

Propuesta de diseño de rutas auxiliares para el Sistema de Transporte Masivo Transmilenio en Bogotá para la optimización de la capacidad instalada en el sistema al año 2022, usando el algoritmo de Dijkstra

Camilo Andrés Fierro Fierro, Cristian Camilo Vargas Morales,
Fabián Leandro López Gómez, José Ignacio Suárez Montiel, Isaac Zarate Reyes
Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, Colombia

cfierro@unal.edu.co
crvargasm@unal.edu.co
flopezgo@unal.edu.co
josuarezm@unal.edu.co
izarater@unal.edu.co

Abstract

The purpose of this paper is to take a tour of the problems that arise today with the takeover and critical state of the Transmilenio transport system in certain areas and aspects. Corresponding to this, an analysis of the same with graphs is proposed in order to find an optimization alternative for the established route system.

Una vez lo logramos, como se mencionó anteriormente, podremos aplicar el algoritmo Dijkstra y ver si su implementación ayuda a la resolución del problema planteado.

II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

I. INTRODUCCIÓN

El uso de algoritmos se presenta en una amplia gama de desarrollos científicos, tecnológicos e ingenieriles, desde hace miles de años con Euclides y el pensamiento matemático, pasando por las primeras calculadoras, hasta llegar a las ramas no sólo de Ciencia de Datos y Ciencias de la Computación, sino, con el furor de la cuarta revolución industrial, prácticamente toda actividad humana en la industria, la academia y más. Ahora, los algoritmos tienen un impacto importante en la sociedad y nuestra cotidianidad; realizar una operación financiera en nuestros smartphones, encontrar pareja, un donante, entretenimiento, y más allá, control de masas global y a nivel prácticamente omnipresente.

Para el presente desarrollo podríamos decir que abarcamos, antes que los algoritmos, la disciplina de la investigación de operaciones, por medio de la cuál se busca analizar una situación, muchas veces física, matemática que puede ser modelada a través de distintas herramientas analíticas para alcanzar un fin. En este caso, la optimización de rutas del sistema de Transmilenio, la cuál se busca alcanzar específicamente con el algoritmo Dijkstra.

Antes de ahondar en el problema y su tratamiento mediante algoritmos, podemos revisarlo rápidamente. La finalidad de este proyecto es abstraer la problemática que actualmente presenta el sistema de transporte Transmilenio y su manera de movilizarse por la ciudad, para llevarlo a una definición más simple y la cual podamos manejar a manera de grafo para estudiarla y tratar de resolverla.

Actualmente, la utilización del transporte masivo en la ciudad, por medio del sistema integrado de Transmilenio, ha venido en aumento, tal y como lo demuestran las cifras del DANE para el primer trimestre de 2022 [1], contando con un parque automotor en servicio de 9.516 vehículos en promedio mensual, con un incremento de 10,0% con respecto al mismo trimestre de 2021.

De igual forma, transportó 308.511 pasajeros, correspondiente al 90,6% de los usuarios en el área metropolitana; comparado con el mismo trimestre del año anterior presentó un incremento de 62,0% en el número de pasajeros transportados por el sistema. El SITM zonal y complementario registró el mayor incremento en el número de pasajeros transportados (95,1%).

Con base en lo enunciado, se evidencia la necesidad de optimizar los viajes troncales que, en correlación con su cantidad de buses, permita así aprovechar su utilización en pro de rutas más beneficiosas para los pasajeros. Y, por lo tanto, descongestionar el sistema en sus estaciones más críticas, como se resaltan en los documentos de auditoría del sistema ya consultados [2].

III. OBJETIVOS

- Diseñar un algoritmo para la optimización de viajes por las rutas del sistema integrado de transporte.
- Implementar y aplicar de manera práctica lo aprendido a lo largo del semestre para la resolución de problemas reales utilizando las

herramientas de los algoritmos.

- Contrastar los datos de las rutas más convenientes con herramientas externas de software.

IV. ESTADO DEL ARTE

El Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) dentro de su marco de trabajo que comprende las acciones para la articulación, vinculación y operación integrada de los diferentes modos de transporte público, ha planteado la implementación de servicios complementarios [6] que movilizaban pasajeros desde y hacia zonas aledañas a las estaciones de TransMilenio, similar al servicio alimentador. Operaban por el carril mixto y se detenían en todos los paraderos por donde pasaba la ruta, siempre y cuando un usuario así lo deseaba, ya sea para abordar o descender del bus. Se integró con el servicio troncal mediante paraderos en estaciones sencillas, y mediante plataformas en estaciones intermedias y portales. No obstante, este modelo de operación, similar a un servicio troncal, no ha sido rentable. De la cual se toman bases, pero es diferente a la solución que plantea el equipo de trabajo, en la siguiente sección.

Por otra parte, Marlon Jasid Rodríguez Loaiza, con su tesis de maestría de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, presenta un modelo para reducir tiempos de transferencia en portales de un sistema de transporte público. En su proceso de investigación de operación plantea el uso de dos funciones objetivo, una de ellas reduciría el tiempo de transferencia total del usuario, mientras que la segunda maximizaría el mínimo intervalo en orden de proporcionar una mejor distribución. Realiza una cadena de Markov para tener en cuenta el tiempo de espera en los casos que no se da la ocupación en un primer caso. El algoritmo usado es el Algoritmo Genético NSGA II, y realizando la simulación en la troncal de la 26 con el sistema Transmilenio alcanza una reducción del 16% del tiempo de transferencia total [7]. Si bien el proceso de análisis está relacionado, no se toma este modelo como base debido a que se encuentra desarrollado con un enfoque general tanto para buses como para trenes, y específicamente para Transmilenio.

V. SOLUCIÓN PROPUESTA

Debido a lo anterior se requiere hacer un análisis de posibles alternativas a las rutas que actualmente tiene en funcionamiento el sistema, por lo cual como primera actividad tenemos la realización de dos grafos ambos basados en el mapa actual del sistema; el primer grafo tendría las estaciones de Transmilenio como nodos, y las troncales, o calzadas exclusivas, como aristas; el segundo grafo también tendría como nodos las estaciones del sistema, pero esta vez tendría como aristas las principales calles de la ciudad de Bogotá; lo anterior con el fin de comparar las rutas que el sistema tiene actualmente, y las potenciales rutas que podrían ayudar a la optimización de las mismas.

Se plantea entonces, como alternativa al modelo que actualmente se encuentra en funcionamiento en la capital, la conformación de una flota de buses tipo padrón dual (ver imagen 5.1) que se dediquen a la exclusiva comunicación entre estaciones a través de las vías públicas de la ciudad, es decir, buses cuyo recorrido

consistiría en ir de estación a estación por medio de vías particulares en vez de ir por la calzada exclusiva que la Secretaría de Tránsito de Bogotá destina al sistema masivo de la ciudad.

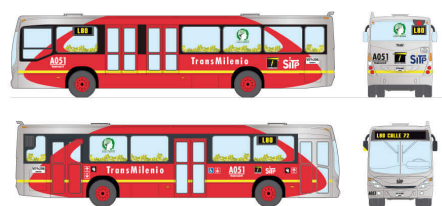


Imagen 5.1 - Bus Transmilenio Tipo Padrón Dual

Por último, tras la simulación de la solución propuesta, se realizarán ajustes y se va a monitorear el comportamiento de la misma en sus estaciones más críticas, esto debido a la posibilidad de que genere complicaciones de movilidad en la ciudad, o directamente se congestionen otros puntos clave del sistema integrado de transporte.

VI. ALGORITMO A IMPLEMENTAR

El aplicativo tiene como base el algoritmo de Dijkstra, el cual se conoce también como el “algoritmo de los caminos cortos”, esto ya que, dado un vértice o nodo (estación) origen y una serie de pesos en las aristas (avenidas o troncales), se podrá determinar el camino más corto de entre los nodos subsiguientes. El algoritmo no garantiza que el camino total recorrido sea el de menor costo o el más eficiente, por lo cual se deberá correr la simulación desde distintos nodos para minimizar el error.

Esto con el fin de localizar los puntos de la ciudad que podrían equipararse a otros trayectos pero reduciendo la congestión de las estaciones, pues muchas de las rutas tienen paradas que no son útiles la mayoría del tiempo. Usando dos grafos, se tiene pensado implementar el algoritmo de Dijkstra en ambos casos, para poder obtener los resultados más cortos en cuanto a recorrido y distancia, con el fin de comparar los valores obtenidos para ajustarlos a lo que resulte más conveniente dependiendo el caso.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN

Para efectos del diseño del algoritmo en cuestión y las pruebas correspondientes se usarán datos e información de las siguientes fuentes:

A. Datos sobre la oferta y demanda del SITM/SITP, y su evolución a lo largo de los últimos 6 años.

<https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/149180/esta-disticas-de-oferta-y-demanda-del-sistema-integrado-de-transport-e-publico-sitp/>

B. Datos sobre la composición del sistema SITM, sus componentes y las validaciones de las tarjetas Tullave en el sistema.

<https://datosabiertos-transmilenio.hub.arcgis.com/>

C. Datos sobre las cifras de evasión de pagos del SITM y las principales razones de este fenómeno.

<https://concejodebogota.gov.co/segun-estudio-de-la-universidad-nacional-cada-semana-se-cuela-el-15/cbogota/2019-04-11/124746.php>

Imagen 8.6 - Grafo de Modelo Tradicional geo-ordenado

A partir de aquí realizamos varias simulaciones que nos permitieran encontrar la ruta más corta entre dos puntos aleatorios del sistema (ver imagen 8.7), por medio del algoritmo de Dijkstra, obteniendo las estaciones por las que pasa el recorrido, las aristas o troncales transitadas, y finalmente la distancia recorrida (suma aritmética de los pesos de las aristas viables que calcula el algoritmo).

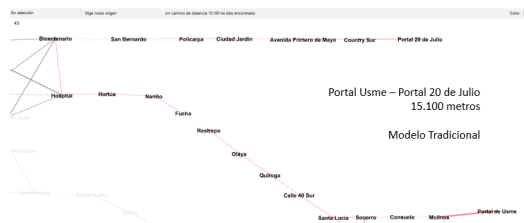


Imagen 8.7 - Ruta más corta entre Portal Usme y Portal 20 de Julio
Modelo Tradicional

El procedimiento se repitió con el Modelo propuesto tanto en el entorno de Colab como en Gephi (ver imagen 8.8).

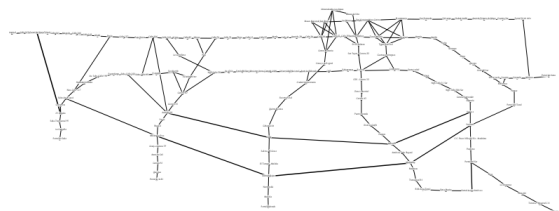


Imagen 8.8 - Grafo de Modelo Propuesto geo-ordenado

A su vez se realizaron simulaciones para obtener el camino más corto entre el mismo conjunto de pares de nodos (estaciones) con las cuales se hicieron las simulaciones en el modelo tradicional.

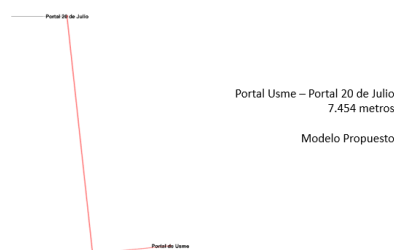


Imagen 8.9 - Ruta más corta entre Portal Usme y Portal 20 de Julio
Modelo Propuesto

A continuación se presenta la tabla comparativa de las distancias concernientes al camino más corto de un conjunto de pares de estaciones pertenecientes a cada modelo.

Ruta	Modelo Tradicional	Modelo Propuesto
Portal Usme Portal 20 de Julio	15.100 metros	7.454 metros
Portal del Sur Portal Américas	20.807 metros	5.937 metros

Portal de Suba Terminal	23.089 metros	11.025 metros
Portal Tunal Banderas	17.309 metros	9.536 metros
Portal Eldorado Portal del Norte	22.916 metros	21.738 metros
Portal de la 80 Banderas	20.900 metros	16.038 metros

Haciendo una pequeña comparativa se puede ver que en solo estas 6 rutas el sistema se está ahorrando 48,3 kms de recorrido. Para hacer una comparativa, es la distancia que se requiere para llegar en carro desde la localidad de Usme en Bogotá hasta el municipio de La Calera en Cundinamarca.

IX. CONCLUSIONES

El sistema, al día de la publicación del documento, presenta una sobredemanda de pasajeros a lo largo de su operación por lo cual se hace necesario optimizar cada detalle de su funcionamiento para así sacar el máximo provecho del sistema y reducir las falencias que presenta el modelo al intentar dar cobertura al transporte público masivo de la capital.

El actual escrito presenta una herramienta de modelado, basada en la teoría de grafos, que nos brinda una visión más general del sistema al hacer uso de principios de computación para calcular las mejores relaciones entre los nodos del sistema; tanto así, que se presenta una alternativa de conectividad entre las estaciones para mitigar el impacto de los recorridos que actualmente llevan a cabo los buses del sistema.

Si bien, existen complicaciones que se presentan a la hora de la implementación de la solución como lo son el cambio de funcionamiento de las rutas actuales o la aceptación de la aplicación, puesto que se habla de entes gubernamentales y entidades que necesitan un proceso debido de la ley, no se puede despreciar o deslegitimar la solución que se plantea, e invitamos a dichos sectores a abrir el debate correspondiente.

Finalmente el actual análisis nos plantea el cómo a partir de la aplicación del algoritmo de Dijkstra se consiguió el reconocimiento de rutas alternativas que logran conectar dos estaciones sin perder tiempo ni recursos en llegar a estaciones que no son necesarias para el trayecto. Esto nos permite reformular la abstracción anteriormente realizada sobre las estaciones para conseguir una aproximación de la aplicación en el caso del mundo real.

REFERENCIAS

[1] DANE. 2022. Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros (ETUP) Primer trimestre de 2022. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ttransporte/bol_transp_Itrim22.pdf

- [2] DANE. 2022.
- [3] Brans, J. P., Engelen, G., & Hubert, L. (1981). Accessibility to a road network: Definitions and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 32(8), 653-673. doi:10.1057/jors.1981.133
- [4] Louati, A., Son, L. H., & Chabchoub, H. (2019). Smart routing for municipal solid waste collection: A heuristic approach. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(5), 1865-1884. doi:10.1007/s12652-018-0778-3
- [5] Moise, M., Zingale, M., & Condea, A. I. (2010). Software solution for monitoring street traffic and generating optimum routes using graph theory algorithms. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 5(5), 813-818. doi:10.15837/ijccc.2010.5.2241
- [6] Wikipedia 2022. Sistema Integrado de Transporte de Bogotá. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Integrado_de_Transporte_de_Bogot%C3%A1
- [7] Rodríguez, Marlon (2019). Modelo para reducir tiempos de transferencia en portales de un sistema de transporte público BRT. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77310/22348562019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] Tirachini, A. (2013). Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 239-256.
- [9] E. Tirachini, A., Hensher, D. A., & Rose, J. M. (2013). Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36-52.