

Diseño de flota y recorridos para un servicio de buses de acercamiento de trabajadores

Cristián E. Cortés^{1,2}, Pablo A. Rey³, Francisco Vilches¹, and Jaime Miranda⁴

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile,

² Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI), Santiago, Chile,

³ Departamento de Industria e Instituto Universitario de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Universidad tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile,

⁴ Departamento de Control de Gestión y Sistemas de Información, Universidad de Chile, Santiago, Chile,

Resumen En este trabajo proponemos una metodología para diseñar un servicio de ómnibus contratado por una empresa, destinado a transportar empleados entre sus domicilios y la planta de producción al inicio y final de los turnos laborales. La metodología consta de dos etapas: (1) construcción de un conjunto inicial de rutas y (2) optimización mediante un modelo de programación lineal entera para seleccionar rutas, paradas y asignar trabajadores a los recorridos. Aplicamos este enfoque a un caso de estudio en una fábrica con más de 1000 empleados (800 con turnos rotativos y 200 con turnos fijos). en una ciudad de más de 5 millones de habitantes. ómnibus con un tren urbano (en construcción, operativo parcialmente en 2027). Los resultados indican que nuestra metodología reduce los costos totales en más de un 10 %, disminuyendo la cantidad y capacidad de vehículos necesarios, sin incrementar significativamente las distancias a caminar ni los tiempos de viaje para los trabajadores.

Keywords: Transporte de pasajeros, diseño de rutas, bienestar de los trabajadores

Abstract. We propose a two-stage methodology for designing a bus service to transport employees of a large factory between their homes and the production plant at the beginning and end of work shifts. The approach combines initial route generation with an integer linear programming model to optimize route selection, stop locations, and worker assignments. The method was tested in a case study involving a factory with over 1000 workers (800 on rotating shifts and 200 on fixed schedules). in a city of more than 5 million inhabitants. with an urban rail line (under construction, with partial operation expected by 2027). Our solution reduces total costs by over 10% by minimizing the number and capacity of vehicles required, without significantly increasing walking distances or travel times for workers.

Keywords: Passenger transport, route design, workers' well-being

1. Introducción

Muchas empresas ofrecen servicios de transporte a sus trabajadores, desde diferentes lugares cercanos a sus residencias hasta las instalaciones de la empresa y viceversa. Estos servicios deben contemplar el cumplimiento de los turnos de trabajo, incorporando también las restricciones inherentes a un problema de transporte de pasajeros en ómnibus.

El problema de diseñar rutas y horarios para sistemas de transporte masivo es un problema clásico y ampliamente estudiado en el contexto del transporte público (Desaulniers & Hickman, 2007; Durán-Micco & Vansteenwegen, 2022; Farahani y col., 2013; Guihaire & Hao, 2008; Mauttone & Urquhart, 2009). Más recientemente, también han surgido trabajos relacionados con problemas asociados a lo que actualmente se denomina servicios de ómnibus personalizados (He y col., 2024; Tong y col., 2017).

En este trabajo proponemos una metodología utilizando un modelo de programación entera “basado en rutas” para determinar el número de vehículos, sus capacidades y las rutas correspondientes con sus paradas y horarios.

El objetivo principal es minimizar el costo total del servicio compuesto por un costo fijo por ómnibus más costos variables por los kilómetros recorridos, atendiendo a ciertos estándares de “calidad de vida” de los trabajadores.

En el caso de la empresa que motiva este estudio, trabajan más de 800 personas en la producción misma y casi 200 empleados en la administración. La flota de transporte actual está compuesta por 19 vehículos de diferentes capacidades. Dos de ellos son utilizados por empleados administrativos que trabajan de lunes a viernes, de 9h a 18h. Los 17 ómnibus restantes movilizan al personal que trabaja en la producción en turnos rotativos. Esta parte del sistema es la que buscamos optimizar.

Se analizan dos escenarios operacionales: el primer escenario está asociado a la optimización del escenario operacional actual, que considera el transporte de operadores sin acceso directo de transporte público a la planta, y un segundo escenario a mediano plazo, que evalúa alternativas de transporte de los operadores a la planta considerando la instalación cercana de una estación de tren urbano que está siendo construida en la ciudad.

2. Propuesta de solución

Para resolver el problema, se propone un algoritmo de dos etapas: primero generamos un *pool* de rutas; luego, utilizando un modelo de optimización, elegimos las rutas y asignamos los pasajeros.

Generación de rutas La primera etapa de la construcción de las rutas se realizó perturbando las rutas actualmente utilizadas por la empresa. Para ello, se definieron “franjas” de determinado ancho alrededor de las rutas actuales y se enumeraron rutas con los mismos orígenes y destinos que las originales que

no salieron de las franjas. Las modificaciones se limitaron al uso únicamente de avenidas y “vías principales”.

Las rutas obtenidas fueron post-procesadas considerando las direcciones de los trabajadores para eliminar rutas dominadas y hacer pequeñas mejoras de eficiencia en cada ruta. Finalmente, el conjunto de rutas construido se amplía añadiendo nuevas rutas obtenidas a partir de combinaciones de segmentos de dos rutas.

Selección de rutas y asignación de pasajeros El *pool* de rutas construido en la primera etapa alimenta un modelo de programación lineal entera que selecciona un conjunto de rutas, las capacidades de los vehículos que deben ejecutarlas y asigna los trabajadores a las paradas más cercanas de las rutas correspondientes.

Las principales variables del modelo son:

- x_{ij} : Variable binaria que indica si el trabajador i usa la parada j .
- y_{jr} : Variable binaria que indica si la parada j está habilitada para la ruta r .
- w_{br} : Variable binaria que indica si un ómnibus de tipo b ejecuta la ruta r .
- z_{ir} : Variable binaria que indica si el trabajador i usa la ruta r .

y considera restricciones modelando condiciones como:

- Asignación de operadores a rutas y paradas.
- Número máximo de paradas por ruta.
- Capacidades de las paradas.
- Asignación de vehículos a rutas (capacidades).
- Ocupación mínima de los vehículos.

La función objetivo considera los costos fijos y variables de los vehículos y también penalizaciones por los operadores que deben “caminar mucho” hasta su parada o pasar “mucho tiempo” en el ómnibus.

3. Resultados computacionales

La operación actual se toma como punto de comparación y se analizan dos escenarios alternativos: un escenario “actual optimizado” y un escenario “futuro” que incluye el tren urbano. En este escenario, los trabajadores no son llevados a la fábrica, sino a una estación ferroviaria y desde allí llegan a la fábrica en el tren. Para los experimentos se consideraron los datos de junio de 2023.

La Tabla 1 resume los costos del sistema en cada caso, extrapolados para un año. Para el escenario futuro, también se considera el costo de los pasajes de tren de los trabajadores que deberán utilizarlo.

En esta comparación, podemos percibir que en ambas situaciones propuestas se consigue una reducción de costos. En términos de costos fijos, ambos escenarios propuestos presentan un orden de magnitud similar, sin embargo, se consigue una reducción aún mayor en términos de costos variables para el escenario futuro porque las rutas utilizadas son más cortas. Este ahorro es compensado por el costo adicional de los pasajes.

Escenario	Vehículos	C. fijo	C. Var.	C. Pasajes	Num. Pas.	C. Total	Dif. escenario actual
Actual	17	70,00	30,00	0	0	100,00	
Optimizado	16	51,36	24,32	0	0	75,67	24,33 %
Futuro	16	50,97	20,96	9,91	535	81,84	18,16 %

Tabla 1. Resumen de comparación de costos. Base total caso actual = 100.

4. Conclusiones

En el contexto del caso que motiva este estudio, se observa que las rutas actuales, en general, son adecuadas. Sin embargo, existen oportunidades de mejora, especialmente en la elección de rutas para las personas y en la posibilidad de cambiar a ómnibus de menor capacidad en rutas con baja ocupación.

En el primer escenario, la reducción del tamaño de los ómnibus y la eliminación de una ruta producen alteraciones notables en los costos fijos, en comparación con la disminución de los kilómetros recorridos. Los resultados del modelo sugieren que, si el objetivo es reducir costos, es preferible tener un número menor de rutas de la capacidad adecuada.

Por otro lado, en el escenario “futuro”, se presenta una solución que además de ofrecer ventajas económicas, ya que la empresa cubre el costo del pasaje, puede mejorar la relación con los trabajadores. Además, los tiempos de espera y de desplazamiento se reducen, mejorando la calidad de vida de los trabajadores.

Referencias

- Desaulniers, G. & Hickman, M. D. (2007). Public transit. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 14, 69-127.
- Durán-Micco, J. & Vansteenwegen, P. (2022). A survey on the transit network design and frequency setting problem. *Public Transport*, 14(1), 155-190.
- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y. & Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 281-302.
- Guihaire, V. & Hao, J.-K. (2008). Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10), 1251-1273.
- He, X., Yang, Z., Fan, T., Gao, J., Zhen, L. & Lyu, J. (2024). Branch and price algorithm for route optimization on customized bus service. *Annals of Operations Research*, 335(1), 205-236.
- Mauttone, A. & Urquhart, M. E. (2009). A route set construction algorithm for the transit network design problem. *Computers & Operations Research*, 36(8), 2440-2449.

Tong, L. C., Zhou, L., Liu, J. & Zhou, X. (2017). Customized bus service design for jointly optimizing passenger-to-vehicle assignment and vehicle routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 85, 451-475.