

CAPÍTULO 1

- 1.1 Introducción a la planificación del transporte público.**
- 1.2 Objetivo del proyecto.**
- 1.3 Trabajos y estudios previos.**
- 1.4 Formulación propuesta.**

1.1 INTRODUCCIÓN A LA PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO

Normalmente se considera el transporte como el desplazamiento de personas o bienes utilizando medios especiales.

Durante las últimas décadas, numerosas áreas metropolitanas han experimentado un crecimiento significativo y una importante redistribución de su población, empleo, comercios y otros generadores de viajes. Esto supone un incremento significativo en el total de desplazamientos, y como consecuencia debe venir acompañado, por una reestructuración adecuada del transporte público.

El crecimiento de las ciudades va íntimamente ligado a la evolución de los sistemas de transporte como un factor clave en el desarrollo económico y la vertebración social de las mismas. Hasta tal punto, que una decreciente participación de los modos de transporte público, puede tener unas consecuencias muy negativas en las infraestructuras de transporte de las ciudades, que no se desarrollan al mismo ritmo que crece la demanda, y se orienta hacia el traslado en vehículo privado, llegando al colapso, debido en gran parte a las deficiencias de los servicios de transporte público.

La correcta planificación de los sistemas de transporte público puede invertir la actual tendencia hacia los modos de desplazamiento particulares, pero para ello es necesario ofrecer un servicio adecuado a la demanda de movilidad.

Un sistema de transporte público adecuado mejorará el sistema de transporte en general, ya que prolongará la vida de las infraestructuras existentes a través de una utilización más eficiente de las mismas mediante el uso del transporte colectivo.

De aquí surge la necesidad del desarrollo de herramientas que, mediante un adecuado proceso de planificación, permitan implantar, analizar y modificar un sistema de transporte público, para así adecuarlo a las necesidades reales.

Históricamente, la planificación de los sistemas de transporte comenzó en los años veinte en Estados Unidos de América, con el incremento del

parque automovilístico, dando origen a un conjunto de técnicas que se conocen como Ingeniería del tráfico y/o del transporte.

A partir de los años cincuenta se ampliaron los estudios para determinar la relación entre la utilización del suelo y del tráfico urbano, naciendo también la preocupación por los métodos de estimación de la demanda futura, para poder así responder a futuras necesidades.

1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO:

Con el motivo de servir como introducción al siguiente apartado donde se analizarán algunos trabajos realizados con anterioridad a este proyecto, vamos, nuevamente, a realizar una breve exposición del problema que se intentará resolver (más adelante se hará una exposición más amplia):

Partiendo de una serie de nodos establecidos sobre un área determinada (una ciudad, una provincia, una región,...) se pretende diseñar un conjunto de rutas, tal que se maximice la captación de viajeros, minimizando, en la medida de lo posible, la longitud de las rutas. En el trazado de las mismas deberá ser tenido en cuenta la posible existencia de una ruta denominada “principal” (un metro en la ciudad, una autopista entre poblaciones,...) de características superiores a las de nueva creación.

Finalmente, se hará una aplicación a un ejemplo real: el diseño de rutas de autobús en la ciudad de Sevilla, teniendo en cuenta la existencia de la primera línea de metro ya proyectada y en proceso de construcción.

1.3 TRABAJOS Y ESTUDIOS PREVIOS.

Puesto que nuestro objetivo básico era el de trazar una serie de rutas que unieran un conjunto de nodos, era necesario tener una visión amplia sobre los estudios e investigaciones que habían sido realizados hasta el momento, para así saber en que situación nos encontrábamos antes de introducirnos más en el proyecto.

Comenzando por los estudios más generalistas, nos encontramos los orientados al diseño de redes, que constituye uno de los principales problemas en la planificación del transporte.

Los “ingredientes” básicos de los modelos de diseño de redes son:

- Un conjunto N de nodos.
- Un conjunto A de arcos entre los nodos.
- Un conjunto de costes asignados a cada arco.
- Un nodo origen, O .
- Un nodo destino, D .
- Una demanda de viajes (R) entre O y D .

El modelo más sencillo es del tipo:

$$\text{Minimize } \phi(f, y) = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot f_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} F_{ij} \cdot y_{ij}$$

sujeto a:

$$\sum_{j \in N} f_{ij} - \sum_{l \in N} f_{li} = \begin{cases} R & \text{si } i = O \\ -R & \text{si } i = D \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$f_{ij} \leq K_{ij} \cdot y_{ij} \text{ para todo } (i, j) \in A$$

$$(f, y) \in S$$

$$f_{ij} \geq 0$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } (i, j) \in \text{red} \\ 1 & \text{si } (i, j) \notin \text{red} \end{cases}$$

siendo:

c_{ij} coste por viajero del arco (i, j) .

F_{ij} , coste fijo del arco (i, j) .

f_{ij} el flujo de viajeros entre cada arco (i, j) .

K_{ij} la capacidad máxima de cada uno de los arcos (i, j) .

S , es un conjunto que puede incluir restricciones sobre la topología de la red. Por ejemplo, "el arco (i, j) solo puede ser incluido en la red, si lo está el arco (r, s) : $y_{rs} \geq y_{ij}$ "; o "solo pueden ser tomados un máximo de dos arcos del conjunto $\{ (i, j), (p, q), (r, s) \}$: $y_{ij} + y_{pq} + y_{rs} \leq 2$ "; o "el arco (i, j) debe estar obligatoriamente incluido en la red: $y_{ij} = 1$ ".

Este problema general puede asimilarse a otros problemas de análisis y optimización de redes. Por ejemplo, en problemas en los que la capacidad de los arcos no es una limitación, no existe ningún tipo de restricción en el conjunto S , la demanda es completa (hay una demanda de viajes entre cada par de nodos) y la función objetivo es lineal, el problema se reduce a obtener el árbol generador mínimo (*minimal spanning tree*), si los c_{ij} son nulos; si los costes fijos (F_{ij}) son nulos se resolverá mediante un algoritmo que obtenga el camino más corto (*shortest path*); o bien, si existen los dos tipos de coste, pero suponemos $F_{ij} = F$, para todos los arcos (i, j) , el problema se asemeja al conocido problema del viajante (*Traveling Salesman Problem*).

En general, siempre que alguno de los dos costes definidos, c_{ij} o F_{ij} , sea dominante, y no existan restricciones en la carga ni en la dirección de los arcos, el problema puede ser fácilmente resuelto por algoritmos muy eficientes.

Cuando son muchos los nodos y arcos que intervienen en el problema se suele recurrir para su resolución a heurísticos. La mayoría de ellos se pueden catalogar en tres tipos: aquellos en los que en cada iteración se añade el arco que supone un menor incremento en el coste; otros, parten de un diseño que contiene a todos los arcos, eliminándose uno en cada iteración; y aquellos en los que partiendo de una configuración inicial, se añade y/o elimina un arco, buscando la minimización del coste de la red.

Continuando en esta línea, es importante hacer referencia a los estudios sobre el diseño de redes jerárquicas, en las que John R. Current (profesor de la Universidad de Ohio) es uno de los principales investigadores. El diseño de redes jerárquicas consiste en crear una red de coste mínimo que contenga un camino principal entre un nodo inicial y otro final fijados de antemano (ésta podría ser una línea de metro) y una serie de rutas secundarias, que unan el

resto de nodos que no pertenezcan al camino primario, con éste. (La introducción de dos tipos de costes: primario y secundario para cada arco, es la principal diferencia con el conocido problema del viajante). Este problema es resuelto por un heurístico que combina la resolución de dos problemas: hallar el camino más corto (de menor coste primario) entre los nodos inicial y final para obtener la ruta principal o primaria (*shortest path*); y el árbol generador mínimo (*minimum spanning tree*) para crear rutas secundarias que unan el resto de nodos con el camino principal. El proceso se repite para los k caminos de menor coste primario entre los nodos fijados como origen y destino. Finalmente se tomará aquella red que proporcione un coste menor total (coste del camino primario, más coste de los caminos secundarios).

Este tipo de problemas conocidos como HNDP (*Hierarchical Network Design Problem*) son modelados basándose en una serie de suposiciones básicas:

1. Existe una demanda para cada nodo.
2. La demanda de todos los nodos debe ser satisfecha.
3. La demanda se considera satisfecha si todos los nodos están integrados en el camino principal, o unidos a éste mediante una ruta secundaria.
4. todos los arcos que unen los nodos tienen un coste no negativo.

Un modelado básico sería:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i \sum_j C_{i,j} \cdot X_{i,j} + \sum_i \sum_j C'_{i,j} \cdot Y_{i,j} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N_o} X_{o,j} = 1. \quad (2)$$

$$\sum_{i \in M_D} X_{i,D} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in M_j} X_{i,j} - \sum_{k \in N_j} X_{j,k} = 0, \forall j, j \neq O, D \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N_i} X_{i,j} + \sum_{j \in N_i} Y_{i,j} = 1, \quad \forall i, \quad i \neq O, D \quad (5)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} X_{i,j} + \sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} Y_{i,j} \leq |Q| - 1$$

$$\forall Q \subseteq V \text{ tal que } |Q| \geq 2 \quad (6)$$

$$X_{i,j} = (0,1) \quad \forall (i, j) \quad (7)$$

$$Y_{i,j} = (0,1) \quad \forall (i, j) \quad (8)$$

donde:

$C_{i,j}$ = coste primario del arco que une el nodo i con el nodo j .

$C'_{i,j}$ = coste secundario del arco que une el nodo i con el nodo j .

$X_{i,j} = 1$, si i y j son conectados por un arco principal (primario).

0, en caso contrario.

$Y_{i,j} = 1$, si i y j son conectados por un arco secundario.

0, en caso contrario.

$N_i = \{j \mid \text{el arco } (i, j) \text{ existe}\}$. Conjunto de nodos j posteriores a i .

$M_j = \{i \mid \text{el arco } (i, j) \text{ existe}\}$. Conjunto de nodos i anteriores a j .

Nodo O = nodo origen.

Nodo D = nodo destino.

V = Conjunto de nodos.

Q = Subconjunto no vacío de V .

$|Q|$ = cardinal del subconjunto Q .

Las restricciones (2) y (3) respectivamente, aseguran que el nodo origen y el nodo destino están sobre el camino primario.

El conjunto de restricciones (4), asegura que si un arco primario entra en el nodo j saldrá de él otro arco primario, a menos que j sea el nodo origen o el nodo destino.

Las restricciones (5), garantizan que todos los nodos están conectados por un arco primario o por uno secundario.

La restricción (6) evita que aparezcan ciclos cerrados en la creación de las rutas que puedan evitar que dos o más nodos se unan al camino primario.

Aunque resultan interesantes los estudios sobre redes jerárquicas realizados por John R. Current para “sumergirnos” en el tema que nos incumbe: la creación de rutas óptimas; su aplicación a nuestro caso particular no resulta del todo adecuada, puesto que hay diferencias notables entre este problema y el nuestro. Nosotros disponemos de una línea principal fijada de antemano (que no debe ser creada entre un nodo origen y otro destino, como en el HNDP); en nuestro caso, no todos los nodos tienen por qué estar unidos a alguna ruta, y además no todas las rutas tienen por qué acabar en la ruta principal. Éstas son tres condiciones imprescindibles en los problemas HNDP.

Por lo tanto, y aunque son muchas las aplicaciones de este problema, este método no resulta el más adecuado para aplicarlo al caso que nos ocupa.

No debemos olvidar que aunque el algoritmo que pretendemos formular pretende la creación de rutas óptimas en situaciones bastante generales, la aplicación final del mismo se realizará sobre la ciudad de Sevilla, y por lo tanto es importante conocer los trabajos de aquellos investigadores que han dirigido más sus estudios al diseño de redes de transporte público urbano.

Las primeras formulaciones de este problema comenzaban con la idealización de la red y el territorio al que servían. Por ejemplo:

En 1979, Newell G. F., (*Institute of Transportation Studies, University of California*) analiza los costes que deben ser recogidos en la función objetivo que hay que tratar de minimizar, realizando una aplicación sobre una supuesta configuración mallada cuadrada. Tras realizar varios experimentos con distintas combinaciones de los costes: que los costes de transbordo sean muy elevados, que los costes de operación sean despreciables frente a otros costes, etc. concluye que trazar una red de rutas óptimas requeriría un elevadísimo número de datos y de cálculos; y que por lo tanto, no podemos optar más que a obtener una aproximación de la red.

Los costes que Newell analiza en su función objetivo, son:

- Coste de espera del pasajero:

$$C_{wj} = \gamma_w \cdot q_j \cdot h_j / 2$$

γ_w = coste de espera del pasajero por unidad de tiempo.

q_j = proporción de pasajeros que llega a la parada j para tomar el autobús.

h_j = frecuencia de paso por la parada j .

- Coste de acceso a las paradas:

$$C_{aj} = \gamma_a \cdot q'_j \cdot S_j$$

γ_a = coste de acceso a la parada, por persona y por unidad de distancia.

q'_j = proporción de pasajeros que llegan andando a la parada.

S_j = distancia media andada por pasajero.

- Coste de operación: se asume proporcional a la distancia recorrida.

$$C_{oj} = \gamma_o \cdot l_j / h_j$$

γ_o = coste por unidad de distancia recorrida.

l_j = longitud de ruta

h_j = frecuencia de paso.

- Coste del tiempo que el pasajero pasa en el autobús:

$C_{rj} = \gamma_r$ (coste por unidad de distancia recorrida en el autobús y por pasajero).

- Coste de transbordar:

$$C_{ij} = \gamma_t \cdot (q_j - q'_j)$$

γ_t = coste de transbordo.

La mayoría de estos costes no serán utilizados en nuestro problema, como ya se explicará más adelante, pero resulta interesante tener una idea sobre los costes que debieran ser tenidos en cuenta.

Otros estudios destacables en el diseño de redes de autobuses son los de Ceder, A., (Universidad de Haifa, Israel) y Wilson, N. (*Massachusetts Institute of Technology*), de 1985, en los que se divide el problema en varios niveles de complejidad para facilitar el manejo de los muchos factores externos implicados en el diseño de rutas de autobús. En concreto, ellos siguen una metodología de dos niveles. En el primero de ellos se realiza un análisis desde el punto de vista de los pasajeros, y en el segundo se contempla, además de a los pasajeros, al operador.

Otro estudio de gran interés en el diseño de rutas de autobuses, puesto que de él aprovecharemos algunas ideas, es el realizado por Silman, Barzil y Passy en 1974 (Universidad de Haifa, Israel), realizando una división de la ciudad en diferentes zonas, cada una con una demanda de viajes por satisfacer, considerando las zonas de un tamaño, tal que se pudiera considerar que si una ruta de autobús pasaba por ella, quedaba servida toda la zona. El tiempo de viaje entre zonas adyacentes era conocido, así como el número de viajeros entre las diferentes zonas. El procedimiento que ellos emplearon fue el de generar rutas basándose en “esqueletos” constituidos por una serie de nodos principales, que iban completándose con otros nodos que terminaban de definir la ruta.

Los últimos trabajos dirigidos al diseño de redes de autobuses, van enfocados a la utilización de algoritmos genéticos (Ngamchai y Novell, y López Lois, 2000), que son algoritmos probabilísticos. Desde un nodo inicial (escogido al azar), y mediante un método de ramificación (hacia nodos que pertenezcan a otras rutas, para garantizar los transbordos entre ambas) son creadas varias

rutas aleatoriamente. La utilización de parámetros de “mutación” y de “cruce” son empleados posteriormente para la obtención de redes.

El diseño de una red de autobuses está muy relacionado a la existencia, o no, de otros sistemas de transporte público. Es por esto, que muchos de los estudios se orientan a la creación de rutas que alimenten a líneas férreas o metros, en general denominadas líneas principales. Son muchos los estudios que pueden ser mostrados en este sentido, uno de los primeros es el realizado por Byrne y Vuchic en 1972, que analizaban el espaciado óptimo entre líneas de autobús realizando un equilibrio entre el coste de acceso a las paradas y el coste de operación; y la frecuencia de los mismos equilibrando los costes de espera con los de operación, sobre un sistema de líneas paralelas que alimentaban a una línea principal perpendicular a las anteriores. Más tarde, en 1975, el mismo Byrne extendió el trabajo a líneas de autobuses radiales que alimentaban a un solo punto. Sin embargo, las fórmulas empleadas eran complejas y suponían elevados tiempos de computación.

Hurdle (Universidad de Toronto), en 1975, analizó geometrías similares realizando aproximaciones que proporcionaban fórmulas más simples, incorporando la idea de la división de la ciudad en zonas.

Wiransinghe (Universidad de Calgary), Hurdle y Newell (1977), estudian un modelo de ciudad en la que existe un pequeño centro de negocios, destino de la mayor parte de los viajeros y al que llegan una serie de líneas principales. Tratando de minimizar el coste total del operador y de los pasajeros, investigan si es más interesante trazar líneas de autobús que alimenten a las rutas principales, o trazar líneas de autobús que vayan directamente al centro de negocios.

Más recientes son los estudios de Martins y Vaz Pato, de la Universidad de Lisboa (1996), en el que se nos muestra un procedimiento para crear rutas que unan una serie de paradas localizadas de antemano (debiendo estar todas servidas por una única ruta) con una línea principal también fija; incluyendo restricciones en la longitud y la capacidad de ruta. La función objetivo que se intenta minimizar recoge el coste del usuario (coste de espera y coste del

tiempo de viaje) y coste del operador (dependiendo fundamentalmente de la longitud de la ruta).

Una vez definidas las rutas de autobús sobre la ciudad, otro aspecto interesante es el de la localización de paradas sobre las mismas, en este sentido podemos destacar algunos estudios como los de Gleason, de la Universidad Técnica de Texas; y los de S.C. Wiransinghe y Nadia S. Ghoneim, de la Universidad de Calgary (1975 y 1981, respectivamente) que van dirigidos a la localización y espaciado óptimo de las paradas situadas sobre una línea de autobús, tales que se minimicen los tiempos de acceso y de viaje del usuario, así como los del operador.

Anita Schöbel, de la Universidad de Kaiserslauten, realiza un estudio en este sentido (2002), planteando un problema bicriterio: la situación de paradas de autobús con el objetivo de maximizar la cobertura con el mínimo número de paradas posibles. Evidentemente, cuantas más paradas sean localizadas mayor será el número de viajeros captados, puesto que se facilita el acceso a las líneas correspondientes; pero, por otro lado, aumentan los tiempos de transporte (se calcula que una parada situada en una línea férrea supone un incremento en el tiempo de viaje de al menos 2 minutos), además de los costes fijos adicionales que para la empresa operadora supone establecer una nueva parada.

El último eslabón en estos estudios corresponden a los realizados, en lo que en el modelo de transportes se conoce como la etapa de asignación (ver capítulo 3), donde se estudia el reparto de carga entre las diferentes rutas que han sido creadas, pues en muchos casos, un viajero puede llegar a su destino por diferentes caminos. Belgacem Bouzaiene-Ayari, Michel Gendreu y Sang Nguyen (2001), de la Universidad de Montreal, proponen un análisis de los tiempos de viaje y los tiempos de espera del usuario del autobús para obtener respuestas aproximadas al itinerario que deben seguir los viajeros. En estos modelos, llamados “de equilibrio” es requisito imprescindible el conocimiento de los costes; es por esto que estos modelos se suelen apoyar en modelos de distribución y modelos de tiempos de espera.

Los modelos de distribución tienen la forma general:

$$v_{\delta l} = v_{\delta} \cdot \frac{\xi_l}{\sum_{l' \in L_{\delta}} \xi_{l'}} \quad \forall l \in L_{\delta}, \quad \forall \delta \in \Delta$$

donde:

ξ_l : es un *factor de atracción* positivo asociado con la línea l , $\forall l \in L$.

L , conjunto de líneas que sirven una parada determinada.

Δ : conjunto de pasajeros que llegan a una parada determinada.

v_{δ} : flujo de pasajeros del tipo $\delta \in \Delta$; $0 < v_{\delta} < +\infty, \forall \delta \in \Delta$.

L_{δ} , subconjunto de líneas demandadas por los pasajeros del tipo $\delta \in \Delta$; $L_{\delta} \subseteq L$; $L_{\delta} \neq \emptyset, \forall \delta \in \Delta$.

$v_{\delta l}$: flujo de pasajeros del tipo δ , sobre la línea $l \in L_{\delta}$.

El factor de atracción ξ_l , será determinado por cada modelo. En la práctica, el más comúnmente usado es el denominado *frequency share model* (FSM), donde se supone que el flujo de pasajeros de cada parada se distribuye en proporción a la frecuencia de paso de cada línea: $\xi_l = f_l, \forall l \in L$, siendo f_l , la frecuencia media de cada de la línea l .

Respecto a los modelos de espera, pueden ser clasificados según estudiemos redes muy, o poco, congestionadas.

Un modelo básico, suponiendo que no hay límite en la capacidad de las líneas es:

$$W_{\delta} = \frac{1}{\sum_{l' \in L_{\delta}} f_{l'}}, \quad \forall \delta \in \Delta$$

No nos interesa profundizar más en estos estudios, pues no aportarán nada significativo a la resolución de nuestro problema. Sin embargo, nos parece interesante mencionar estas investigaciones con la intención de mostrar

la amplitud del tema que se nos presenta. Es por ello que habrá que saber acotar y tomar aquellos elementos que puedan ser de utilidad.

En general, podemos concluir que la mayoría de los trabajos analizados suponen una demanda fija, parámetros de diseño limitados y el objetivo de minimizar el coste total soportado por el usuario y el explotador de la red de autobuses. Todos estos métodos son adecuados para proporcionar criterios aproximados de diseño y no una estructura concreta de red.

La demanda puede ser considerada fija e independiente de la calidad de servicio ofertada entre cualquier par origen-destino (inelástica), o como variable en respuesta al diseño de la red. Aunque la consideración de demanda variable resulta más atractiva, parece más apropiado (o cuando menos, más prudente) concentrarse en el impacto que un nuevo servicio ocasiona sobre los usuarios actuales que en los que una mejora en el servicio pueda inducir. Por esta razón y por la menor complejidad que la consideración como demanda inelástica supone, suele preferirse ese tratamiento especialmente durante la fase de diseño.

Las funciones objetivo plantean, básicamente, la minimización del coste total de transporte, es decir, una combinación del coste soportado por el usuario y el operador. El primero queda capturado, frecuentemente, por el tiempo total de viaje en que incurren los usuarios del servicio, mientras que el coste para el operador puede representarse a partir del número total de vehículos necesarios para materializar una configuración particular. En otros muchos casos, el coste del operador también se ve afectado por el tiempo que se tarda en recorrer toda la ruta.

Las restricciones de factibilidad pueden incluir mínimas frecuencias de paso en todas o en algunas rutas seleccionadas, un factor de carga en cualquier línea y un límite de tamaño de la flota.

Es por esto que la mayoría de las formulaciones existentes pueden representarse como variantes del siguiente programa matemático:

Minimizar $\{ w_1 \cdot [\text{Costes de usuario}] + w_2 \cdot [\text{Costes de operador}] \}$

Sujeto a las mencionadas restricciones.

Se ha de notar que variando los coeficientes w_1 y w_2 es posible generar varias configuraciones alcanzando diferentes compromisos entre los dos objetivos considerados.

Respecto de los métodos de solución existentes, observamos una gran diversidad. Sin embargo, prácticamente todos ellos dividen el problema en dos etapas: Diseño de rutas y determinación de frecuencias. Esto es esencial a causa de la complejidad del problema en su conjunto. En general, todos los procedimientos utilizan un proceso de generación de rutas “básicas” a partir de varios nodos terminales, introduciendo seguidamente nodos intermedios hasta definirla completamente. A continuación se selecciona aquella que proporciona la contribución marginal mayor a la función objetivo, y se itera (ampliando el conjunto de rutas seleccionadas) hasta que se cumpla algún criterio de convergencia.

En general, los diferentes métodos presentados no han tenido una utilización significativa. De hecho, el gran número de datos necesarios para su implementación ha dificultado su puesta en práctica.

Es seguro, que la amplitud del campo sobre el que vamos a trabajar es tal, que muchos trabajos e investigadores habrán quedado sin mencionar en estas líneas, sin embargo sí nos sirve para obtener una primera aproximación a la Ingeniería del Transporte.

Las particularidades y simplificaciones que pretendemos darle a nuestro estudio no nos permiten utilizar directamente ninguno de los modelos de los estudiados anteriormente, pero de los que sí podemos extraer algunas aportaciones interesantes. En el siguiente apartado se comenta cuáles son, y nos centramos más en la formulación de nuestro problema.

1.4 FORMULACIÓN PROPUESTA.

Hasta el momento, se ha presentado someramente algunos de los trabajos realizados por los investigadores más prestigiosos en el estudio del diseño de rutas de transporte.

Algunas de sus ideas serán utilizadas para resolver el problema que será planteado a continuación; pero en este proyecto se diseñará un algoritmo propio que intentará obtener la mejor red de rutas de transporte posible. El por qué de no implementar directamente alguno de los algoritmos propuestos por los anteriores investigadores, tiene varias respuestas: la razón principal estriba en la peculiaridad de la función objetivo que pretende ser empleada en este proyecto; así como en las restricciones particulares de este trabajo con el propósito principal de reducir en la medida de lo posible las dificultades en la implementación del algoritmo, intentando no renunciar a la bondad de las soluciones que se obtengan.

Como se ha comentado anteriormente, la mayoría de las funciones objetivo planteadas hasta el momento están enfocadas a minimizar el coste total de transporte, es decir, una combinación del coste soportado por el usuario y el operador. En este proyecto se pretende modificar esta función objetivo de manera significativa: la principal diferencia es la importancia fundamental que se le va a dar al hecho de maximizar la cobertura, es decir, las rutas deberán estar diseñadas de tal modo que se maximice el número de viajeros transportados. Pero, por supuesto, no es posible dejar de lado la importancia que tiene la minimización de los costes de transporte. Sin embargo, éstos también van a ser tratados de un modo especial a como se venía haciendo hasta el momento, y es, que el objetivo de tratar de minimizar el coste del usuario, entendiéndose por esto, la minimización de los tiempos de espera, viaje, así como las incomodidades de posibles transbordos, van a ser tenidos en cuenta de una manera implícita dentro de las restricciones y del propio objetivo de maximizar la cobertura. Obsérvese, que el hecho de maximizar el número de viajeros tiene una relación bastante directa con que se minimicen los tiempos de viaje. Además, de esta forma se evita una formulación más explícita que seguramente llevaría a una paradoja como la

que supone que, una menor demanda de viajeros satisfecha provoca una disminución de los tiempos de viaje (puesto que estos se entienden como el producto del número total de viajeros por el tiempo de viaje), y por lo tanto, interesaría captar menos viajeros para así disminuir el tiempo de viaje; pero sin embargo una disminución de los tiempos de viajes debería proporcionarnos más viajeros captados.

Por lo tanto, la minimización del coste de viaje del usuario será asimilado por el objetivo de maximización de la captación y por las restricciones en la creación de rutas que son detalladas posteriormente.

En cuanto a los otros costes de usuario:

El coste de espera: Como se explicó anteriormente, el problema de la frecuencia y del diseño de rutas suelen ser tratados separadamente, primero se diseñan las rutas y luego se establece la frecuencia. La finalidad de este proyecto es la de diseñar el conjunto de rutas óptimas y no su frecuencia (que sería un problema posterior), es por esto que los tiempos de espera no son analizados. El hecho de no trabajar con frecuencias nos lleva a hacer suposiciones que simplifican nuestro problema. Por ejemplo, en el momento de hallar las cargas soportadas por las rutas, no utilizaremos modelos de equilibrio para repartir la carga entre diferentes líneas que unen un mismo origen y destino; sino que será repartida a partes iguales entre las rutas. Esto es una suposición que creemos bastante real en el caso de la aplicación de Sevilla, donde las rutas de autobús no son muy largas, y por lo tanto no será normal que existan grandes diferencias en los tiempos de viaje entre dos itinerarios que unan un mismo par origen-destino. Además puesto que no trabajamos con frecuencias, suponemos que éstas son equivalentes para todas las rutas que sean creadas.

El coste de transbordo: Esto es otra diferencia con las formulaciones clásicas, ya que el transbordo será introducido como una restricción. En este caso, sí se puede decir que se particularizará un poco más en el caso concreto de la ciudad en la que se pretende probar este algoritmo, Sevilla. Puesto que, tal y como parecen indicar los estudios realizados, normalmente, un viajero no utilizará el transporte urbano si para llegar desde un origen a su destino, ambos

en la propia ciudad, debe realizar más de un transbordo. Por lo tanto, el número de transbordos será limitado a uno.

En cuanto al coste del operador, se formulará de una forma clásica, estableciendo una proporcionalidad entre éste y la longitud de la ruta. Por lo tanto, cuanto menor sea la longitud de la misma, menor será el coste del operador. Además esto también afecta implícitamente al usuario, que preferirá rutas más cortas por cuanto implica, en principio, menores tiempos de viaje (el hecho de suponer una velocidad de circulación constante de los autobuses nos permite trabajar con tiempos de viaje o distancias, según prefiramos).

Tal y como aconsejan los estudios realizados sobre el tema hasta el momento, la demanda se considerará fija e independiente de la calidad de servicio ofertada entre cualquier par origen-destino. Si bien, con la intención de aproximarnos algo más a una realidad que tenga en cuenta la *utilidad temporal* (el hecho de que la demanda dependa de la calidad del servicio), se obliga a que entre los nodos de mayor flujo (que como se verá posteriormente, son las que inician la creación de una ruta) no haya más de un número determinado de nodos. Así, de algún modo se pretende justificar que la demanda, al menos en estas rutas, apenas se vea modificada.

Además, tratando de dar más realismo al modelo, el número de usuarios que viaja entre dos puntos se verá reducido si está obligado a realizar algún transbordo. Así, si se quiere satisfacer completamente la demanda entre dos zonas, éstas deberán estar comunicados por una ruta que los una directamente (esto es también de obligado cumplimiento entre los nodos de mayor flujo de las principales rutas).

En este sentido, cabe mencionar otra peculiaridad del problema que se pretende formular, el de la existencia de rutas principales ya establecidas (líneas de metro, en la aplicación que se hará al final de este proyecto). Lógicamente, el usuario siempre preferirá viajar en una línea principal (metro), que en una secundaria (autobús); o realizar un transbordo de metro que de autobús; y esto también se verá reflejado en el algoritmo.

Hay otra restricción en el problema que aún no ha sido mencionada, ésta es la longitud de ruta. Todas las rutas tendrán limitada su longitud máxima de

trayecto. Esta restricción será la que, en la mayoría de los casos, haga que se finalice el proceso de creación de una ruta. Es obvia la necesidad de establecer un límite en la longitud de las rutas, pues tanto desde el punto de vista del usuario como del operador, no es concebible una longitud de ruta excesiva que supondría elevados tiempos de viaje.

Resumiendo:

Conocido el número de viajes que se desean llevar a cabo entre los diferentes nodos que ya han sido fijados sobre una determinada área, se pretende diseñar un conjunto de rutas, de manera que se maximice la cobertura, a la vez que se minimiza el coste del operador (o la longitud de las rutas).

Entre las restricciones habrá que tener en cuenta que las rutas no superen una longitud máxima, que entre las paradas que inician la creación de las rutas con más carga de viajeros no haya más de un número determinado de paradas, y que sólo se permita un transbordo para considerar satisfecha (aunque afectada por un coeficiente de corrección) una demanda origen-destino; así, como la prioridad que se concede a un transbordo de metro sobre uno de autobús (en el caso concreto del estudio del transporte urbano).

Ni la carga, ni la frecuencia de ruta supondrán ningún tipo de problema o restricción, puesto que no estableceremos limitación en el número de vehículos por ruta. Es decir, sólo nos interesa el trazado de las rutas. El número de vehículos necesarios para cumplir con frecuencias de paso, o impedir sobrecargas será un problema posterior.

El algoritmo empleado será detallado más adelante, si bien, indicar que el procedimiento de resolución empleado, se basa en los métodos utilizados por la mayoría de los investigadores que han realizado estudios sobre este tema, y es el de comenzar generando rutas básicas a partir de varios nodos terminales, e ir introduciendo seguidamente nodos intermedios hasta definir completamente la ruta.