

2. Introducción

La planificación del transporte público cubre un área de investigación muy amplia. Desde que el primer enfoque de planificación de redes de transporte se publicase (Patz, 1925), los estudios sobre el problema han ido evolucionando desde diferentes puntos de vista: pasajeros y empresa; y bajo distintas consideraciones: demanda, costes, rutas, tiempos, modelos, métodos de resolución matemática...etc., convirtiéndose el diseño, planificación y operación de sistemas de transporte público en un tema crucial en la sociedad moderna.

2.1. Planificación de redes de transporte

En esta sección se hace una revisión general de los trabajos realizados por algunos autores sobre la planificación de redes de transporte. Se podría considerar el artículo de Ceder y Wilson (1986) como un trabajo que define de alguna manera una completa visión del campo del transporte público que posteriormente será usada por numerosos autores. En él, se considera que el rediseño de redes de autobuses existentes puede tener un impacto significativo en el rendimiento del sistema. La principal novedad del texto es que muestra una secuencia sistemática de problemas de toma de decisiones que configuran el proceso de planificación. Se determinan una serie de cinco niveles o pasos de forma que el output de cada uno de ellos pasa a ser una entrada del nivel inferior, tal como se muestra en la tabla de la Fig. 1. El enfoque propuesto tiene la intención de facilitar el proceso de análisis de los problemas de transporte y ayudar en el desarrollo de nuevos enfoques.

Independent inputs	Planning activity	Output
Demand data Supply data Route performance indicators	<u>Level A</u> Network design	Route changes New routes Operating strategies
Subsidy available Buses available Service policies Current patronage	<u>Level B</u> Frequencies setting	Service frequencies
Demand by time of day Times for first and last trips Running times	<u>Level C</u> Timetable development	Trip departure times Trip arrival times
Deadhead times Recovery times Schedule constraints Cost structure	<u>Level D</u> Bus scheduling	Bus schedules
Driver work rules Run cost structure	<u>Level E</u> Driver scheduling	Driver schedules

Entradas independientes	Planificación de la actividad	Salidas
Datos de demanda Datos de suministro Indicadores de realización de ruta	<u>Nivel A</u> Diseño de redes	Cambios de ruta Nuevas rutas Estrategias de operación
Subsidio disponible Autobuses disponibles Políticas de servicio Clientela actual	<u>Nivel B</u> Ajuste de frecuencias	Frecuencias de servicio
Demanda según la hora del día Tiempos del primer y último viaje Tiempos de funcionamiento	<u>Nivel C</u> Desarrollo del horario	Tiempos de salida del viaje Tiempos de llegada del viaje
Tiempos de deadhead Tiempos de recuperación Restricciones del calendario Estructura de coste	<u>Nivel D</u> Programación de autobuses	Horarios de autobuses
Reglas del conductor Estructura de coste del funcionamiento	<u>Nivel E</u> Programación de conductores	Horarios de conductores

Figura 1: Bus planning process, Ceder y Wilson (1986) y traducción.

Estos pasos se pueden agrupar en tres grandes grupos: planificación estratégica (diseño de la red), planificación táctica (ajuste de frecuencias y desarrollo de horarios) y planificación operativa (programación de los autobuses y de conductores). Los problemas de planificación estratégica se refieren a decisiones a largo plazo, tales como el diseño de las rutas de tránsito y de redes. Los objetivos apuntan a maximizar la calidad del servicio bajo las restricciones presupuestarias. Los problemas tácticos se refieren a las decisiones de planificación relacionada con el servicio que se ofrece al público, a saber, las frecuencias de servicio a lo largo de las rutas y los horarios. Estos problemas también se centran en la calidad del servicio. Los problemas de planificación operativa deben resolverse para poder ofrecer el servicio propuesto a un coste mínimo.

Tradicionalmente la mayor parte de los recursos se han dedicado a los dos últimos niveles, por ser la planificación operativa la que suponía un mayor coste a las empresas de transporte, en pago de salarios y beneficio marginal. Pero gracias al enorme avance computacional las posibilidades se han ampliado, haciendo factible el centrarse en los niveles más altos del proceso de planificación.

A partir del trabajo de Ceder y Wilson (1986) comenzaron a desarrollarse estudios enfocados a los dos primeros grupos de problemas. Anteriormente se habían llevado a cabo algunos trabajos como Furth y Wilson (1982), pero o bien no eran aplicables a problemas reales o se trataban de trabajos más bien teóricos.

Ceder y Wilson presentan en su trabajo la posibilidad de enfocar los estudios desde dos puntos de vista: desde la perspectiva del usuario en la que el sistema debe cumplir con la demanda, proporcionando un servicio barato y directo a los pasajeros, exigiendo un mínimo de regularidad, nivel de frecuencia, cobertura de servicio, comodidad del vehículo. Por el contrario, desde la perspectiva de la empresa su principal objetivo es que el sistema sea capaz de obtener el mayor beneficio económico posible.

El principal reto de la planificación del transporte público es alcanzar un equilibrio entre los dos puntos de vista en conflicto. Es lo que se conoce como problema multiobjetivo, donde se integran las diferentes restricciones, observando que los costes operativos son muy dependientes de la estructura de la red.

Una revisión de los enfoques del problema de diseño de redes de autobuses fue realizada por Hasselström (1981) en la que detalla seis características de cada método analizado: demanda, función objetivo, restricciones, comportamiento de los pasajeros, técnicas de resolución y tiempos de cómputo.

Trabajos anteriores al estudio de Hasselström como Newell (1979) se basan en el supuesto de una demanda fija, con restricciones de los parámetros de diseño y minimización de la suma de costes desde una perspectiva multiobjetivo, pero poco después Kocur y Hendrickson (1982) ampliaron este enfoque para considerar la demanda variable.

Hoy en día en busca de una complejidad reducida se ha optado por modelos que utilizan una demanda fija para el establecimiento de la fase de diseño, siempre garantizando el servicio mínimo. Si la empresa desea realizar una estimación de la demanda una vez obtenido el diseño, solo tendría que realizar una segunda iteración a través de una nueva matriz de demanda. Se utiliza el objetivo de reducir al mínimo el coste o tiempo para las aproximaciones de demanda fija.

2.2. Diseño de redes de transporte

El proceso de planificación de transporte se basa en las siguientes entradas: demanda de público, una zona determinada con características topológicas, un conjunto de vehículos y un conjunto de controladores. El objetivo es obtener un conjunto de rutas y horarios. Según Ceder y Wilson (1986), el proceso de planificación de transporte se puede descomponer en la secuencia de los cinco componentes ya mencionados en la Fig. 1:

Diseño de redes: el objetivo obtener el diseño más conveniente de la red de transporte, especificando las diferentes líneas que darán servicio a los usuarios. Las

rutas proveerán servicio a todas las parejas de paradas origen-destino y el diseño cumplirá con las restricciones operacionales y de servicio, transferencias y tiempos de espera. Cada ruta estará determinada por una secuencia de las paradas de los vehículos. La matriz origen-destino contiene el número de pasajeros que demandan ir desde cada origen a cada destino en un período de tiempo dado. Las principales restricciones son: la red existente, algunas razones (políticas), área cubierta, satisfacción de la demanda, antecedentes históricos, número de líneas y aspectos relacionados con la longitud total de las rutas.

Ajuste de frecuencias: el objetivo es desarrollar medidas de funcionamiento desde la perspectiva de los pasajeros, la compañía y la comunidad. En este paso se proporcionan frecuencias para cada línea de la red y para cada período de tiempo. Se define el número de recorridos de cada línea. Es necesario conocer las rutas, la demanda y la flota de autobuses disponible. Las principales restricciones son: la satisfacción de la demanda, reducir los tiempos de espera, número de líneas y, el número de recorridos por cada línea.

Desarrollo del horario: El objetivo es combinar la planificación anterior de la ruta con la programación de los autobuses. Este paso produce un calendario que incluye los tiempos de salida de todas las paradas servidas por cada línea de la red. El horario debe proporcionar el tiempo de salida de la terminal inicial. Este nivel permite por primera vez calcular el tiempo de viaje de los pasajeros. Es necesario conocer las rutas, la demanda y la frecuencia. Las principales restricciones son: la satisfacción de la demanda, coordinar la transferencia de vehículos y, tamaño de la flota.

Programación de autobuses: el objetivo es desarrollar un análisis de sensibilidad para determinar soluciones tolerables debido a los posibles cambios en la demanda y las restricciones. Se pretende determinar el número de autobuses requeridos para el período de tiempo considerado. Hasselström (1981) fue quien afirmó que la resolución del problema según el flujo de mínimo coste es la mejor manera de formular un problema con horarios fijos cuyo objetivo es minimizar el número de vehículos necesarios para la red.

Programación de conductores: el objetivo es desarrollar un sistema de interacción entre la persona y la máquina cuya planificación pueda cambiar con las restricciones o rutas durante el proceso de diseño. Se pretende asignar a los conductores de los autobuses de forma que a cada conductor se le proporciona un calendario para un período determinado. Un estudio sobre el tema es Wren y Rousseau (1993).

2.3. Problema de la planificación de redes de transporte

Guihaire y Hao (2008) afirman que todos estos pasos deberían ser tratados de forma simultánea con el fin de garantizar la interacción y la retroalimentación, lo que conduce a una mejora de calidad de los resultados. Sin embargo, debido a la complejidad excepcional del proceso, este enfoque global parece intratable en la práctica. Como resultado, se han definido varios sub-problemas en los últimos años con el fin de resolver el problema de planificación de una manera secuencial. Así, a pesar de que con ello se pierde cualquier garantía de optimalidad su formulación es apreciablemente más sencilla. Guihaire y Hao (2008) establecieron una terminología para realizar una revisión sobre estudios acerca de la planificación estratégica y táctica. Nos basaremos en su texto para dar una visión amplia de los trabajos anteriores sobre el campo de la planificación de redes de transporte.

El diseño de la red de tránsito y el problema de la programación corresponde a los primeros pasos del proceso de planificación del transporte. Consiste en la creación (desde cero o desde una red existente) de un conjunto de rutas de líneas y horarios. La necesidad de encontrar un equilibrio entre la satisfacción de los usuarios y del operador hace que este problema multiobjetivo añada complejidad. La formalización de los problemas de tránsito de la red puede ser presentada entre otros mediante un problema de asignación semi-cuadrática, utilizando un modelo de programación lineal o no lineal, múltiples redes de tiempo-espacio, problemas de diseño de red de tránsito tales como el nodo de arco, la ruta y la formulación de árbol. Los problemas resueltos mediante un modelo matemático tienen poca flexibilidad y se suelen limitar a situaciones basadas en una serie de simplificaciones. Por esta razón, un gran número de artículos revisados, en particular los publicados en los últimos años, utilizan métodos de resolución basados en heurísticas y meta heurísticas, que permiten definir marcos muy generales y pueden adaptarse a casi cualquier forma de restricciones y objetivos.

La terminología que Guihaire y Hao (2008) proponen se resume en la Fig. 2. Donde TNDP, TNFSP y TNTP corresponde a los tres primeros pasos definidos por Ceder y Wilson (1986), siendo TNDFSP, TNSP y TNDSP combinación de ellos.

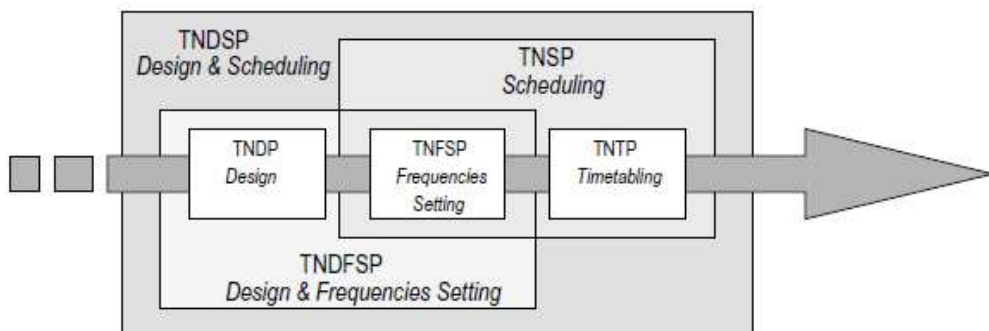


Figura 2: estructura del problema de la red de tránsito de Guihaire y Hao (2008)

TNDP (Transit Network Design Problem). Problema de diseño de red.

El problema del diseño de la red de tránsito consiste en determinar un conjunto de rutas que deben seguir los vehículos. Se considera un conjunto potencial de paradas iniciales y finales y la secuencia de las paradas intermedias, la demanda y, las características topológicas de un territorio. Desde la perspectiva de los usuarios, una red de transporte debe cubrir una gran área de servicio, ser muy accesible, apenas desviarse de los caminos más cortos y debería ser capaz de satisfacer la demanda. El número de rutas y la longitud total de las mismas debe ser la menor posible para reducir costes de operación y así poder satisfacer no solo a los usuarios de las líneas sino también a la empresa que la opera.

Murray (2003) estudia dos variantes del problema de diseño. En primer lugar, establece el objetivo de minimizar el número de paradas de autobús, analizando la reubicación de las mismas de una red urbana ya existente. La segunda parte trata de la ubicación óptima de las paradas de autobús para crear o extender la red, en este caso el objetivo es maximizar el acceso a los nuevos servicios para los usuarios de las áreas no cubiertas. En ese mismo año Guan et al. (2003) formuló un problema que simultáneamente trataba el diseño de la red y la asignación de los pasajeros.

Patz (1925) fue probablemente el primero en abordar el problema de diseño de una red de tránsito utilizando heurísticas. Propone un procedimiento para generar una red de líneas utilizando penalizaciones. Inicialmente, la red contiene una línea para cada par origen-destino con una penalización basada en el nivel de ocupación y el número de pasajeros que realizan ese viaje. Se van eliminando líneas de la red y los pasajeros se reasignan en otras.

Pape et al. (1992) presentan un modelo cuyo objetivo es maximizar el número de viajeros directos, mejorar la frecuencia en las paradas de autobús y la accesibilidad, aun empeorando la velocidad de desplazamiento de los vehículos.

TNFSP (Transit Network Frequencies Setting Problem). Problema de establecimiento de frecuencias de la red de tránsito.

La configuración del problema de frecuencias de la red de tránsito consiste en la determinación de las frecuencias adecuadas para cada línea de la red y cada período de tiempo. Un período de tiempo se define de acuerdo a la hora del día, día de la semana o momento del año. La asignación adecuada de frecuencias debe proporcionar un servicio suficientemente regular para satisfacer

a los usuarios y reducir el tamaño de la flota lo máximo posible para así satisfacer también los costes de operación.

Furth y Wilson (1982) presentan un método matemático para TNFSP. El objetivo es maximizar el beneficio social de la red que conlleva al beneficio de los usuarios y un ahorro del tiempo de espera. Se imponen restricciones en el tamaño de la flota, progreso máximo y el presupuesto total. El resultado es una asignación óptima de las rutas de autobuses.

Han y Wilson (1982) utilizan un método heurístico en el que las frecuencias de línea se establecen dado el tamaño total de la flota y una capacidad para cada ruta. Se resuelve en dos fases, en la primera se establecen unas frecuencias mínimas con el fin de satisfacer toda la demanda y en la segunda fase, se incrementan las frecuencias de manera uniforme entre las líneas con el fin de utilizar todos los vehículos disponibles.

Gao et al. (2003) expone un modelo de dos niveles para determinar las frecuencias de la línea y la correspondiente asignación de red. El nivel superior resuelve la frecuencia óptima de cada ruta, lo que minimiza el coste total de pasajeros. Esta solución se itera con la asignación de pasajeros de nivel inferior, que se basa en el modelo de asignación de congestión de Cea y Fernández (1993). Este trabajo incluye Short turning (giros cortos), Deadheading (salto de paradas iniciales) y Expressing (salto de paradas intermedias). El objetivo es reducir el número total de vehículos que sirven una ruta, sin dejar de cumplir con la demanda de pasajeros y los niveles mínimos de servicio.

TNTP (Transit Network Timetabling Problem). Problema de horarios de la red de tránsito.

Este problema consiste en establecer un horario para cada línea de una red de tránsito predeterminada, con horarios de salida de cada línea. Este proceso puede ser dependiente de un conjunto de frecuencias preestablecidas (definidas en una fase anterior). En muchos casos, la fijación de horarios es relativamente sencilla, trabajando principalmente con la suposición de que la demanda es relativamente uniforme durante el período de tiempo de interés. La simplicidad de esta tarea puede explicar en parte por qué ha recibido relativamente poca atención por parte de los investigadores. Una complicación importante en la fijación de horarios se produce cuando estos están destinados a coordinarse en una parada de transferencia o terminal y cuando se introduce el concepto de Short turning y Deadheading. Salzborn (1972) trabajó en el problema de los horarios de llegada de los pasajeros en función del tiempo.

En zonas de mayor demanda las frecuencias suelen ser altas y por consiguiente la espera se reduce a minutos, por el contrario, en las áreas de menor densidad (Yan y Chen, 2002), la falta de una conexión incurre en grandes retrasos y perjuicios para el correcto servicio de una red pública de transporte. Además, dependiendo del nivel de frecuencia, el comportamiento de los pasajeros también varía. Cuando los intervalos son pequeños los usuarios tienden a llegar al azar a las paradas de autobús y esperar el próximo autobús, pero en zonas de baja frecuencia los usuarios tienden a organizarse en función del horario establecido y en su caso a buscar una alternativa al uso de un determinado medio de transporte en beneficio de otro o de otra alternativa, hasta el punto en que se abandone su uso.

Daduna y Voss (1995) proponen un método para determinar los horarios de salida en una red con frecuencias de línea predeterminadas. El objetivo es sincronizar los tiempos de llegada en zonas de transferencia a fin de minimizar el tiempo de espera.

Chakroborty et al. (1995, 1997) pone el énfasis en la aplicación de algoritmos genéticos para determinar los horarios de salida en una red de tránsito de una manera coordinada, con el fin de minimizar el tiempo total de espera de los pasajeros. Las restricciones que considera son: incluir una flota determinada, avance de políticas, límites en el tiempo de parada y un tiempo máximo de transferencia.

TNDFSP (Transit Network Design and Frequencies Setting Problem). Problema de diseño y establecimiento de frecuencias de la red de tránsito.

Consiste en determinar un conjunto de rutas de línea asociadas a unas frecuencias en un área en particular, dada una demanda pública, un conjunto de objetivos y restricciones generalmente asociados a un servicio mínimo y a los costes de operación.

Hasselström (1979) propone un modelo de programación lineal de tres pasos aplicable al mundo real. En primer lugar, se consideran todos los enlaces existentes en la red, luego se genera un conjunto de posibles rutas y por último se seleccionan las rutas en función de la frecuencia. Las rutas y frecuencias se determinan, al mismo tiempo. En el primer estudio, el objetivo es reducir al mínimo el número de transferencias, mientras que en el segundo el objetivo es la maximización del excedente del consumidor, es decir, el número de pasajeros en el contexto de una demanda variable. Ver también Dubois et al. (1979). Poco después Hasselström (1981) propone un proceso de dos etapas de diseño de la red en el que rutas y frecuencias se determinan simultáneamente. En la primera etapa se genera una red inicial de rutas y en la segunda etapa se detallaran las

rutas y se realiza la asignación de pasajeros. Además de resolver el problema conjunto de rutas y frecuencias, la principal ventaja del método de Hasselstrom se encuentra en su puesta en práctica y en su aplicación a redes de tamaño real.

Bussieck (1998) se centró en el transporte ferroviario y propone un modelo matemático para crear rutas y frecuencias de líneas que puede ser aplicado a sistemas de transporte masivo. En una primera parte, el objetivo consiste en maximizar el número de pasajeros directos. En la segunda parte, Bussieck busca reducir al mínimo los costes del operador con respecto a un determinado nivel de servicio y calidad.

Van Nes et al. (1988) presenta un método para diseñar simultáneamente una red de rutas y las frecuencias asociadas con el objetivo de satisfacer la demanda y maximizar el número de viajes directos dado un determinado tamaño de la flota.

Para tratar con el concepto original de Short turning, Ceder (2003) aborda el TNDPSP utilizando un método de dos etapas. La primera parte consiste en el diseño de rutas a nivel de red, mientras que la segunda se centra en la estrategia de Short turning, en la que se omiten algunas paradas iniciales. Esta estrategia puede ser rentable cuando la demanda varía mucho a lo largo de la misma línea. Así la primera parte del método tiene como objetivo diseñar una red directa y orientada a la demanda y la segunda reducir el tamaño de la flota requerida.

Tom y Mohan (2003) presentan un método basado en algoritmos genéticos que a la vez determina las rutas de las líneas y sus frecuencias, con el objetivo de minimizar los costes de operación y tiempo de viaje de los pasajeros totales. El carácter distintivo en este enfoque es el esquema de codificación que incorpora la frecuencia de líneas como una variable, con el fin de mejorar el rendimiento del modelo.

Baaj y Mahmassani (1991, 1995) proponen un enfoque que combina el conocimiento de los expertos y procedimientos algorítmicos. El proceso se inicia con un algoritmo de generación de rutas que determina un conjunto de rutas con respecto a una combinación de costes que considera tanto a los usuarios como al operador de servicios. Este algoritmo se compone de un método de esqueleto que une los pares origen-destino de mayor demanda. Se utiliza entonces una asignación de los viajes de los pasajeros para determinar la frecuencia y el número de buses requeridos en cada línea. Finalmente, un algoritmo de mejora de rutas modifica la estructura de la red heurísticamente con el fin de incrementar su eficacia global. Este trabajo tiene enfoque similar al que ya realizaron Lampkin y Saalmans (1967).

La formulación matemática de Ceder y Wilson (1986) fue ampliada por Israeli (1992) y otros trabajos como los de Israeli y Ceder (1989) o Ceder e Israeli (1998). En ellos se considera que las restricciones de la formulación incluyen la asignación de pasajeros con una matriz de demanda fija y se especifican frecuencias mínimas para cada ruta. Este problema se resuelve con la siguiente heurística:

1. Se enumera el conjunto completo de las posibles rutas, de una manera similar a Ceder y Wilson (1986).
2. Se añaden a la red las rutas directas adicionales entre pares O-D con alta demanda, donde ni el origen ni el destino son nodos terminales. En segundo lugar, se calcula el número de transferencias requeridas para cada par O-D, hasta un máximo establecido.
3. Se obtiene un conjunto mínimo de rutas con el objetivo de minimizar la desviación de las rutas más cortas, manteniendo al mismo tiempo las restricciones sobre la conectividad para cada par de O-D.
4. Se determinan iterativamente la asignación de flujo y las frecuencias en cada ruta. Las frecuencias se calculan en base al pico de carga en cada segmento de ruta. Estos a su vez se utilizan en el cálculo de los tiempos de espera y de transferencia. Con esta información, se calcula el coste total de los pasajeros.
5. Se determina el tamaño mínimo de la flota utilizando el método de Stern y Ceder (1983).
6. Se consideran las nuevas rutas para explorar otras soluciones cumpliendo los objetivos. Estos nuevos conjuntos de rutas se vuelven a evaluar repitiendo los pasos 3-5.
7. Se evalúa la eficiencia del conjunto de rutas y se presentan a la toma de decisiones.

TNSP (Transit Network Scheduling Problem). Problema de programación de la red de tránsito.

Dada una red de rutas y una demanda de viajes, el problema de programación de la red de tránsito consiste en determinar los horarios de la red, incluyendo las frecuencias y los tiempos de salida para cada línea, para ello se imponen unas frecuencias mínimas.

Para este tipo de problemas los métodos matemáticos exactos requieren un tiempo computacional excesivo, por tanto es necesario realizar simplificaciones en su formulación o recurrir a métodos heurísticos. En el trabajo de Rapp y Gehner (1976) se describe un enfoque coordinado en cuatro etapas, un proceso gráfico para la planificación operacional de tránsito. Etapa 1: trata la optimización de la ruta según el tipo de vehículo; etapa 2: intenta minimizar los retrasos; etapa 3: diseña modos de ejecución para que las etapas

anteriores puedan llevarse a la práctica, y la etapa 4; proporciona ayuda informática al hacer asignaciones de recursos humanos. El estudio trata principalmente de la herramienta de optimización de la transferencia de la etapa 2. La herramienta operativa para optimizar los retrasos de transferencia implica la modificación automática-iterativa de los horarios de salida de los terminales. El análisis toma en cuenta el cálculo de los tiempos de espera previstos para las transferencias entre líneas de tránsito con intervalos diferentes y la interdependencia de los horarios de salida de los terminales. Este procedimiento puede suponer la disminución de un 20 por ciento de los retrasos sin que exista ningún coste operativo adicional.

TNDSP (Transit Network Design and Scheduling Problem). Problema de diseño y programación de la red de tránsito.

El problema de diseño y programación de la red de tránsito consiste en generar un sistema de vehículos como paso previo a la planificación operativa. Se obtendrá un conjunto de líneas con sus horarios asociados, que debe estar configurado de tal manera que se satisfaga la demanda mediante un servicio de calidad y se aproveche al máximo el uso de los recursos, infraestructuras, vehículos y personas.

La combinación de los tres primeros pasos del proceso global de planificación de transporte público es muy engorrosa. Así, los modelos considerados a menudo tienen que ser de tamaño limitado o simplificado, a pesar del carácter exigente de la tarea, algunos autores han conseguido abordar el problema. Ver Yan y Chen (2002), Quak (2003) y Bachelet y Yon (2005).

2.4. Horarios de una red de trenes

A la hora de planificar los horarios de una red de tránsito de trenes se pueden tener dos puntos de vista: horarios cíclicos y no cíclicos. Los horarios cíclicos son aquellos que se repiten a lo largo del tiempo, mientras que los no cíclicos se formulan dependiendo de la demanda en cada momento del día sin tener una frecuencia fija.

Los horarios cíclicos tienen principalmente tres ventajas, una para el cliente ya que no es necesario memorizar horarios complejos para sus conexiones normales; basta con memorizar los minutos de la hora a la que salen los trenes (suponiendo que el ciclo sea de una hora). Otra ventaja es que si se realiza el concepto cíclico estrictamente, los pasajeros no se enfrentan a carencias en los servicios de trenes en las partes del día en

que la demanda de transporte es baja. Desde un punto de vista de la planificación, los horarios cíclicos tienen la ventaja de que sólo se tiene en cuenta un período de ciclo, es decir, el horizonte de planificación es pequeño y por tanto la construcción del horario es más sencilla. Un requisito es que la situación inicial y final de un periodo deben coincidir. Si esto sucede la base de un calendario de día completo se puede obtener mediante la copia del horario cíclico por todas las horas pertinentes del día.

Como principales desventajas hay que señalar que los calendarios cíclicos tienen mayores costes, ya que los horarios son operados de la misma manera tanto en los momentos pico de demanda como en los momentos fuera de hora punta. Además, es difícil planificar horarios periódicos en un mercado competitivo, donde muchos operadores de trenes acceden a la misma infraestructura ferroviaria. En esta situación, la realización de cambios sobre los horarios cíclicos de diseño conducen a una disminución en el beneficio.

La planificación mediante un horario no cíclico cuenta con la ventaja de poder formularse de una manera flexible, teniendo en cuenta que por una vía de tren pasan trenes de diferentes compañías. Otra ventaja es la disminución de coste que supone para la empresa, ya que al trabajar en función de la demanda, se puede reducir el tamaño de la flota optimizando la asignación de recursos. Es por ello que a este tipo de horarios se le considera como un calendario dirigido por el mercado y por la demanda. Como consecuencia, un horario que se guíe estrictamente por la demanda puede dar lugar a un calendario complejo que es difícil de consultar y memorizar. Por otra parte, el concepto de horario no cíclico requiere la planificación de un horario para cada día de la semana. Esto genera problemas de planificación muy grandes, de ahí que su uso quede restringido a sistemas de transporte liberalizados y corredores de media o larga distancia o con frecuencias deseadas ni muy altas ni muy bajas.

2.4.1. Horarios cíclicos

La mayoría de los autores que estudian los problemas de horarios cíclicos usan modelos basados en el problema de programación de eventos periódicos (PESP), presentado por Serafini y Ukovich (1989). El PESP busca determinar los instantes de tiempo en los que los eventos periódicos se llevarán a cabo, entendiéndose por evento una combinación de trenes, horas (de salida o entrada) y nodos. El PESP básico sólo aborda el problema de encontrar un calendario factible, se trata por tanto de un problema de admisibilidad y como consecuencia no se formula con una función objetivo muy realista.

Voorhoeve (1993) crea el modelo del problema de horarios cíclicos de trenes (CRTP) basado en PESP teniendo en cuenta las características del movimiento del tren,

el uso seguro de la infraestructura, las conexiones entre trenes y los límites en los tiempos de permanencia.

Nachtigall (1994) también utiliza las restricciones PESP para crear su propio modelo de formulación de periodicidad cíclica (CPF). Éste se basa en la construcción de un gráfico de auxiliar cuyos nodos se corresponden a los eventos (salidas y llegadas de trenes) y cuyos arcos modelan las restricciones en el tiempo de separación de los eventos. Este modelo, proporciona la representación estándar adoptada actualmente en la literatura sobre horarios de trenes. También introdujo funciones objetivo para discriminar entre los horarios de diferente calidad: el tiempo de espera de los pasajeros, el tiempo de viaje, el uso de vehículos, la inversión en infraestructura, etc.

Odijk (1996, 1997) utiliza el modelo PESP, pero no con el único propósito de construir un calendario, más bien, su objetivo es establecer especificaciones para la ampliación de la infraestructura dentro y alrededor de la estación.

Peeters (2003) afirma que los horarios cíclicos pueden producir costes más elevados que los no cíclicos ya que en un calendario cíclico, en horas de baja demanda el servicio de trenes es el mismo que en el resto del día. Debido a que el grado de ocupación de los trenes en esas horas es mucho menor que durante el resto del día, propone utilizar trenes de alta capacidad durante las horas punta, es decir, trenes más largo y / o de dos pisos. Y en horas de poco tráfico, trenes cortos.

Wardman et al., (2004) realiza una investigación novedosa sobre los beneficios que reciben los viajeros de ferrocarril con un horario regular por encima de los beneficios del uso de una frecuencia constante. Se realizó un estudio para estimar estos beneficios y los resultados, en general plausibles, los utilizó para mejorar un modelo de demanda ferroviaria, que a su vez usó para pronosticar el efecto que tienen los horarios más regulares sobre la demanda para una amplia gama de situaciones.

Chierici et al., (2004) afirman que en un horario regular, los trenes que prestan servicio a una línea se suceden a intervalos de tiempo fijos. Los pasajeros disfrutan de un calendario fácilmente memorizable y un buen nivel de servicio durante todo el día y para cada par origen-destino. Si bien todos los estudios previos asumen una demanda de transporte dado, Chierici et al., (2004) trata la fuerte influencia de la retroalimentación que ejerce el horario sobre la demanda. Su objetivo es maximizar la demanda total captada.

2.4.2. Horarios no cíclicos

Szpigel (1973) fue uno de los primeros que trató el problema de los horarios no cíclicos, es quien propuso una formulación para la planificación del problema de los horarios de los trenes en una única vía de ferrocarril, con el objetivo de minimizar la media ponderada de los tiempos de viaje en tren. Desarrolló y probó un algoritmo branch&bound para un caso pequeño.

Jovanovic y Harker (1991) realizaron un estudio de viabilidad del problema de planificación táctica, con el objetivo de diseñar un horario fiable de trenes. El problema se formuló sin una función objetivo explícita. Los autores introdujeron variables binarias para definir el orden de los trenes en los puntos donde se permitía adelantar y variables continuas que representan las horas de llegada y salida.

Cai y Goh (1994) desarrollaron un algoritmo heurístico para el problema de la programación de los trenes en una sola línea. Se supone que todos los trenes que viajan en la misma dirección tienen la misma velocidad (es decir, no es posible adelantar). El algoritmo determinaba los grupos de trenes en conflicto y los costos asociados al retraso de cada grupo de trenes.

Carey y Lockwood (1995) propuso un algoritmo heurístico para determinar el recorrido de las líneas de ferrocarril. Programan un tren cada vez para obtener una solución inicial factible, y entonces iterativamente volver a optimizar los trenes individualmente con el fin de mejorar la solución global, hasta que no se pueda mejorar más.

Mistry y Kwan (2003) presentaron un algoritmo para la generación automática de los horarios. Poco más tarde Semet y Schoenauer (2005) presentaron un algoritmo para la fijación de horarios de trenes en el mundo real, donde la atención se centra en la reconstrucción del esquema seguido a una pequeña perturbación, con el objetivo de minimizar el retraso total.

Borndörfer et al. (2005) presenta un enfoque para implementar la asignación de franjas horarias de la red ferroviaria en un mercado abierto y competitivo. En particular, estos autores dirigieron una subasta multi-ronda e introdujeron un lenguaje de licitación que puede ser utilizado por los operadores de trenes. El problema que surge en la asignación óptima de las vías se resuelve en cada ronda. Una ronda consta de dos etapas: en la primera etapa, cada operador de tren sostiene un conjunto de ofertas (es decir, las ofertas presentadas recientemente y las ofertas de la anterior ronda), y luego, el administrador de la infraestructura calcula el conjunto de las ofertas que se aceptan en esta ronda, mediante la determinación de una solución sin conflicto que maximiza los beneficios de la red.

2.5. Estrategias de aceleración en el establecimiento de frecuencias

En los sistemas urbanos, la demanda de transporte público en general, presenta diferentes formas en el espacio y el tiempo. Esta situación plantea problemas de diseño si se desea proporcionar un nivel razonable de servicio a los usuarios. Una dificultad importante consiste en hacer frente diariamente a las horas punta de demanda, considerando tanto el aspecto espacial como el temporal. Estas variaciones de demanda pueden ser servidas de manera eficiente por medio de diferentes flotas, aumentando las frecuencias en aquellas paradas con mayor afluencia de pasajeros.

Las estrategias de asignación de flotas específicas (estrategias de aceleración) de mayor relevancia propuestas en los últimos años son Short turning, Deadheading y Expressing. Short turning consiste en seleccionar una parte de la flota para que realice ciclos cortos en las zonas que presentan alta demanda; Deadheading consiste en aumentar la frecuencia en la dirección más demandada para omitir las paradas, iniciales o totales, de la dirección con menor demanda; y Expressing se puede considerar una variación de Deadheading donde el vehículo sólo realiza paradas en las estaciones con mayor demanda, con independencia de la dirección. Los estudios de estas estrategias aconsejan utilizar Deadheading en situaciones donde la demanda se concentra en una sola dirección, mientras que situaciones de concentración de la demanda dentro de un sector de la línea aconsejan Short turning. Existen casos en los que dentro de una misma línea es aconsejable utilizar una combinación de las estrategias de Short turning, Deadheading o Expressing.

En general, la estrategia de Short turning puede reportar grandes beneficios en términos de reducción de costes totales, mientras que los beneficios asociados a Deadheading suelen ser bajos, debido a los costes adicionales de funcionamiento de vehículos vacíos en algunas secciones o a la necesidad de poner en marcha servicios de información especiales para los pasajeros.

2.5.1. Short turning

Short turning ha sido estudiado por muchos autores utilizando diferentes metodologías de resolución. Furth (1987) se centra en el uso eficiente de Short turning, limitando la frecuencia de los vehículos que siguen la estrategia a un múltiplo de la frecuencia de los vehículos que recorren toda la ruta. Furth formula tres problemas de optimización, buscando la minimización del tamaño de la flota, la minimización de los tiempos de espera de pasajeros para un tamaño de flota fija y una combinación de ambos.

Delle Site y Filippi (1998) desarrollan un Short turning multi-período usando tanto demanda elástica como inelástica. Formulan por un lado la maximización de los beneficios sociales (para el caso de demanda elástica), y la minimización de los costes del usuario más los costes de operación (para el caso de demanda inelástica). Las variables de decisión son las frecuencias de las estaciones, las tarifas y el límite del short turning (inicio y final), además de la capacidad de los vehículos. Consiguen demostrar que la estrategia solo es beneficiosa si la demanda tiene picos pronunciados.

2.5.2. Deadheading

Furth (1985) propone aplicar el concepto de Deadheading en los corredores con una demanda desequilibrada entre las direcciones. Según sus conclusiones, la estrategia reduce tanto el coste del operador (por el ahorro en tamaño de la flota) y el coste del usuario (por la reducción del tiempo de espera de los pasajeros). Explora tres funciones objetivo: la minimización del tamaño de la flota imponiendo una condición de máximo, la minimización de los tiempos de espera para un tamaño de flota fijo, y la suma de los costes del operador y los usuarios.

Eberlein et al (1998) y Eberlein et al (1999) Consideran un problema diferente: los vehículos que realicen Deadheading inician sus viajes vacíos hasta una estación que se determine y, a partir de esa parada, los vehículos comienzan su ruta establecida hasta el final de su recorrido. En Eberlein et al. (1998) la función objetivo es minimizar el tiempo de espera de los usuarios de la línea. Este trabajo es el primero que presenta una formulación rigurosa y realista del problema de Deadheading en tiempo real.

El problema Deadheading es de naturaleza estocástica debido a la aleatoriedad en los sistemas de tránsito. Afortunadamente, con el reciente crecimiento de las nuevas tecnologías de información, los movimientos de vehículos y pasajeros se pueden prever con bastante precisión durante un intervalo de tiempo corto. Esto hace posible tratar el problema como determinista en un intervalo de pronóstico a corto plazo.

2.5.3. Expressing

Expressing es una variante de la estrategia de Deadheading en la que un vehículo también se salta un número de estaciones, pero su ciclo puede comenzar en cualquiera de los dos terminales o una estación intermedia. La decisión de utilizar Expressing se debe anunciar a los pasajeros en la estación de partida para que los pasajeros que viajen a las estaciones que son saltadas decidan si subirse o no al vehículo. En términos de calidad del servicio una ventaja de Deadheading sobre Expressing es que ahorra más

tiempo en las estaciones de partida, porque no hay bajada y subida de pasajeros y además, los pasajeros pueden considerar Deadheading como un mejor servicio ya que no es necesario un aviso previo de las paradas. Algunos trabajos sobre el tema se pueden encontrar en Furth (1986) y Eberlein et al. (1999).

2.5.4. Problema mixto

Algunos autores formularon el problema mixto de varias estrategias como Eberlein et al. (1999), quien formula un modelo de control en tiempo real para la comparación de estrategias Deadheading y Expressing, dirigido a resolver problemas de aglutinamiento o interrupciones en el servicio, es decir, una herramienta para tomar decisiones en tiempo real de acuerdo con las condiciones del sistema. Fu et al. (2003) también concluye que una versión combinada resulta ser más eficaz que la aplicación de cada estrategia por separado, en términos de reducción de tiempos de espera y de vehículos.

Tirachini et al. (2007) desarrollan un modelo que combina Short turning y Deadheading para una línea de tránsito simple, donde las variables de optimización son las frecuencias dentro y fuera de la zona de alta demanda, la capacidad de transporte (con vehículos de tamaño variable), y las estaciones donde la estrategia comienza y termina. Realizando ciclos cortos asimétricos el objetivo es disminuir los costos totales para los usuarios y el operador en el corredor.

Mesa et al. (2009) desarrollan un modelo mixto para las estrategias integradas Short turning y Expressing (STAE) con el fin de obtener frecuencias apropiadas que permitan preservar el equilibrio entre oferta y demanda, así como mantener un nivel mínimo de servicio. Es un modelo similar al de Tirachini et al. (2007) pero en el que cada vehículo puede realizar un ciclo corto asimétrico diferente incluyendo no parar en las paradas intermedias.