eficiente. La fórmula para calcular este valor se muestra en la siguiente ecuación (8).

$$\text{Aprovechamiento}' = 1 - \left| \frac{(\text{Capacidad} - \text{Demanda})}{\text{Capacidad}} \right| * 100 \quad (8)$$

El plan de recorridos se contempló con la finalidad de no permitir pasajeros de pie en las rutas, por lo que el modelo matemático se restringió de esta manera, cumpliendo a su vez con el objetivo general de la investigación, reduciendo en su totalidad la cantidad de pasajeros de pie como se muestra en la Tabla I, esto en el recorrido de la mañana.

COMPARATIVA DE PASAJEROS DE PIE EN LAS RUTAS DE LA MAÑANA

Número de ruta	Pasajeros de pie con plan actual	Pasajeros de pie con plan propuesto
Ruta 1	6	0
Ruta 2	3	0
Ruta 3	4	0
Ruta 4	8	0
Ruta 5	0	0
Ruta 6	2	0
Ruta 7	5	0
Ruta 8	6	0
Ruta 9	2	0
TOTAL	36	0

Para todas las rutas se eliminó la cantidad de pasajeros de pie, en donde fue la ruta 4 la que tuvo la reducción más significativa. Con el plan actual, los pasajeros de pie representan el 9% del total de usuarios del transporte en el horario de la mañana. Con el plan propuesto, se contempla que

el 100% de los usuarios del transporte tengan un asiento a su disposición.

Los resultados de las mediciones de aprovechamiento de las unidades de transporte para cada una de las rutas se muestran en la Tabla II y Tabla III. Como se detalló en la ecuación (8), el aprovechamiento se expresa en porcentaje y considera la cantidad de pasajeros respecto a la capacidad del bus. Una ruta con una cantidad de pasajeros que rebasa la capacidad o que, por el contrario, desaproveche la capacidad del bus arrojaría un valor menor. Los resultados de la aplicación de la fórmula de la Ecuación (8) para cada ruta se muestran en la Tabla II y la Tabla III.

APROVECHAMIENTO DE BUSES RUTA DE LA MAÑANA CON EL PLAN ACTUAL

Número de ruta	Capacidad de bus (asientos)	Cantidad de pasajeros	Aprovechamiento de capacidad (%)
Ruta 1	54	41	75.92%
Ruta 2	45	54	80%
Ruta 3	54	48	88.88%
Ruta 4	54	51	94.44%
Ruta 5	54	60	88.88%
Ruta 6	45	41	91.11%
Ruta 7	54	40	74.07%
Ruta 8	45	63	60%
Ruta 9	54	40	74.07%

APROVECHAMIENTO DE BUSES RUTA DE LA MAÑANA CON EL PLAN PROPUESTO

Número de ruta	Capacidad de bus (asientos)	Cantidad de pasajeros	Aprovechamiento de capacidad (%)
Ruta 1	45	45	100%
Ruta 2	54	54	100%
Ruta 3	54	53	98.14%
Ruta 4	54	53	98.14%
Ruta 5	54	50	92.59%
Ruta 6	45	41	91.11%
Ruta 7	45	40	88.88%
Ruta 8	54	53	98.14%
Ruta 9	54	54	100%

Para cada una de las rutas se generaron valores satisfactorios de aprovechamiento, muy cercanos al 100% para la mayoría, lo cual implica que se realizó una asignación eficiente, teniendo un aprovechamiento promedio de 96.33%, el cual es un valor satisfactorio al considerar el 80.82% que se tiene actualmente, el cual surge de los valores detallados en la Tabla III, en donde, la cantidad de pasajeros que abordan las

unidades son valores distantes en mayor o menor medida a la capacidad del bus.

A su vez, el plan de recorridos de la tarde se contempló con la finalidad de no permitir pasajeros de pie en las rutas, por lo que el modelo matemático se restringió de esta manera, cumpliendo a su vez con el objetivo general de la investigación, reduciendo en su totalidad la cantidad de pasajeros de pie como se muestra en la Tabla IV detallando los valores para las rutas del recorrido de la tarde.

COMPARATIVA DE PASAJEROS DE PIE EN LAS RUTAS DE LA TARDE

Número de ruta	Pasajeros de pie con plan actual	Pasajeros de pie con plan propuesto
Ruta 1	4	0
Ruta 2	2	0
Ruta 3	0	0
Ruta 4	2	0
Ruta 5	0	0
Ruta 6	2	0
Ruta 7	5	0
Ruta 8	6	0
Ruta 9	7	0
TOTAL	28	0

Para todas las rutas del horario de la tarde se eliminó la cantidad de pasajeros de pie, en donde fue la ruta 9 la que tuvo la reducción más significativa. Con el plan actual, los pasajeros de pie representan el 6% del total de usuarios del transporte en el horario de la tarde. Con el plan propuesto, se contempla que el 100% de los usuarios del transporte tengan un asiento a su disposición.

Los resultados de las mediciones de aprovechamiento de las unidades de transporte para el horario de la tarde en cada una de las rutas se muestran en la Tabla V y Tabla VI. Como se detalló en la ecuación (8), el aprovechamiento se expresa en porcentaje y considera la cantidad de pasajeros respecto a la capacidad del bus. Una ruta con una cantidad de pasajeros que rebasa la capacidad o que, por el contrario, desaproveche la capacidad del bus arrojaría un valor menor. Los resultados de la aplicación de la ecuación para cada ruta del recorrido de la tarde se muestran a continuación.

APROVECHAMIENTO DE BUSES RUTA DE LA TARDE CON EL PLAN ACTUAL

Numero de ruta	Capacidad de bus (asientos)	Cantidad de pasajeros	Aprovechamiento de capacidad (%)
Ruta 1	45	39	86.66%
Ruta 2	45	55	77.77%
Ruta 3	54	44	81.48%
Ruta 4	54	62	85.18%
Ruta 5	54	46	85.18%

Ruta 6	45	55	77.77%
Ruta 7	54	62	85.18%
Ruta 8	54	43	79.62%
Ruta 9	54	41	75.92%

APROVECHAMIENTO DE BUSES RUTA DE LA TARDE CON EL PLAN PROPUESTO

Numero de ruta	Capacidad de bus	Cantidad de pasajeros	Aprovechamiento de capacidad
Ruta 1	45	43	95.55%
Ruta 2	45	44	97.77%
Ruta 3	54	52	96.29%
Ruta 4	54	53	98.14%
Ruta 5	54	53	98.14%
Ruta 6	45	43	95.55%
Ruta 7	54	53	98.14%
Ruta 8	54	54	100%
Ruta 9	54	52	96.29%

Para cada una de las rutas del horario de la tarde se generaron valores satisfactorios de aprovechamiento, muy cercanos al 100% para la mayoría, lo cual implica que se realizó una asignación eficiente al tener un aprovechamiento promedio de 97.32%, el cual es un valor satisfactorio al considerar el aprovechamiento de 81.64% que se maneja actualmente, el cual surge de los valores detallados en la Tabla VI, donde la cantidad de pasajeros que abordan las unidades son valores distantes en mayor o menor medida a la capacidad del bus.

D. Validación

i. Validación por triangulación de expertos

el objetivo de la validación por triangulación es buscar puntos de convergencia para corroborar una interpretación de un fenómeno u objeto de estudio [14]. Se realizó una validación por triangulación de expertos en el área de investigación de operaciones para diferentes aspectos, estos se muestran en la Tabla VII.

ASPECTOS A CONSIDERAR MEDIANTE TRIANGULACIÓN DE EXPERTOS

Aspectos	Elementos
Instrumentos	• Entrevista dirigida a conductores
Variables	• Nomenclatura
Modelo matemático	• Función objetivo, restricciones y variable de decisión • Formulación de modelo en Grafos
Resultados	• Plan propuesto • Análisis

Fuente: Elaboración propia

El instrumento aplicado a modo de entrevista fue examinado por los tres asesores temáticos expertos en Investigación de Operaciones, quienes revisaron cada ítem y

propusieron mejoras en los ítems ya incluidos, y cada uno de ellos concordaron en que las preguntas incluidas eran relevantes para extraer datos que serían de utilidad en la construcción del modelo matemático.

Por otro lado, los asesores temáticos corroboraron el uso de la herramienta de solución de problemas de ruteo, el software Grafos, en donde dos asesores afirmaron que el software y su módulo de resolución de problemas de CVRP sería de utilidad para resolver el modelo matemático formulado. A su vez, los asesores corroboraron la formulación del modelo matemático, con su nomenclatura, restricciones y función objetivos dirigidas a cumplir con el objetivo general de la investigación.

Finalmente, los asesores temáticos corroboraron que la solución generada era coherente respecto a la problemática que se propone resolver, en donde a su vez recomendaron el uso de pruebas de optimalidad como método de validación para comprobar si la respuesta es factible y óptima a la vez, por lo que puede ser implementada por los responsables del servicio de transporte con los recursos que cuentan a la fecha de realización de esta investigación.

ii. Validación por pruebas de optimalidad

Las pruebas de optimalidad son de suma relevancia para corroborar que la respuesta generada por el modelo sea realmente la mejor de todas, en donde al comparar con otras opciones que son suficientemente buenas pero no óptimas se visualiza un panorama general sobre la cantidad de combinaciones de asignación de recursos posibles [15].

Se realizó una prueba de optimalidad con el fin de conocer si la asignación generada con todas las paradas especificadas y los buses disponibles era realmente la mejor combinación de variables o la que cumplía de mejor forma con las magnitudes establecidas en la función objetivo. El desarrollo de la prueba de optimalidad se realizó con 1936 variables que consideraban la combinación de buses con paradas para los recorridos específicos. El resumen de la prueba de optimalidad aplicada en el total de variables se muestra en la Tabla VIII.

TABLA VIII
RESUMEN DE PRUEBA DE OPTIMALIDAD

Celda	Variable	Valor final	Valor objetivo	Incremento permitido	Reducción permitida
Variable de decisión	X _{ijk}	1	45 ó 54	1E+100	1E+100

La prueba de optimalidad arrojó que el valor de la función objetivo tiene incrementos y reducciones permitidas en un rango muy bajo, con valores muy cercanos a 0 para algunas variables y exactamente 0 en otras, los cuales son valores despreciables, por lo que realizar cambios sobre esas variables no originaría cambios significativos y por lo tanto la solución generada por el modelo es óptima y factible al cumplir con las

restricciones integradas y seleccionar la opción óptima que da solución a la función objetivo.

IV. CONCLUSIONES

A. Conclusiones específicas

La variable que tuvo mayor incidencia en el modelo matemático realizado fue la capacidad de las unidades de transporte medida en cantidad de asientos, que es de 459. Esta variable y la restricción definida para que no se rebase la capacidad en mención, contribuyó a que el modelo asignara las estaciones de paradas a los buses de manera que se cumpla con el objetivo la investigación.

Con el plan de rutas de propuesto se beneficiarían un total de 64 estudiantes en ambos recorridos (de salida y regreso). Dicha cantidad de estudiantes representan un 8% de los usuarios de los buses y con la reorganización propuesta por el modelo matemático se garantiza que el 100% de estos usuarios tengan un asiento a su disposición. A su vez, se logra un mayor aprovechamiento de los buses, ya que con el plan propuesto se lograría aumentar el aprovechamiento en un promedio de 16% para ambos recorridos.

La validación realizada por los dos métodos empleados, pruebas de optimalidad y triangulación, permitió confirmar que el plan propuesto y sus rutas generadas sean factibles y óptimas, por lo que puede implementarse como parte del plan de rutas del sistema de transporte de UNITEC Tegucigalpa si la variable relacionada a las demandas asociadas a cada estación de parada y los buses disponibles para atender esas demandas se mantengan en los mismos valores que se manejan a la fecha de realización de esta investigación, en el periodo académico que comprende de octubre a diciembre de 2023.

B. Conclusión general

La capacidad de los buses medida en asientos fue relevante en el modelo matemático para optimizar el sistema de transporte de UNITEC Tegucigalpa. El plan de rutas propuesto beneficia al 8% de usuarios del transporte, que son quienes viajan de pie, garantizando asientos para el 100% de ellos, con un aumento del 16% en el aprovechamiento de la capacidad de los buses. La validación confirma su factibilidad, sugiriendo su implementación, siempre que las condiciones de demanda y disponibilidad de buses se mantengan en los mismos valores que se consideraron en este estudio.

V. RECOMENDACIONES

Previo a la recolección de datos, se recomienda definir el modelo matemático a utilizar según el tipo de problema de optimización que se trate, como en esta investigación, que se trató de un problema CVRP, ya que así se puede definir con mayor certeza las herramientas e instrumentos que llevarán a generar el modelo matemático.

En el diseño del modelo matemático se debe tener presente cual es la restricción que tiene mayor incidencia en el modelo matemático, ya que esta será la que determine en mayor medida la aplicabilidad de la solución generada, así como seleccionar el valor de función objetivo que realmente contribuye al cumplimiento del objetivo de la investigación, ya que de esto dependerá si se desea minimizar o maximizar este valor.

Se sugiere aplicar pruebas de optimalidad mediante metodologías alternas, ya que las pruebas por métodos convencionales suelen presentar problemas de cálculo al trabajar con muchas variables. En esta investigación se trabajaron con 1936 variables de decisión, las cuales consumían capacidad de cálculo extensa para el procesamiento del software utilizado.

VI. APLICABILIDAD E IMPLEMENTACIÓN

Esta propuesta de plan de rutas implica una reorganización de las paradas que fueron identificadas como zonas de demanda. El plan mostrado consideró los recursos con los que se cuentan, siendo la cantidad de buses los más relevantes, por lo que el plan puede ser implementado considerando que se mantengan constantes los recursos actuales y las demandas que se tomaron en cuenta a la fecha de realización del plan.

Esta investigación puede ser replicada en cualquier otro rubro en el que se busque realizar una asignación eficiente de vehículos, considerando su capacidad limitada. La metodología empleada en esta investigación puede aplicarse a otros estudios al modificar variables de interés específicas, como la demanda de cada parada, la distancia entre nodos y la cantidad de vehículos con sus capacidades.

VII. TRABAJO FUTURO

Mediante herramientas de simulación de sistemas, se puede analizar el comportamiento del abordaje de estudiantes a los buses. Este es un problema que se encuentra presente previo a realizar los recorridos, en donde al tener más de 400 pasajeros tratando de abordar los buses en periodos de tiempo reducidos se generan extensas filas que muchas veces retrasan los recorridos.

El sistema incluiría una fuente, que sería el campus de la universidad, con distribuciones de probabilidad del tiempo entre llegadas de los pasajeros, además de filas para abordar los y procesadores, que serían los guardias que realizan la inspección. Se podría realizar una simulación en la que se analice el comportamiento del sistema actual y una comparación con un método alternativo, que, como el tiempo que tomaría hacer la inspección con tecnología de reconocimiento facial o la distribución de las filas.

REFERENCIAS

[1] Parra, G. R. R. (2017). Optimización del Problema de Ruteo y Programación de Buses Escolares con Restricciones de Congestión de

Tráfico para Políticas de Rutas Compartidas (Mixed-Load) e Independientes (Single-Load).

[2] Salinas, C. I., & Namur, P. S. (2018). Optimización modelo de transporte.

[3] Funez, H. (2020). Optimización De Ruta Para Recorrido Turístico En Honduras.

[4] Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* | RUDICS.

[5] Ariza Agamez, D. de J. (2017). Investigación de operaciones 1. Bogotá: AREANDINA. Fundación Universitaria del Área Andina.

[6] Butron, M. M. (s/f). Técnicas para la Optimización de Rutas de Transporte y Distribución.

[7] Avila, H. F., González, M. M., & Licea, S. M. (2020). LA ENTREVISTA Y LA ENCUESTA: ¿MÉTODOS O TÉCNICAS DE INDAGACIÓN EMPÍRICA? *Didáctica y Educación*, Article 3.

[8] Ayuso, M. del C. H. (2007). Introducción a la programación lineal. UNAM.

[9] Elejalde del Rio, C. M., & Ramírez Castañeda, L. N. (2010). *Modelo para la asignación de rutas de ambulancias de la empresa Health Society S.A. para la prestación de servicio en Bogotá*

[10] Muñoz, E. A. B., & Sotero, J. H. C. (2009). *Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte*. 32.

[11] Toro-Ocampo, E. M., Franco-Baquero, J. F., & Gallego-Rendón, R. A. (2016). Modelo matemático para resolver el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad considerando flota propia y subcontratada. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*

[12] Morales, A. R. (2014). Modelo matemático del problema del agente viajero para encontrar la ruta óptima de distribución. *Investigacion Gestion Organizacional*.

[13] Galarcio, J. D., Buelvas, M., Nisperuza, P., López, J., & Hernandez, H. (2017). Una nueva metaheurística aplicada al problema de ruteo de vehículos capacitados (cvrp) para la distribución de productos perecederos. *Ingeniería e Innovación*, 5(1), Article 1.

[14] Ríos-Mercado, R., & Bard, J. (2000). Heurísticas para secuenciamiento de tareas en líneas de flujo. *Ciencia UANL*, 3, 420–427.

[15] Samaja, J. (s/f). LA TRIANGULACIÓN METODOLÓGICA (PASOS PARA UNA COMPRENSIÓN DIALÉCTICA DE LA COMBINACIÓN DE MÉTODOS). *Revista Cubana de Salud Pública*.