

Capítulo 2.

Revisión de la Literatura.

2.1. Modelos para la optimización de recorridos y frecuencias.

Con este proyecto se centrará en la segunda fase del modelo de planificación de transporte. Por tanto, para poder obtener las tablas de tiempos, y la frecuencia de paso de los vehículos, se deberá sopesar premisas tales como, el mantenimiento de una calidad de servicio adecuada, minimización del número de autobuses necesarios, búsqueda de la agrupación por franja horaria. Por tanto, para tener una base de partida común a todos los experimentos que posteriormente se estudiarán, se necesitará tomar los resultados de los distintos modelos que sin tratar la sincronización de rutas, devuelven como resultado los datos necesarios para resolver nuestro problema.

Las primeras herramientas de diseño óptimo de rutas y frecuencias surgen en la década de los 70, basadas todas ellas, en ideas intuitivas, sin una formulación del modelo, y su función objetivo en algunos casos sin exploración del espacio de soluciones. En la década de los 80, se comienzan a formular algunas funciones objetivos, incorporándose además algunos parámetros como el cubrimiento de la demanda, factor de carga (proporción de pasajeros parados en proporción con el número de asientos) y transferencia de los buses. En la década de los 90 aparecen otros enfoques, como es la utilización de metaheurísticas y la exploración del espacio de soluciones.

La facilidad de integrar módulos existentes, y de incorporar interfaces gráficas, estimulan el desarrollo de nuevos métodos, los cuales se diferenciarán por su:

- **Adaptabilidad:** respecto a los datos disponibles, principalmente aquellos relativos a la topología de la red de tránsito, y a la demanda de viajes (matrices origen-destino).
- **Interactividad:** con el usuario, de tal forma que se permita la incorporación del conocimiento humano (técnico humano) en el proceso de toma de decisiones.
- **Eficiencia:** calidad en los resultados y en los tiempos de proceso.
- **Flexibilidad:** en cuanto al horizonte de planificación, los primeros métodos se refirieron a planificaciones a medio y corto plazo.

Se podrá realizar un desglose de los distintos modelos, de tal manera que vemos como cada uno de ellos, se ve caracterizado por su formulación; reflejando la función objetivo tanto los intereses del usuario como de los operadores (empresas de transporte). En general, los modelos presentados buscan la maximización del nivel de servicio, minimizando el uso de los recursos, atendiendo todo ello a una serie de restricciones.

Algunos de los modelos que resultarán útiles para la obtención del óptimo de frecuencia en las líneas de transportes, se presentarán en la siguiente tabla:

Autor (es)	Función Objetivo	Restricciones	Aportes	Limitaciones
Baaj y Mahmassani (1991)	Minimizar tiempos de transferencia y tamaño de flota	Frecuencia factible Factor de carga Tamaño de flota	Varios parámetros configurables	Coefficientes de conversión en fin. Objetivo
Israeli y Ceder (1993)	Minimizar tiempos de transferencia y tamaño de flota (multiobjetivo)	No especificadas	Formulación multiobjetivo	
Ngamchai y Lovell (2000)	Minimizar tiempos de transferencia y tamaño de flota (detallado)	Factor de carga	Modelo detallado, frecuencias óptimas	Coefficientes de conversión en fin. Objetivo
Gruttner, Pinminghoff, Tudela y Díaz (2002)	Maximizar beneficios de operador y minimizar costos de usuario	Distancia de acceso y egreso (a origen y destino)	Modelo alternativo de asignación (logia)	Falta tratamiento de frecuencia y flota. Coefficientes de conversión en fin. Objetivo

Figura 2.1. Cuadro resumen de los distintos modelos

Una vez que se tenga una primera visión de todos los modelos que tratan la obtención de las tablas de tiempo, el diseño de redes, frecuencias y horarios; vamos a pasar a desglosar cada uno de ellos, para poder diferenciarlos, y establecer los distintos aportes que realizan.

2.1.1. Baaj y Mahmassani (1991).

En este modelo se plantea minimizar los tiempos totales de transferencia de pasajeros, así como el tamaño de la flota requerido, todo ello sujeto a restricciones de frecuencia, factor de carga y tamaño de la flota.

$$\min \left\{ C_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} t_{ij} + C_2 \sum_{k \in R} f_k t_k \right\}$$

sa

$$f_k \geq f_{\min} \quad \forall k \in R \quad (\text{frecuencia factible})$$

$$LF_k = \frac{(Q_k)_{\max}}{f_k CAP} \leq LF_{\max} \quad \forall k \in R \quad (\text{factor de carga})$$

$$\sum_{k \in R} N_k = \sum_{k \in R} f_k t_k \leq W \quad (\text{tamaño de flota})$$

dónde:

n : cantidad de nodos de la red;

d_{ij} : demanda (cantidad de viajes por unidad de tiempo) entre los nodos i y j ;

t_{ij} : tiempo total de viaje entre i y j (en vehículo, espera y transferencia, si existe);

N_k : cantidad de buses operando en la ruta k , $N_k = f_k T_k$;

t_{ij} : frecuencia de buses operando en la ruta k ;

f_{\min} : mínima frecuencia de buses permitida para toda ruta;

T_k : tiempo total de viaje de la ruta k ;

W : tamaño de la flota disponible (cantidad de buses por hora);

LF_k : factor de carga en la ruta k ;

$(Q_k)_{\max}$: máximo flujo por arco en la ruta k ;

CAP : capacidad de pasajeros sentados en los buses;

LF_{max} : máximo factor de carga permitido;

R : conjunto de rutas para una solución dada;

$C1$ y $C2$: factores de conversión y pesos relativos de los términos de la función objetivo.

2.1.2. Israelí y Ceder (1993).

Este modelo es muy similar al propuesto anteriormente, con la salvedad de que se formula como un problema de optimización multiobjetivos.

$$\begin{aligned} \min \quad & Z_1 = a_1 \sum_{i,j \in N} PH_{ij} + a_2 \sum_{i,j \in N} WH_{ij} + a_3 \sum_{r \in R} EH_r \\ \min \quad & Z_2 = FS \end{aligned}$$

PH_{ij} : cantidad de pasajeros/hora, entre los nodos i y j (mide el tiempo de viaje en vehículo de los pasajeros);

WH_{ij} : tiempo de espera de pasajeros entre los nodos i y j ;

EH_r : tiempo de viaje vacío, que refleja la utilización de los buses;

FS : tamaño de la flota;

R : conjunto de rutas para una solución dada;

$a1$, $a2$ y $a3$: pesos que reflejan la importancia relativa de los términos de la función $Z1$.

2.1.3. Ngamchai y Lovell (2000).

Este modelo tiene una formulación muy similar a la realizada por Baaj y Mahmassani, con la diferencia de que este modelo permita calcular frecuencias de rutas; aunque requiere el uso de coeficientes de conversión a la misma unidad (\$/hora) de todas las componentes de la función objetivo.

$$\min \{FC + UVC + UWC\}$$

donde

$$FC = \frac{2C_V}{V} \sum_{k=1}^R \frac{d_k}{h_k} \quad (\text{costo de la flota})$$

$$UVC = \frac{\gamma_V}{V} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} D_{ij} \quad (\text{costo de viaje en vehículo de los usuarios})$$

$$UWC = \frac{\gamma_w}{2} \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ijk} h_k \quad (\text{costo de espera de los usuarios})$$

con

m : cantidad de nodos de la red;

R : cantidad de rutas de una solución determinada;

CV : costo por hora de operación de los buses;

V : velocidad de los buses en la red;

dk : largo de la ruta k ;

q_{ij} : demanda entre los nodos i y j (cantidad de viajes por hora);

D_{ij} : largo de la ruta más corta seleccionada por los pasajeros viajando de i a j ;

α_{ijk} : $\alpha_{ijk} = 1$ si la ruta k utiliza el arco (i,j) , $\alpha_{ijk} = 0$ en caso contrario;

γ_v y γ_w : coeficientes que reflejan el valor subjetivo de los tiempos de viaje y espera;

hk : espaciamiento temporal del servicio operante en la ruta k (inverso de la frecuencia),

$$h_k = \min \left(\sqrt{\frac{4d_k C_v}{\gamma_w V \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ijk}}}, h_k^{\max} \right)$$

max
 donde h_k depende del factor de carga y del arco con mayor flujo en la ruta k .

2.1.4. Gruttner, Punninghoff, Tudela y Díaz (2002).

Este modelo difiere de todos los anteriores, en la especificación de las componentes del sistema, proponiendo un modelo de asignación alternativo, el cual usa el método logia mediante el cálculo de utilidades de cada línea, para cada par origen-destino (i,j). No se contemplan aspectos tales, como la determinación de frecuencias y dimensionamiento de flota; se requieren la utilización de coeficientes de conversión y de valores subjetivos del tiempo. La función objetivo del modelo es:

$$\max \{ \alpha FO(R_i) - \beta FU(R_i) \}$$

donde

R_i : i -ésima ruta válida ($R_i \in R$, conjunto de rutas válidas);

α y β : coeficientes que representan la importancia relativa de cada objetivo;

$FO = IO_L - CO_L$; (función de beneficio del operador)

$IO_L = AF_L T_L$ (ingreso operador)

$CO_L = Distancia_L K_L$ (costo operador)

AF_L : afluencia total de viajes que atrae la ruta L ;

T_L : tarifa cobrada por la línea L ;

K_L : costo unitario de operación por kilómetro;

$FU = CU_L = \sum_i \sum_j (\delta t_{ijL}^a + t_{ijL}^v + \eta t_{ijL}^e) \times VST \times V_{ijL}$ (función de costo del usuario)

$t_{ijL}^a, t_{ijL}^v, t_{ijL}^e$: los tiempos de acceso a la línea, de viaje y de espera respectivamente;

VST : valor subjetivo del tiempo;

V_{ijL} : número de viaje entre cada par origen-destino (i, j) que utilizan la línea L ;

δ y η : pesos relativos de los tiempos de acceso y espera con respecto al tiempo de viaje.

2.2. Algoritmos para la optimización de recorrido y frecuencias.

Cuando establecemos los algoritmos, vemos como estos parten de una solución inicial (conjunto de rutas), para luego ir mejorándola de forma iterativa, avanzando generalmente según tres fases bien diferenciadas:

- Generación.
- Evaluación.
- Mejora de soluciones.

2.2.1. Generación de Soluciones.

En esta fase se construye un conjunto de rutas que cubre la demanda, según distintos criterios, tales como camino más corto, aleatorio, etc. El cubrimiento puede ser total o parcial, en este último caso deberíamos especificar cuál es la proporción de demanda insatisfecha.

Las rutas deben estar fuertemente relacionadas con la estructura de la matriz origen-destino.

2.2.2. Evaluación de la solución.

Con la evaluación de la solución se ve implicado la resolución de la función objetivo. Cuando realicemos la elección del método, tendremos que tener en cuenta que existirá un compromiso entre eficiencia, y el nivel de agregación de los elementos del sistema. En la mayoría de los métodos, se consideran a los pasajeros a un alto nivel de agregación de tipo “cantidad de pasajeros para cada par origen-destino”.

2.2.3. Mejora de soluciones.

Esta mejora de soluciones se realiza a distintos niveles. Es en esta fase donde se aplican técnicas de búsqueda local y metaheurísticas.

2.2.3.1. Baaj y Mahmassani (1991)

Inicialmente se generará un conjunto de rutas, considerando la matriz origen-destino como principal y se encuentra los dos caminos más cortos entre un subconjunto de M pares de nodos de alta demanda, considerados en forma decreciente por su valor. Un parámetro de entrada especifica la proporción de demanda que se puede dejar sin satisfacer. Se insertan nodos adicionales en este esqueleto inicial de rutas, según reglas pre-establecidas. El procedimiento de generación se repite, variando parámetros, obteniendo soluciones a diferentes compromisos entre objetivos. La regla principal para asignar la demanda es el criterio de minimización de transferencias; para cada par (i, j) de nodos se chequea si es posible viajar sin transferencias. Si no es posible, las alternativas de viaje con 1 ó 2 transferencias son contempladas. Además, se asignan los flujos de pasajeros en cada arco de la red, y se determinan las frecuencias válidas que cumplen con el valor del factor de carga establecido.

Este procedimiento se repite hasta lograr convergencia (diferencia aceptada entre frecuencias de entrada y salida del algoritmo). Por otra parte la mejora de rutas opera en dos niveles bien diferenciados: cubrimiento del sistema (discontinuo de servicios con poca carga de pasajeros, o con rutas muy cortas) y estructura de las rutas (combinando o dividiendo rutas). La estrategia es ensayada con un caso de prueba generado por Mandl (1979). Otros dos trabajos de estos autores (Baaj y Mahmassani, 1990, 1994) utilizan como caso de estudio la red de 140 nodos de la ciudad de Austin (Texas, 500.000 habitantes aproximadamente).

Los algoritmos de estos autores tienen la ventaja de proveer cierto grado de interactividad para definir algunas restricciones y parámetros; es flexible por su modularidad, permite planificaciones tanto a mediano como largo plazo. Su principal limitación es que no propone una manera sistemática de variar los parámetros para generar diferentes soluciones.

2.2.3.2. Shih, Mahmassani y Baaj (1998)

Estos autores proponen una extensión del método anterior, de tal manera que se adecua de forma fiel a la planificación de servicios coordinados de transporte multimodal, con la modalidad de flota heterogénea. Se usan como base los mismos procedimientos heurísticos, agregándoles el concepto de centro de transferencia. La siguiente cuestión será, establecer un centro de transferencia, el cual se detecta en base a los datos de producción y atracción de viajes.

Una vez que se tengan detectados los centros, nos quedaría construir las rutas en base a ellos; de tal manera que para las rutas que pasen por los centros, las frecuencias se determinarán como múltiplos enteros de una frecuencia base, permitiendo una coordinación entre rutas que comparten centros de transferencia.

2.2.3.3. Israeli y Ceder (1993 y 1998)

Este algoritmo resuelve los problemas de ruta y de diseño de manera simultánea, en base al modelo, de programación no lineal, con variables mixtas, con múltiples objetivos.

Este modelo se resuelve en tres fases: primero se generan varios conjuntos de soluciones alternativas no dominadas, resolviendo un problema de cubrimientos de conjuntos; posteriormente se realiza un procedimiento de asignación, el cual determina las frecuencias. Para la exploración de soluciones se utiliza un método de búsqueda local, intentando no repetir soluciones ya encontradas, para no iniciar ciclos. Finalmente se evalúan y seleccionan las alternativas más adecuadas.

2.2.3.4. Pattnaik, Mohan, y Tom (1998)

Basándonos en el modelo de Baaj y Mahmassani (1991), el cual genera un conjunto de rutas en base a los caminos más cortos entre todo par de nodos y caminos alternativos.

Se utilizarán algoritmos genéticos para seleccionar subconjuntos del conjunto de rutas candidatas, siendo este un aporte en cuanto a la utilización de la metaheurística en la resolución del problema.

2.2.3.5. Ngamchai y Lovell (2000)

Este método genera ruta sin tener en cuenta la matriz de demandas, pero alcanzando a todos los nodos de la red. Al utilizar algoritmos genéticos, vemos como inicialmente crea una población de una cantidad determinada de conjuntos de rutas. En cada una de las iteraciones, se verá como un integrante es mejorado a través de la aplicación de una serie de operadores genéticos, cuya particularidad es que son específicos del problema, no utilizándose los estándares.

Para evaluar la función objetivo, se realiza a través de una formulación explícita que incluye los tiempos de viaje y espera para los pasajeros; así como el costo de operación de la flota.

Para calcular las frecuencias se busca la minimización de la función objetivo.

2.2.3.6. Rao, Muralidhar y Dhingra (2000)

Este enfoque se basa en el modelo de Baaj y Mahmassani (1991). Inicialmente se aplica un procedimiento de identificación de corredores, con lo que implica el cálculo de los caminos más cortos de todo par de nodos de la red, asignación de demandas a rutas y chequeo de restricciones de mínimo y máximo flujo de pasajeros en arcos. Con este procedimiento se obtendrá la identificación del conjunto de nodos que participará en el procedimiento de generación de rutas.

2.2.3.7. Caramia, Carotenuto, y Confessore (2001)

La metodología propuesta requiere de un conjunto inicial de rutas a ser mejoradas. Se utilizan algoritmos genéticos, donde la población es de cardinalidad prefijada, y cada gen corresponde a una línea.

2.2.3.8. Gruttner, Punninghoff, Tudela, y Díaz (2002)

Los autores utilizan los algoritmos genéticos en el sentido clásico, de tal forma que la asignación de pasajeros a rutas se efectúa por el método logia, calculando previamente la utilidad de cada línea para cada tipo de pasajero, y la evaluación de la calidad de las soluciones tiene en cuenta los tiempos de viaje y de espera.

La gran dificultad reside en la implementación de los operadores genéticos.

Autor(es)	Modelo	Generación	Evaluación	Mejora	Ensayos	Aportes	Limitaciones
Baaj y Mahmassani (1991)	Baaj y Mahmassani (1991)	Caminos más cortos entre pares de nodos de alta demanda	Asignación: mínima transferencias y tiempos	Combinación y división de rutas.	Red ficticia (15 nodos Mandl, 1979) Austin (140 nodos)	Modularización y parametrización	No hay exploración del dominio de parámetros
Shih, Mahmassani y Baaj (1998)	Baaj y Mahmassani (1991) Aumentado	Idem anterior	Idem anterior	Idem anterior	Austin (140 nodos)	Centros de transferencia y flota heterogénea	Idem anterior
Israelí y Ceder (1993 y 1998)	Israelí y Ceder (1993 y 1998)	Cubrimiento de conjuntos (heurística)	No especificada.	Búsqueda local con prevención de ciclos	Red ficticia(8 nodos)	Formulación, Optimización multiobjetivo	Caso de prueba pequeño
Pattmaik, Mohan y Tom (1998)	Baaj y Mahmassani (1991)	Exhaustivo, muchas rutas factibles	Idem Baaj y Mahmassani (1991)	Selección del subconjunto óptimo de rutas (A.Genéticos)	Madras (25 nodos)	Metaheurísticas para búsqueda eficiente	-----
Ngamchai y Novell (2000)	Ngamchai y Novell (2000)	Aleatoria	No especificada	Operadores genéticos específicos	Red ficticia(19 nodos)	Frecuencias óptimas, Procedimiento de mejora	Generación no tiene en cuenta la demanda
Rao, Muralidhar y Dhingra (2000)	Baaj y Mahmassani (1991)	Idem Baaj y Mahmassani, con identificación de corredores	Idem Baaj y Mahmassani (1991)	Optimización de rutas y frecuencias en dos fases (A.Genéticos)	Red ficticia (15 nodos Mandl, 1979)	Metaheurísticas para exploración del dominio de los parámetros	-----
Carami, Carotenuto y Confessore (2001)	No se especifica.	Rutas preestablecidas	Asignación "off-line". Evaluación con redes neuronales	Selección del subconjunto óptimo de rutas y determinación de frecuencias (A.Genéticos)	Parma (80 líneas)	Aplicable a planificación a corto y mediano plazo.	-----
Gruttner, Pinninghoff, Tudela y Díaz (2002)	Gruttner, Pinninghoff, Tudela y Díaz (2002)	Aleatoria	Asignación utilizando modelo logit	A.Genéticos en la estructura de las rutas	Los Ángeles (dimensión no especificada)	Implementación sencilla	Generación no tiene en cuenta la demanda

Figura 2.2. Modelos para el estudio del diseño y planificación del transporte.

