

Capítulo 1.

Introducción.

1.1. Introducción a la planificación del transporte:

El cambio en los modelos socioeconómicos y medioambientales de las grandes metrópolis está obligando a la realización de estudios más exhaustivos sobre sus redes de transporte. En la actualidad, el nivel de vida económico ha aumentado, por lo que ha crecido de forma exponencial la demanda de transportes públicos, surgiendo la necesidad de crear rutas y sistemas de tránsito cada vez más atractivos.

Resulta indiscutible establecer la relación directa entre el crecimiento de las áreas metropolitanas, con el desarrollo de los sistemas de transportes, ya que éstos deben establecer una estructura perfectamente vertebrada para la actividad económica y social de la ciudad. Tanto desde el punto de vista social, industrial y empresarial, una red de transporte perfectamente sincronizada proporciona un mejor desarrollo del motor de la metrópolis, quedando demostrado que aquellas zonas en las que se desarrolla un buen transporte público, son mucho más prósperas económicamente y dan lugar a enclaves empresariales más avanzados. Por otro lado, en cualquier situación de emergencia el transporte público resulta un medio seguro y útil.

Por otro lado, los vehículos de transporte en entornos urbanos son una fuente de contaminación atmosférica, tanto a nivel local por la emisión de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno o materia en partículas, como a nivel global por la emisión de dióxido de carbono. También tienen otros efectos negativos como el consumo energético, el ruido, la congestión o el consumo de espacio. Un transporte público bien diseñado y que reduzca los desplazamientos de vehículos privados, puede ayudar a la reducción de todos estos efectos negativos al disminuir las emisiones por kilómetro y pasajero.

En la mayoría de las ciudades existen graves problemas de tráfico, de forma que dar un mejor servicio en los transportes públicos no siempre tiene que estar ligado con aumentar las infraestructuras físicas.

El objetivo principal de la planificación del transporte reside en la utilización efectiva de los recursos, teniendo en cuenta que siempre se debe satisfacer la demanda. Por lo tanto, cuando se hable de planificación del transporte, nos estaremos refiriendo a una mejora del diseño y la planificación de las líneas de transporte, reflejándose en una mejora del sistema de transporte, tanto de carácter público como de carácter privado, y prolongando la vida de las infraestructuras existentes a través de un uso más eficiente.

Una vez establecida la necesidad de potenciación de los sistemas de transporte público, será vital realizar una utilización efectiva de los recursos existentes. Para poder realizar una implantación eficiente de un sistema de transporte público en una ciudad, área metropolitana, escenario urbano o interurbano, se necesitará imponer una serie de objetivos y limitaciones de operación:

- Maximizar el beneficio de las empresas concesionarias. Concretándose en una minimización de costes, atendiendo siempre a las siguientes restricciones:
 - a) El tamaño de la flota, es decir, el número de vehículos disponibles es limitado; implicando que las necesidades de los viajeros no se pueden satisfacer solo a base de aumentar el número de vehículos.
 - b) El número de operarios del transporte público y el gasto de personal están limitados. La gestión del sistema ha de tener en cuenta que ningún operario trabaje más de un número de horas consecutivas.
 - c) La longitud del recorrido de cada línea tiene que estar limitado. Esto está íntimamente relacionado con que las líneas de enorme longitud requieren muchos vehículos para cubrir un trayecto con una determinada frecuencia.

- Maximizar la calidad de servicio que se le da a los viajeros. Esta idea tiene una relación directa con la minimización de los tiempos de viaje y los tiempos de espera que invierte el viajero en su trayecto.

La planificación del transporte público se encarga del diseño, mejora y estudio de la movilidad. La dificultad de abordar estos objetivos de forma conjunta obliga a dividir dicho proceso de planificación en diferentes etapas que se realizarán de forma secuencial:

- Diseño y optimización de rutas
- Determinación de frecuencias y horarios
- Asignación de la flota de autobuses a líneas
- Asignación de conductores a trabajos

1.1.1. Diseño y optimización de rutas.

En esta fase se realiza un estudio de la posibilidad de incorporar nuevas líneas, o bien mejorar las existentes. Se busca la optimización de las rutas existentes, encontrar nuevas rutas y unas buenas estrategias de operación.

Se desarrolla además la construcción de una red global, siendo ésta la parte más compleja de la planificación del transporte. Esta etapa será previa a la determinación de las frecuencias y horarios de las distintas líneas de transportes.

Para poder realizar el diseño de redes de manera correcta, se deberá conocer la demanda, que vendrá reflejada por el número de viajes que desean realizar los habitantes de una zona o ciudad; por otro lado, se tendrá como dato la oferta, es decir el viario urbano, y por último cualquier criterio sobre el diseño. Los resultados que se obtendrán en esta primera fase, serán los de partida para la fase siguiente.

1.1.2. Determinación de frecuencias y horarios.

Esta etapa se encarga del cálculo de las frecuencias de paso y de los horarios de cada línea de transporte, con el objetivo de satisfacer la demanda de viajeros en las paradas y buscando la máxima sincronización entre las distintas líneas de transporte en las paradas comunes. De hecho esta segunda fase, podemos subdividirla en otras dos:

- Determinación de las frecuencias de paso de las líneas.
- Cálculo de los tiempos de salida (horarios de paso).

Buscando en todo momento la sincronización entre las líneas, para minimizar los tiempos de espera de los pasajeros, se quiere llegar a la obtención de las frecuencias de paso, horarios de salida, y horarios de llegada.

Para poder manejar resultados en esta segunda fase, necesitamos unos datos de entrada, tales como la demanda de pasajeros desagregadas por franjas horarias y por paradas, así como la política de servicio. Con estos datos de entrada, se da lugar a resultados como frecuencia de paso por paradas en cada franja horaria, junto con la sincronización de los horarios de salida y llegada de vehículos en las paradas comunes.

Para cada una de las líneas de transporte, será necesario calcular los horarios para cada día y cada franja horaria. Por ello, es necesario fijar previamente los tipos de días (laborable, festivo, etc.) y los tipos de franjas horarias (punta, valle, etc.), pues cada uno de ellos tendría una demanda de viajes diferente.

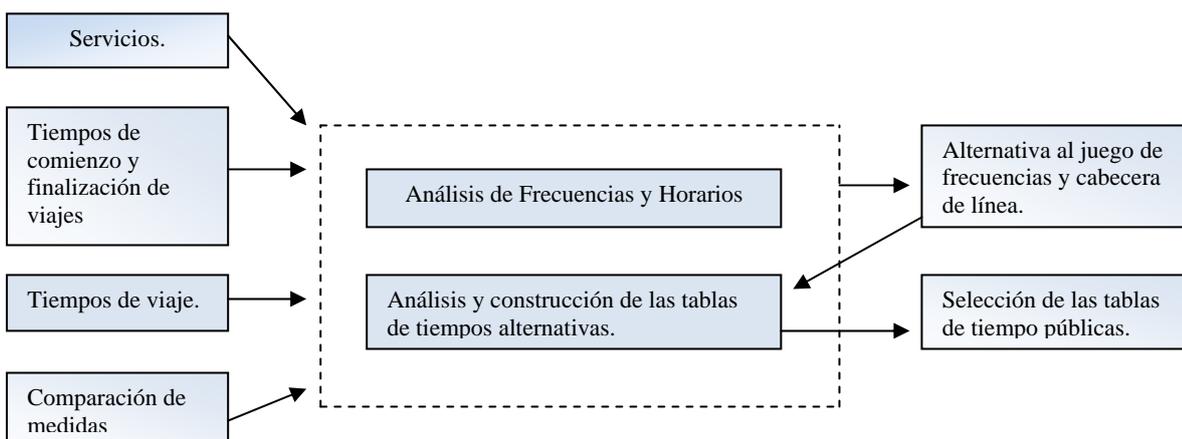


Figura 1.1. Esquema de entradas y salidas para la obtención de la tabla de tiempos.

1.1.3. Asignación de la flota de autobuses a líneas.

Una vez que se calculen las frecuencias y horarios, se pasa a asignar la flota disponible a las líneas de transporte calculadas. Para poder realizar una asignación de la flota, es necesario conocer la programación de vehículos, y por tanto, tener una idea de los calendarios de mantenimiento y reparaciones en curso, así como descansos y restricciones que impongan los operadores. Con esta fase se logra la asignación de cada vehículo a una línea de transporte, indicando la hora de recogida del depósito, la línea a la que se asigna, los horarios de salida y llegada en cabecera de la línea y la hora de entrega en depósito. Todo este trayecto de un vehículo se denomina Expedición.

1.1.4. Asignación de conductores a trabajos.

Una expedición puede ser asignada a un único conductor si su duración está dentro de una jornada de trabajo, pero no suele ser habitual. Por tanto, para la asignación de los conductores a las jornadas de trabajo, es necesario primero dividir las expediciones y agrupar trozos de las mismas en Jornadas de trabajo que le correspondería realizar a un único conductor. Este procedimiento se denomina “Crew Scheduling”.

Las expediciones se suelen dividir en varios viajes a partir de unos puntos de relevo o paradas donde se puede realizar el cambio de conductor. Una jornada de trabajo pues es el conjunto de viajes consecutivos que realiza un mismo conductor. Para el cálculo de las jornadas de trabajo hay que considerar las condiciones de trabajo de los conductores (descansos, horas de trabajo, etc.).

El problema de calcular el menor número de jornadas de trabajo que cumpla las condiciones del trabajador y cubra las expediciones de cada vehículo calculadas en la fase anterior, es un problema de programación matemática complejo y ampliamente estudiado.

Finalmente, y como último paso, se asignan los conductores concretos a cada una de las jornadas calculadas anteriormente. Este procedimiento se conoce como

“Rostering”. Para ello, intervienen muchos factores asociados a la propia empresa: periodos de descanso, días libres, cambios de turno, número total de horas trabajadas, etc.

En la siguiente tabla se resumen los datos de entrada y salida de cada fase del proceso de planificación del transporte.

Fase	Entradas	Actividad	Salidas
1	Demanda	Diseño Redes	Nuevas Rutas
	Oferta		Optimización
	Medidas de Servicio		Estrategias de Operación
2	Vehículos Disponibles	Establecer frecuencias y horarios	Frecuencia de Paso
	Política de Servicio		Horarios de Salida
	Demanda Horaria		Horarios de Llegada
3	Mantenimiento y Reparación	Programación de Vehículos	Asignación de Vehículos a Líneas
	Descansos		
	Restricciones		
4	Estructura de Costes	Programación de Conductores	Asignación de Conductores a Trabajos
	Contratos de Trabajo		
	Convenios de Trabajo		

Figura 1.2. Etapas de la Planificación del Transporte.

Las dos primeras fases están ejecutadas por las entidades reguladoras, es decir, el estado, la municipalidad. Y las dos fases restantes están mucho más encauzadas a los operadores de servicio, las empresas de transporte. Así, las entidades reguladoras buscan el objetivo de maximizar la calidad del servicio y las empresas de transporte buscan maximizar sus beneficios. Estos son objetivos contrapuestos desde el punto de vista económico, pues una mejora de la calidad del servicio, incurre en unos costes mayores y una reducción de los costes provoca una peor calidad en el servicio.

El desarrollo del proyecto se centrará en la Fase II del problema de planificación del transporte (determinación de frecuencias y horarios), concretamente en el cálculo de los horarios de paso basándonos en la búsqueda de la máxima sincronización y

considerando la posibilidad de tiempos de espera de los pasajeros en las paradas para cambiar de línea.

1.2. Objetivo y Alcance:

Con este proyecto se buscará desarrollar una metodología que permita a las empresas de transporte de pasajeros la obtención de los horarios con la máxima sincronización posible entre las distintas líneas, considerando un rango admisible de tiempo de espera de pasajeros en cada uno de los nodos de conexión de las líneas.

Para ello, se plantearán tanto modelos exactos de programación lineal como algoritmos aproximados, realizando una comparativa a través de una batería de experimentos extraídos de la literatura, cada uno de ellos con una complejidad distinta. Se tomarán como referencias el Modelo de Sincronización Simultánea de Ceder (2001), y el Modelo de Sincronización para un Intervalo de Tiempo de Eranki (2004).

El problema que se plantea es el siguiente: sobre una red de transporte general, con distintas rutas (líneas), nodos (paradas) y número de salidas en cabecera (frecuencias), se propone bajo una serie de restricciones de tiempos (un horizonte de planificación, unos tiempos mínimo y máximo permitido entre cada dos salidas y un intervalo de tiempo de espera en cada nodo para la sincronización), alcanzar el máximo número de sincronizaciones de vehículos en los nodos.

El problema que se plantea es de gran complejidad y se trabajará con paquetes de programación lineal mixta entera, los cuales requerirán que se les especifique los datos de los que parte cada experimento, para poder dar lugar a la solución óptima de cada uno de los experimentos que se proponen en este documento. Los datos de partida serán los siguientes:

- Número de Rutas.
- Número de Nodos.

- Intervalo de tiempo de sincronización permitido para cada uno de los nodos.
- Frecuencia de salidas de vehículos para cada ruta.
- Tiempo mínimo y máximo permitido de salida para las distintas rutas.
- Horizonte de planificación.

Los resultados mostrarán que para problemas reales de tamaño grande, el número de variables enteras es elevado y se hace necesario ejecutar un algoritmo aproximado. En este proyecto se ha desarrollado un algoritmo aproximado basado en Eranki (2004). Se compararán los resultados de ambos métodos.

1.3. Estructura del Proyecto.

El documento del proyecto se ha estructurado en los siguientes capítulos:

- Capítulo 2: se realiza una revisión de la literatura existente sobre la determinación de frecuencias y horarios. Para poder desarrollar los distintos modelos de sincronización, y por tanto lograr el objetivo de nuestro proyecto, se hace necesario conocer cómo otros autores realizan el cálculo de la frecuencia o las tablas de tiempos para cada una de las rutas.
- Capítulo 3: este capítulo se centrará en desarrollar los modelos de sincronización que serán la base de la experimentación posterior. Para ello se tendrá en cuenta de que se partirá de dos premisas, el cálculo de horarios con sincronización simultánea (no hay intervalo de espera), y el cálculo con sincronización bajo intervalo. La resolución de dichos problemas se hará tanto de forma exacta (con paquetes de programación lineal) como aproximada (con un algoritmo heurístico).
- Capítulo 4: bajo las premisas establecidas, se plantean distintos experimentos extraídos de la literatura, y se aplican los modelos y métodos del capítulo 3 para lograr un resultado óptimo en tamaños pequeños y otro aproximado.

Los resultados experimentales confirman que se alcanzan más sincronizaciones con los modelos que alcanzan el óptimo que con el algoritmo aproximado.

- Capítulo 5: se desarrollan diversos análisis de sensibilidad, haciendo variar las frecuencias de salidas de las rutas y los intervalos de tiempo de espera en nodos.
- Capítulo 6: se enumeran las conclusiones obtenidas en este proyecto y se desarrollan posibles líneas de desarrollo futuras.
- Capítulo 7: se indican las referencias bibliográficas usadas en el proyecto