Consideraciones para la Optimización de Rutas en un Sistema de Transporte Escolar (STE)

Efren Armando Prieto Alvarez[1], Dr. José Osiris Vidaña Bencomo[2], Mtro. Alberto Rodríguez Esparza[3].

[1]Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
[2, 3]Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

El presente artículo hace referencia hacia la introducción al transporte escolar, su clasificación, atributos, y su composición, así como una breve descripción del uso de tecnologías y software para la optimización del servicio. Se realizó un estudio de artículos publicados con relación al tema, en diferentes bases de datos. La planeación eficiente de rutas para un sistema de transporte escolar, ocupa un lugar muy importante en cuestión de cómo trasladar a los estudiantes desde y hacia las escuelas de la manera más segura, económica, y conveniente para una sociedad que está en constante desarrollo.

Palabras Clave: Planificación de rutas de Transporte Escolar, School Transportation, School Bus Routing Problem

Introducción

El transporte ha sido y será un elemento clave para el desarrollo de las civilizaciones; el transporte consta de trasladar personas o bienes materiales de un lugar a otro, además de jugar un papel muy importante en la vida moderna, ya que la eficiencia de un sistema de transporte aumenta el índice competitivo y económico de un país. Un sistema de transporte urbano está principalmente conformado por cuatro elementos: vehículos, vías, terminales y sistemas de control.

El transporte proviene de la necesidad que surge de actividades diarias del ser humano, tales como producción, consumo, residencia y recreación, que se generan dependiendo de su área geográfica, ya sea un país, cuidad, y/o colonia, estas son definidas como un sistema de actividades, y son los factores que generan los viajes y la demanda de transporte. Esta demanda es cubierta a través de un conjunto de medios, modos y terminales y la manera en cómo funcionan estos elementos se les conoce como sistemas de transporte (Liu, 2002).

La interacción de los sistemas de actividades y transporte producen un patrón de flujos, los cuales están constituidos por diversos viajes, que definen los orígenes y destinos, así como las diferentes rutas, por

las cuales se emplearan diferentes medios y modos de transporte para trasladarse. Para un eficiente funcionamiento del sistema de transporte debe de existir un equilibrio entre la oferta y demanda del transporte (Spada, et al, 2003).

La demanda se refiere a la necesidad de trasladar, ya sea bienes o personas según sea el caso. Para definirla se requiere calcular el volumen, así como la distribución espacial y temporal de los viajes que se realizan en la ruta de estudio. La oferta está conformada por la flota de unidades de transporte que prestan el servicio, las rutas, la infraestructura vial y la calidad del servicio, los cuales deben ser acorde a la demanda del servicio para que la actividad resulte eficiente (Stojanovski, 2013).

La meta del sistema de transporte es tener un sistema de transporte rápido y cómodo, pero a la vez flexible y accesible a todos los usuarios, siendo necesario una buena accesibilidad, es decir, que tenga facilidad para que los pasajeros puedan llegar a los paraderos (Stojanovski, 2013).

Importancia de la planeación de un Sistema de Transporte Escolar (STE)

Los medios de transporte que los usuarios utilizan para trasladarse a los centros de estudios son variados, tales como: bicicleta, vehículo particular, autobús, colectivos o caminado, ya sean sus necesidades o posibilidades, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Medios de transporte en los que los alumnos se trasladan a la escuela (Instituto Municipal de Planeación, 2010)

La optimización de rutas de un Sistema de Transporte Escolar (STE) es considerada un tema de vital importancia para las administraciones públicas, lo anterior debido a la obligatoriedad del servicio y la transcendencia socioeconómica. Una de las grandes preguntas de investigación es cómo

transportar a los estudiantes de manera más segura, confiable y eficiente, económica y conveniente (Kumar, et al ,2014).

El transporte escolar es un servicio, al cual se le debe dar prioridad, para así garantizar el acceso diario a la educación en sus diferentes niveles. El nivel del éxito y eficacia de un STE, depende de ciertos factores, como el tipo de transporte escolar elegido, la traza vial alrededor de las escuelas, la logística de las rutas con y sin estudiantes (Molina, 2012).

En la selección de rutas para vehículos de transporte escolar, es necesario que se establezcan una o varias rutas dentro una red vial, para poder así colocar estaciones por las cuales pasen los autobuses y recojan a los estudiantes, los cuales deben asignarse a las estaciones más cercanas, para posteriormente trasladarlos a la escuela. De esta forma los diseñadores o planificadores de rutas puedan identificar el área con más demanda de usuarios para así poder establecer en que punto de la ruta se deben de poner las estaciones (Nayati, 2008).

La planeación de rutas o trazo de las mismas, se ha vuelto un tema de gran importancia, al grado que se ha logrado crear su propia línea de investigación, la cual consiste en la selección de un conjunto de recorridos para la flota de vehículos, que parten de un origen y así recoger a los usuarios que están dispersos geográficamente con el fin de trasladarlos a sus destino (Díaz, 2006).

Según Nayati, en la selección de rutas para las unidades de transporte escolar se considera que los principales objetivos en los que se enfoca la optimización de esta son: reducir al mínimo el costo de transporte, reducir al mínimo el tiempo de transporte, minimizar el número total de autobuses para el transporte, diseño de estaciones para recoger a los estudiantes y la reducción o erradicación de los riesgos de circulación como cruces peligrosos, pasos a nivel (Nayati, 2008).

Elementos a consideran para un análisis de un STE

Para el correcto análisis de un sistema de transporte escolar, es necesario conocer los elementos básicos que lo conforman, los cuales puede proporcionar a la empresa que presta el servicio observaciones directas de campo como:

- *Longitud de la ruta:* Es la suma de la distancia total que recorre la unidad desde donde comienza su recorrido hasta donde lo acaba, es decir el trayecto entre el origen y destino, expresada en km.
- *Tipo y clase de servicio:* Es la manera en que operacionalmente se comporta una unidad transportadora en un sistema de transporte establecido.
- *Itinerario:* Recorrido detallado que hace una unidad transportadora (Autobús) a lo largo de una ruta preestablecida.
- *Número de autobuses asignados:* Unidades que están disponibles para satisfacer la demanda, de cierta ruta.

- *Capacidad del tipo de autobús:* Número máximo de pasajeros que se pueden trasladar en una unidad transportadora según su tipo, en condiciones seguras.
- *Tiempo de recorridos programados:* Tiempo total expresado en horas, minutos, segundos en los que la unidad transportadora realiza su recorrido.
- *Número y ubicación de las paradas:* Número total de las estaciones (paradas) y ubicación de las mismas a lo largo de la ruta.
- *Tiempo de servicios programados:* Unidad de medida de este parámetro es en segundos, minutos, en los que la unidad transportadora está detenida en las estaciones, para que los usuarios suban o bajen de ella.
- *Frecuencias de servicios o intervalos:* Intensidad con la que las unidades transportadoras pasan por cierto punto de la ruta preestablecida. Esta varía dependiendo de la velocidad y las condiciones de tráfico.
- *Volúmenes de usuarios:* Cantidad de usuarios que son transportados a través de la ruta preestablecida. (Instituto Mexicano del Transporte, 1992).

Factores que influyen en la capacidad de un Autobús

Uno de los aspectos que son muy importantes de analizar, dentro de un sistema de transporte escolar, es la capacidad del transporte cuya definición se refiere al máximo número de pasajeros que se pueden transportar en una ruta establecida durante un tiempo determinado, bajo condiciones de operaciones, seguridad, funcionalidad y velocidades razonables.

Es necesario que el transporte escolar sea flexible para que pueda adaptarse a las diferentes configuraciones viales que existen en la cuidad, también es preciso que se adapte a las necesidades de demanda, tanto en el número de unidades que sean suficientes para compensar la demanda y que cumplan con cierta calidad de nivel de servicio.

Los factores que influyen en la capacidad de transporte de un autobús están en función de cuatro factores, en los cuales se puede definir la capacidad máxima de pasajeros que se puede transportar por ruta ligados básicamente a ciertos elementos, ver Tabla 1.

La ocupación en los autobuses se refiere al número máximo de pasajeros que físicamente pueden acomodarse en dicha unidad, es un factor que se requiere conocer pues influye directamente con la capacidad del sistema de transporte y este es medido en pasajeros/autobús.

El tamaño y tipo de autobús ha evolucionado con respecto al tiempo. Las primeras unidades contaban con una capacidad de seis personas por unidad mientras que en la actualidad existen autobuses de 53 asientos y con una capacidad máxima entre 50 a 80 pasajeros. En México el Autobús que más se utiliza cuenta con un número de 40 asientos y una

capacidad máxima de 80 pasajeros por unidad. En la siguiente Tabla 2, se muestran la clasificación y capacidad de los autobuses.

Tamaño y tipo del vehículo	Ocupación del vehículo	Frecuencia de paso	Tiempo de servicio
Características antropométricas	Demanda potencial en la ruta.	Longitud de la ruta	Concentración de distribución de viajeros
Características ambientales	Localización de la ruta	Control de intervalos	Características de las paradas.
Geometría vial	Operación de la ruta	Volumen y composición del tráfico	Número y longitud de las posiciones de carga.
Legislación existente		Velocidad de operación	Características de las estaciones
Tecnología		Tamaño de la flota	Espaciamiento entre paradas
		Tiempos de aceleración y desaceleración	Accesibilidad de los pasajeros a las paradas

Tabla 1. Factores que influyen en la Capacidad de un Autobús. (Instituto Mexicano del Transporte, 1992)

Tipo de autobús	No. De asientos	Capacidad total
Mini/bus	12	20
Pequeño	20	30
Estándar	40	80
Grande de un piso	50	100
Grande de dos pisos	80	120
Extra grande de dos pisos	80	170
Articulado	55	120
Extra grande articulado	55	190

Tabla 2. Capacidad según el tipo el Autobús. (Instituto Mexicano del Transporte, 1992)

Sistemas de Transporte Inteligentes

Los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS por sus siglas en inglés) son un conjunto de aplicaciones informáticas y sistemas tecnológicos desarrollados con el objetivo de optimizar el transporte y mejorar la seguridad, capacidad, fluidez y comodidad. Algunos ejemplos básicos de los instrumentos tecnológicos que se emplean para conformar un ITS son: cámaras de video para detectar accidentes, tableros de mensajes de información vial, detectores de vehículos para calcular tiempos de recorrido, centros de gestión de tránsito y sistemas inteligentes de semáforos referencia (Acha, et al, 2004).

Estos sistemas se apoyan en la tecnología, informática, telecomunicaciones y empleados de administración de redes y transporte. De este modo, la tecnología empleada en ITS permite en varias de sus aplicaciones contar con información que se utiliza sea en tiempo real para poder así analizarla y poder tener una mejor interpretación de la misma y tomar mejores decisiones al momento de la planificación (Laideira, et al, 2011).

Este tipo de sistemas inteligentes es actualmente usado para el control de los sistemas públicos de Estados Unidos de América y Europa. La utilización de los ITS permite mejorar el control de tráfico en un sistema de transporte público y la implementación de la sincronización de semáforos, lo que ha producido excelentes resultados en las ciudades medianas de países europeos como Inglaterra, Francia, Holanda, Alemania, a su vez en el continente americano, principalmente Estados Unidos y Canadá, arrojando una reducción del 5% al 23% en los tiempos de viaje y parada, además de la reducción del 20% al 50% de los retrasos causados por semáforos (Laideira, et al, 2011).

Uso de tecnologías para optimización de rutas

Debido a los avances tecnológicos que han ocurrido en los últimos años, existen varios tipos de tecnologías que nos pueden ayudar a mejorar un sistema de transporte, una de ellos es el sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) y dispositivos móviles entre otros, que sirven para capturar información acerca de la trayectoria de un objeto.

El concepto de trayectoria está relacionado con la posición cambiante de un objeto en el espacio en un cierto intervalo de tiempo (Laideira, et al, 2011). En este caso, el análisis de un sistema de transporte escolar, las unidades transportadoras deben recorrer una ruta preestablecida y deben de contar con cierto número de estaciones establecidas (paradas) a lo largo de la misma, donde la unidad de transporte debe detenerse para recoger a los usuarios. Dichas estaciones son componentes importantes para un (STE) ya que limitan la capacidad de la línea, regulan la cantidad de

unidades transportadoras que pueden operar en la ruta (Moreno, et al, 2010).

El uso de las redes basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de georreferenciación puede facilitar en gran medida muchos tipos de problemas al momento de seleccionar la ruta. Por medio de un análisis de la red disponible, hacen posible la planificación de rutas y la optimización de los recorridos para reducir la distancia recorrida, gracias al uso de algoritmos de optimización de rutas de transporte, lo cual reduce los costos de operación y mejora la eficiencia al momento de prestar el servicio (Kumar, et al, 2014).

Las rutas de transporte escolar deben modificarse constantemente para poder ser adaptadas a las necesidades de los alumnos. En la planificación de rutas de transporte escolar se debe considerar la minimización de tiempo de transporte, la disminución o eliminación de los riesgos de circulación (cruces peligrosos, pasos a nivel, entre otros), así como la reducción de costos económicos (Segui, et al, 2002).

En el ámbito de la selección de rutas del STE, existen diferentes tipos de sistemas de planeación, que se han desarrollado para tratar de optimizar el servicio, como a continuación se muestran (Nayati, 2008).

Planeación de Rutas

Con la finalidad de reducir tiempos de traslado de modo que se obtenga un plan de ruta se emplean diferentes métodos y algoritmos matemáticos como:

Modelos Matemáticos

Existen diferentes tipos de los modelos matemáticos que sirven como apoyo para la planeación de rutas, dentro de los cuales se encuentran el “Problema del Agente Viajero” y el “Problema de Ruteo de Vehículos” (PRV).

El primer modelo de “Problema del Agente Viajero” consiste lograr programar las visitas en un solo recorrido de la ruta a todos los clientes que esta incluye, por lo que se debe establecer un trayecto optimizado, lo que quiere decir que se debe reducir la distancia total del recorrido, el tiempo y el costo. En este modelo matemático solo se cuenta con un vehículo, el cual debe realizar todas las visitas a los clientes maximizando la misma ruta. (Sandoya, 2010).

Por otro lado, en el modelo de “PRV” se cuenta con un número determinado de vehículos, los cuales deben atender varios clientes dispersos en la ciudad. En este modelo supone la existencia de una matriz en la que iniciaran y finalizaran los recorridos, se busca lograr como principal objetivo minimizar los costos por medio de la ruta más óptima.

Los modelos matemáticos ayudan a la planeación de rutas, ofreciendo así varias posibilidades, según sea el problema que se desea resolver y el modelo que se desee utilizar. Para la selección del modelo, se

deben considerar ciertos aspectos como las condiciones a las cuales se desea adaptar el modelo, tener claro que es lo que se requiere optimizar o solucionar y que restricciones se pueden presentar. (Ghiani, 2004).

Algoritmos Matemáticos

Existen diferentes tipos de algoritmos para dar solución a problemas de planeación de rutas. Entre los que destacan los heurísticos, los meta-heurísticos y los exactos.

Los algoritmos heurísticos realizan varios ensayos o repeticiones antes de llegar a una solución esperada. Se utilizan más generalmente cuando no existe una solución óptima bajo los parámetros dados (tiempo o espacio, entre otros) o cuando no existe del todo una solución óptima. Mientras tanto los algoritmos meta heurísticos encuentran soluciones aproximadas en un sentido de nivel superior utilizando algoritmos heurísticos ya existentes.

Los algoritmos exactos realizan búsquedas detalladas que consisten en evaluar todas las soluciones disponibles hasta encontrar la mejor. Si no se conoce el valor correspondiente a la mejor solución global entonces no existe manera de comprobar que se ha encontrado en realidad la mejor solución de todas a menos que se examinen todas las que hay (Ortiz, 2010). En la Tabla 3, se muestra la clasificación según el tipo de algoritmo y una breve descripción del mismo.

Algoritmo	Clasificación	Descripción
Colonia de Hormigas	Meta heurística	Este Algoritmo tiene fundamentos en base al comportamiento de las hormigas; consta en que un grupo de hormigas buscan distintos rutas, dejando un rastro de feromona que indica a las demás hormigas las rutas más eficientes, así hasta encontrar la ruta más óptima; el funcionamiento de este algoritmo trabaja de manera similar busca minimizar el número de vehículos y el tiempo de entrega. (De la rosa, et al., 2009)
Genéticos	Meta heurística	Busca y selecciona las soluciones ya propuestas del problema y se trata de mejorarlas, el objetivo de los algoritmos genéticos es combinar dos soluciones y hacerla más eficiente. (Muñoz, et al., 2009)
Búsqueda Tabú	Meta heurística	Genera una memoria en la cual se registran las soluciones más eficientes, y así realiza un recorrido para ir descartando soluciones hasta llegar a la solución correcta. (De la rosa, et al., 2009)
Ahorros de Clarke and Wright	Heurística	Busca la fusión de dos rutas, en una misma que sea más eficiente y así lograr un ahorro en la distancia la distancia que se va recorrer. (Muñoz, et al., 2009)
Ramificación y Acotamiento	Exacto	Este algoritmo consiste en formar ramificaciones, donde las ramas finales tienen todas las soluciones posibles al problema, si en un nodo del árbol no se requiere más ramificaciones es porque ya no es una solución eficiente y se poda. (Muñoz, et al., 2009)
Dijkstra	Heurística	Este algoritmo busca la ruta más corta desde el nodo de origen hacia los demás nodos. (Muñoz, et al., 2009)

Tabla 3. Clasificación y descripción de algoritmos.

Ciertos algoritmos en conjunto con modelos matemáticos son utilizados para la elaboración de software, un ejemplo de uno de ellos es el Arc GIS, es una plataforma que sirve para recopilar, organizar, administrar, analizar información geográfica, en la cual una de las herramientas de planificación de rutas llamada "network Analyst" utiliza el algoritmo de Dijkstra, el cual busca la trayectoria más corta entre el nodo de origen y los demás nodos.

La utilización de algoritmos en la planeación de rutas óptimas o cercanas a las óptimas, puede llegar a obtener ahorros importantes de costos y tiempo que van desde el 5% hasta el 20% (Diaz, 2009).

Metodología

La búsqueda fue realizada en la base de datos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, (UACJ) en conjunto con la base de datos de EBSCOHOST Y ASCE además de fuentes en línea, permitió recabar los conocimientos necesarios, mismos que se plasmaron en este artículo.

Conclusión

Para optimizar un sistema de transporte, se debe tomar en cuenta los aspectos que se quieren analizar y optimizar. Dependiendo de los factores que se deseen mejorar, serán los aspectos que se tomarán en cuenta y los resultados variarán de acuerdo a estos aspectos. La utilización de herramientas tales como modelos matemáticos, algoritmos, GPS y ITS, para la búsqueda de soluciones eficientes para la planeación de rutas ha sido en gran medida un avance muy importante, ya que en conjunción con diferentes aplicaciones se han desarrollado programas (software) para resolver problemas de ruteo lo cual hace muchas más eficiente y preciso los cálculos para la optimización de rutas. Si la meta es diseñar rutas cortas y rápidas se recomienda utilizar Sistemas de Información Geográfica para un mejor entendimiento del sistema de transporte. ArcGIS es un software que puede ayudar a la optimización de rutas que va desde la revisión de consumo de combustible y el ahorro de tiempo.

Se pueden asignar terminales de parada ubicando a los usuarios del servicio de manera geográfica para evitar una deficiencia, generando una ruta que tenga una demanda adecuada de usuarios para que su capacidad se encuentre en niveles óptimos.

Referencias

Acha Daza Jorge, Espinosa Rescala Juan Carlos. (2004) Hacia una Arquitectura Nacional Para los Sistemas Inteligentes de Transporte. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 251, ISSN 0188–7297 Sanfandila, Qro.

Cueva Montero Elizabeth Alejandra. (2011). prototipo de sistema de administracion y planificacion automaticas de rutas optimas para expresos escolares de instituciones educativas. Guayaquil, Ecuador. Escuela politecnia Superior del litoral.

De la Rosa González Manuel, Urbano Martínez Norma, González García Venancio, Eleuterio Alejo Roberto. "Estudio de Tres Algoritmos Heurísticos para Resolver un Problema de Distribución con Ventanas de Tiempo: Sistema por Colonia de Hormigas, Búsqueda Tabú y Heurístico Constructivo de una Ruta". 2009.

Diaz Parra Ocotlan, Cruz Chavez Marco Antonio, Dmaris Galvan Montiel, Crispin Zavala Diaz. (2006).Tecnicas de modelacion de sistemas blandos aplicados al sistema transporte escolar. Cuernava Morelos, México. Editorial ACD 2006, PP 47-59, ISBN: 968-878-273-4.

Gianpaolo Ghiani, Laporte Gilbert, Roberto Musmanno. "Introduction to Logistics Systems Planning and Control". England: John Wiley & Sons Ltd. 2004.

Gonzalez romero Antonio, Arcos Santioago Moisés. (2012). SIG Libre para la Gestión de Rutas Escolares.Sevilla.

Instituto Mexicano del Transporte. (1992). Capacidad de Transporte Publico en Autobus Interurbanos y Suburbanos.Queretaro,Qro. Publicacion Tecnica No. 15 ISSN 0188-7297.

Instituto Municipal de Planeación. (2010). Diagnostico final de transporte escolar en la Cuidad de Leon Guanajuato.

Jie Li, Wei Wang, Xuewu Chen, Van Zuylen Van Henk, Hao Wang. (2009). Optimal Scheduling for Public Transport Corridor.China: ASCE.

Khader Nayati Mohammed Abdul. (2008). School Bus Routing and Scheduling using GIS.University of Glvae, Departament of Technology and Built Environment

Kumar N, Kumar M., Denis D.M.*, Srivastava S. K., Srivastva O.S. (2014). Geospatial School Bus Routing. The International Journal of Engineering and Science (IJES) Vol. 3, pp 80-84, ISSN: 2319 – 1813.

Ladeira Maria, Michel Fernando, Senna Luis. (2011). Public Transport Monitoring and Control: The Case of Porto Alegre, Brasil. Brasil: p. 275-281. ICTIS

Liu Chao-Lin. (2002). Best-Path Planning for Public Transportation Systems. Singapur: Conference On Intelligent Transportation Systems

Molina Mario. (2012).Evaluación de beneficios ambientales y de movilidad por la aplicación del Programa de Transporte Escolar en la Ciudad de México.

Moreno Arboleda Francisco Javier ,Arango Isaza Fernando, Echeverri Arias Jaime Alberto. (2010). Trayectorias con una ruta predefinida en una bodega dedatos:un caso de estudio sobre transporte publico. Revista Ingenerias Universidad de Medallin, Vol. 9, No. 16, pp 113-121, ISSN:1692-3324.

Muñoz Bermeo Elver A., Sotero Calderón Jaime Hernan, "Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte". El Hombre y la Maquina, (32), 52, 67. 2009.

Rodríguez Ortiz Carlos, "Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores". Proyecto fin de carrera. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España. 2010.

Rojas, J. S. (2010). Aplicación de un Modelo de Optimización en la Planeación de Rutas de los Buses Escolares del Colegio Liceo de Cervantes Norte. Facultad de Ingeniera

Departamento de procesos Productivos Bogotá.

Sandoya Fernando (2010). "Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)". Decimocuartas Jornadas en Estadística e informática. Guayaquil, Ecuador.

Segui Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guiata Mas, F.Escalas, F., Bauza, A. (2002). SE. España: p. 58-76. ISSN: 1578 México 5157.

Spada Michela,Bierlaire Michel,Liebling Thomas. (2003). Decision-aid Methodology for the School Bus. Swiss Transport Research Conference

Stojanovski Todor. (2013). Public Transportation Systems for Urban Planners and Designers: The Urban Morphology of Public Transportation Systems. Estocolmo, Suecia: Royal Institute of Technology, Traffic and Logistics.