

Diseño de Rutas de Transporte Escolar con Ventanas Temporales Móviles

José Luis Moura, Ángel Ibeas
 Departamento de Transporte y Tecnología de Proyectos y Procesos, Universidad de Cantabria,
 Avda. De los Castros s/n, Código 39005, Santander, España
 Tel: (34 942) 201734; Fax: (34 942) 201703; E-mail: mourajl@unican.es

Luigi dell'Olio
 Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Burgos
 Campus San Amaro Edificio "La Milanera" C/ Villadiego s/n 09001 Burgos, España
 Tel: (34 947) 259411; E-mail: ldell@ubu.es

RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología para el diseño de un sistema de transporte escolar donde, además de definir las rutas, se determina la hora de entrada de cada colegio. Tradicionalmente los horarios de los colegios de una misma área son idénticos lo que implica la utilización de un gran número de autobuses. En este trabajo se ha propuesto la posibilidad de escalonar estas horas de entrada, con el objetivo de minimizar el número de autobuses y así reducir los enormes costes que actualmente supone para la administración. La metodología se fundamenta en: una primera fase donde se plantea un clásico problema de ruteo a través de Programación Lineal Entera Mixta y una segunda fase donde con un enfoque de programación binivel se trata de encontrar el vector de horas de entrada en los colegios, que cumpliendo las restricciones del problema, minimice los costes directos del sistema. En el nivel superior del problema de optimización binivel se evalúan los costes del sistema se plantea en base a un modelo desarrollado por los autores de asignación de costes a servicios de transporte escolar. En el nivel inferior se optimiza la combinación de rutas óptima para un mismo autobús.

Palabras clave: Ruteo de vehículos, Optimización, Costes de transporte escolar.

ABSTRACT

This article puts forward a methodology for designing a system for school transport which, apart from designing the routes, specifies the school opening times. Traditionally school time tables have always been identical in the same area meaning many buses have to be used at once. This work suggests staggering school opening times in order to minimize the number of buses and thereby reduce the enormous costs involved in running them. The methodology is based on: a first phase which addresses the classic routing problem using mixed integer lineal programming and a second phase which uses bi-level programming to find the vector for school opening times, which, when staying within the constraints of the problem, minimizes the direct costs of the system. At the upper level of the bi-level optimization problem an evaluation is made of the system costs based on a model developed by the authors assigning costs within school transport services. The lower level finds the best combination of optimum routes for the same bus.

Key words: Vehicle routing, Optimization, School transport costs.

1. INTRODUCCIÓN

Administrativamente el Transporte Escolar en España es un Transporte Público Regular Especial y es financiado por las Comunidades Autónomas mediante licitaciones públicas por curso escolar. Los Gobiernos Regionales (a través de los Departamentos o Consejerías de Educación) ponen a disposición de los estudiantes, el correspondiente transporte desde sus viviendas hasta los centros de educación.

Actualmente este servicio supone una pesada carga económica para las administraciones regionales, la cual ha llegado a extremos difíciles de asumir. En el caso de la Comunidad Autónoma de Cantabria los costes que ocasiona este servicio son altísimos. Para el curso 2004-2005 la cifra total de gastos ascendió a 10.399.720,59 euros, siendo el incremento porcentual respecto al año anterior del 15 %, pese a que el número de contratos no varió sustancialmente. Si esta cifra global se desglosa en gastos por jornada, este gasto diario es aproximadamente de 60.623,61 euros/día.

Uno de los motivos que provocan este elevado coste es la dificultad de explotar el autobús dedicado a servicios escolares en otros servicios a lo largo del día. A pesar de la corta duración de los servicios escolares, muchos empresarios amparándose en este problema asignan todos los costes diarios del autobús y del conductor a la concesión escolar.

Además del anterior problema, existen otros como: la rigidez de los horarios de entrada en los colegios, la existencia de rutas definidas históricamente sin ser sometidas a un proceso de optimización y la existencia de licitaciones públicas donde únicamente se presenta una empresa (previo acuerdo entre empresarios) forzando a la Administración a aceptar una propuesta económica por encima del coste real del servicio escolar.

Por ello, en base a ser conocedores de la problemática existente, desde el punto de vista de la administración y del empresario, se propone en este artículo un avance más hacia la definición de un sistema de transporte escolar que minimice los elevados costes que actualmente presenta. Para ello se afronta la posibilidad de modificar los horarios de entrada de los colegios, evitando que todos tengan la misma hora de entrada, tratando que un mismo autobús realice más de una ruta.

El artículo se organiza, además de esta introducción, en un segundo capítulo donde se detalla el funcionamiento del sistema actual de transporte escolar en la Comunidad Autónoma de Cantabria y su problemática; un tercer capítulo donde se presenta el modelo de costes desarrollado y que será implementado en el posterior modelo de optimización; un cuarto capítulo donde se presenta la metodología y el modelo de optimización propuesto para asistir en la definición del sistema de transporte escolar (definición de horas de cada colegio y diseño de rutas); y

finalmente un quinto capítulo con las conclusiones más interesantes de la presente investigación.

2. EL PROBLEMA

El sistema concesional actual de transporte escolar en la Comunidad Autónoma de Cantabria está basado en paquetes individuales definidos por una ruta y unas paradas donde el autobús recoge a los niños y los desplaza hasta el centro escolar. Este recorrido lo puede hacer 2 o 4 veces al día, dependiendo si el centro tiene un único turno de mañana o dos turnos, mañana y tarde. En definitiva por cada ruta se establece una concesión y el concurso pertinente.

Tal y como quedo reflejado en la introducción, la organización y gestión del transporte escolar en la Comunidad Autónoma de Cantabria es claramente factible de ser optimizado en cuanto a minimizar los altos costes que presenta, unos 10.399.720,59 euros para el curso 2004-2005, siendo el incremento porcentual respecto al año anterior del 15 %.

Estos incrementos principalmente son debidos a la asignación de los costes de toda la jornada a los servicios de transporte escolar, por parte de la empresa de transporte. Es decir, los costes directos, básicamente los de personal (conductor), rodadura y financieros (autobús), generados cuando el autobús y su conductor están presuntamente inactivos durante la jornada, se asignan a los pocos servicios de transporte escolar realizados durante el día, imputando a tales servicios costes que realmente no le son atribuibles.

Otro de los motivos que induce este elevado coste es la rigidez en los horarios de entrada en los colegios (hora estándar de entrada) imposibilitando que un autobús pueda realizar más de una ruta. Por esto último los contratos que la administración licita se refieren a un autobús realizando una ruta específica para un colegio determinado. Por lo tanto, el grado de aprovechamiento de recursos está lejos de ser el óptimo, agravándose aun más ante el hecho que ni siquiera para el caso actual (horarios rígidos) no ha sido optimizado el diseño de las rutas.

Por otro lado, se ha observado que las empresas de transporte de viajeros por carretera que desean optar a las licitaciones que periódicamente propone la Consejería de Educación del Gobierno de Cantabria, reaccionan estableciendo una serie de “presuntos acuerdos” entre ellas. En resumen, a cada licitación que la administración autonómica propone, existe una única empresa que se presenta, evidenciando por ello la falta de competitividad de mercado, quedando este sustancialmente distorsionado. Ante esta situación el papel de la administración pública es dificultoso ya que son conscientes que una situación de conflictividad del sector no es adecuado socialmente dado la especial sensibilidad ante problemas referentes al transporte escolar, y todo ello concluye en una negociación entre ambas partes hasta lograr el acuerdo.

Este grupo de investigación de la Universidad de Cantabria desarrollo un modelo de asignación de costes para servicios de transporte escolar para proporcionar a la Consejería de Educación del Gobierno de Cantabria, un coste real, según diferentes escenarios, para la negociación con el sector en la adjudicación de estos servicios. (Ibeas et al, 2006)

En base a todo lo anterior, y con el modelo de asignación de costes desarrollado, parece claro que modificaciones en las rutas y en los horarios de entradas de los colegios, puede ayudar a que un mismo autobús realice más de una ruta (pasando a ser concesiones por Lote de Rutas), reduciendo los costes totales del sistema. Por tanto, el objetivo de esta investigación es proponer un modelo de optimización que además de diseñar nuevas rutas reporte los horarios de entradas más adecuados de cada centro.

3. MODELO DE CÁLCULO DE COSTES

Como es conocido, los costes de una empresa de Transporte pueden clasificarse en Costes Directos (Variables y Fijos), que son los más importantes, más la parte correspondiente a los Costes Indirectos atribuidos al mismo y que en este caso se especifican en un porcentaje sobre los directos.

La clasificación de los costes directos considerados es:

- Fijos: Seguro del autobús, amortización del autobús y financiación del autobús.
- Variables: Conductores (personal), combustible, lubricantes, neumáticos y mantenimiento (materiales y mano de obra).

Para este modelo de determinación de costes, se ha elegido la unidad temporal “día o jornada”, ya que el servicio de transporte escolar está perfectamente definido y su prestación se repite cíclicamente a lo largo del año escolar durante 175 días y es la unidad más habitual para la determinación de costes de transporte escolar.

Las principales fases del planteamiento del modelo han sido:

1).- Definición de los costes unitarios de una empresa de transportes de viajeros por carretera:

Los costes directos totales de una empresa de transportes se dividen en tres principales epígrafes: los costes totales de rodadura, los costes totales de personal y resto de costes fijos asociados al vehículo. Una vez recopilado todos los costes anuales se procede a convertirlos en costes unitarios (por unidad de producción) asignando los costes de rodadura a los kilómetros totales realizados, los costes de personal a las horas de servicio producidas y los costes fijos al número de vehículos y horas, resultando una función de costes de la empresa de la siguiente forma:

- Número de kilómetros totales recorridos por la empresa = K
- Número de horas-hombre totales trabajadas por la empresa = H
- Número de días-bus de la empresa = B

$$Z_1 (\text{€}/\text{km}) = \frac{\text{Costes directos asignables a Kms.}}{\text{nº Kms realizados por la empresa}} = \frac{CR}{K} \quad (1)$$

$$Z_2 (\text{€}/\text{hora}) = \frac{\text{Costes directos asignables a horas}}{\text{nº horas de servicio}} = \frac{CP}{H} \quad (2)$$

$$Z_3 (\text{€}/\text{bus}) = \frac{\text{Costes directos asignables a vehículos}}{\text{nº de vehículos en la empresa}} = \frac{CF}{B} \quad (3)$$

Estos costes unitarios han sido calculados desagregados por tipología de autobús, de tal manera que para los costes de rodadura y costes fijos existe un coste unitarios por cada tipo de autobús. Los tipos de autobús han sido prefijados como combinación del tamaño y la edad del mismo.

2).- Asignación de los parámetros de coste que realiza cada servicio:

Una vez que se dispone de los costes unitarios, y bajo la hipótesis de que cada contrato puede estar formado por varios servicios (llevar a los estudiantes al colegio, recogerlos, volverlos a llevar y volverlos a recoger, son cuatro servicios y todos ellos son realizados con un solo autobús) resulta que cada licitación de cada contrato de transporte escolar se realiza para un solo autobús, siendo precisamente el autobús el objetivo de coste:

$$Z = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{CR_b}{K_b} \cdot k_i + \frac{CP}{H} \cdot h_i + \frac{CF_b}{B_b} \cdot h_i \right) \cdot s_i \right) \quad (4)$$

donde:

Z : Coste directo para i contratos asignados a un autobús.

$\frac{CR_b}{K_b}$: Coste unitario de rodadura para el autobús del tipo b.

$\frac{CP}{H}$: Coste unitario de personal.

$\frac{CF_b}{B_b}$: Coste unitario fijo para el autobús del tipo b.

k_i : Kilómetros en el contrato i (de un solo servicio)

h_i : Horas asignadas en el contrato i (de un solo servicio)

S_i : Número de servicios del contrato i (número de veces que repite la ruta al día)

El modelo desarrollado para la correcta determinación de los costes para los servicios de transporte escolar, además de considerar los costes directos anteriormente citados, considera los costes indirectos en base a un porcentaje de los costes directos y finalmente añade el correspondiente beneficio industrial (6%).

4. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA HORARIOS DE ENTRADAS Y RUTEO

4.1 Hipótesis Previas

El objetivo del modelo planteado es reorganizar las rutas de transporte escolar de un determinando área teniendo en cuenta la posibilidad de escalar horarios de entrada en los colegios.

Es por lo anterior, que para modelizar los costes se debe prefijar un posible rango de horas entre los cuales es factible que un colegio fije su hora de entrada. Actualmente la inmensa mayoría de colegios tienen su entrada a las 8:30 de la mañana. Se ha considerado oportuno hacer la ventana temporal de posibles horas de entrada entre las 8:00 y las 9:00 de la mañana.

Este último aspecto será una de las restricciones al problema de optimización, al igual que otras específicas de condiciones a cumplir por normativa del transporte escolar: una primera relativa al tiempo máximo de los niños en el autobús, fijada en una hora, y una segunda en relación al tiempo desde que el autobús llega al colegio hasta la hora de entada. Respecto de este último aspecto no hay un valor prefijado por la normativa, pero quedara fijado que no supere los 10 minutos y sea superior a los 2 minutos (valor obtenido de la observación del actual sistema).

Otra hipótesis importante a tener en cuenta es que es conocido el punto exacto donde se recoge a un niño y el colegio de destino. Esto es un dato de entrada y por tanto su posible

determinación óptima es una de las posibles líneas futuras de investigación. Asimismo, se considera que cada autobús en una ruta determinada únicamente puede transportar niños con destino final el colegio asociado a dicha ruta.

Por último, considerar la hipótesis de independencia del problema de ruteo de cada colegio con el problema general de combinación de horarios. Esta hipótesis es tomada para asegurar la consistencia con la metodología que se propone a continuación.

4.2 Enfoque del Modelo

Bajo la hipótesis de trabajar independientemente el problema de ruteo con el problema de determinación de horarios de entrada en los colegios, la metodología se estructura en dos fases (ver figura 1):

- Primera fase, donde se resuelve para cada centro escolar el problema de ruteo. Este problema toma como datos iniciales los puntos de recogida y la cantidad de niños a transportar hasta el colegio y reporta el número de rutas y sus recorridos.
- Segunda fase, en la cual a través de un problema de optimización binivel se obtiene la combinación de horarios de entrada de los colegios optima, para minimizar el número de autobuses necesario para satisfacer todas las rutas determinadas.

En definitiva consiste en trabajar en una primera fase en base a rutas y una segunda donde en función de una propuesta de horarios de entrada en los colegios (y cumpliendo todas las restricciones de horarios comentadas en el punto 4.1.) se combinen rutas por autobús.

El problema de optimización de la primera fase es de sobra conocido y no es objetivo de este artículo profundizar en su descripción, si bien en el siguiente epígrafe se hace una breve descripción del mismo. El segundo problema se aborda a través de un enfoque de optimización binivel, donde la función objetivo evalúa los costes directos totales del sistema.

En el nivel superior, un agente administrador prefija las horas de entrada a los colegios. Estas horas de entrada a los colegios son datos para el nivel inferior, donde junto con la información de las rutas de la primera fase, el problema reporta los autobuses totales (que siempre será un número igual o inferior al número de rutas obtenido en la primera fase). Una vez conocidos los autobuses necesarios y la información relativa a kilómetros y tiempos en los desplazamientos entre rutas, se calcula un valor del coste total del sistema.

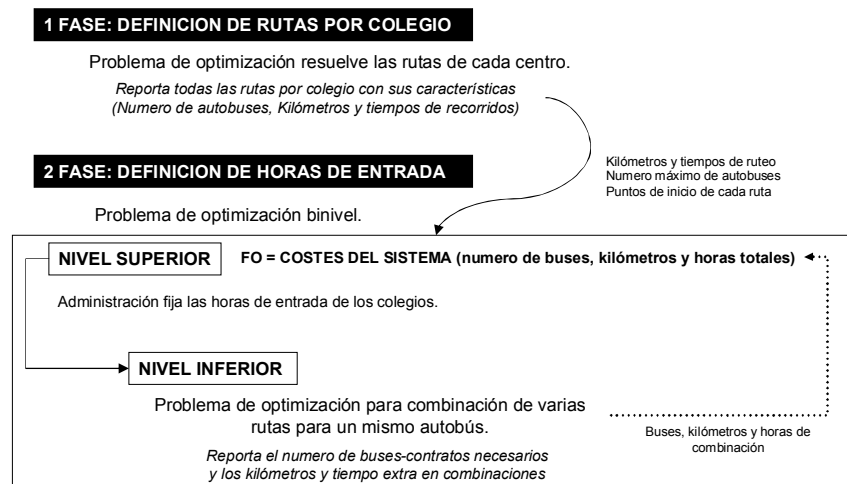


FIGURA 1: Enfoque Metodológico

4.3 Primera Fase: Optimización de Rutas

El problema de ruteo o el problema del viajante (también conocido como Problema del Vendedor Viajero PVV) es uno de los problemas más famosos (y quizás el mejor estudiado) en el campo de la optimización combinatoria computacional.

En pocas palabras este problema consiste en: dado un conjunto de ciudades o puntos, y unos costes de viaje entre todos los pares de ciudades o puntos, encontrar la forma menos costosa de visitar todas las ciudades o puntos exactamente una vez, y volver al punto de partida.

Existen multitud de autores que han trabajado en relación al problema del ruteo (Vehicle Routing Problem), problema de directa aplicación al caso del transporte escolar, y que por su extensión no se citan todos en este artículo (Fisher M. L. and Jaikumar R., 1981), (Solomon, M. et al, 1988), (Laporte, G., 1992) and (Cordeau, J.F et al, 2001).

Algunas referencias destacables relativas a optimización de sistemas de transporte escolar son: (Letchford A., 1996) donde se asignan contratos de transporte escolar a través de un problema de optimización entera, (Hanley P., 2007) donde se estudia la relación entre el tamaño de zona de influencia del colegio y los costes de operación y (Delgado C., 2001) que diseña rutas de transporte escolar con un problema de optimización minmax.

El problema de optimización se plantea de la siguiente manera (Ahuja et al, 1993); se dispone de k vehículos (numero conocido de antemano por conocer exactamente la demanda total del colegio) con capacidad C_k , que debe visitar n puntos i (el punto 1 es el colegio) que demandan una cantidad d_i . Por otro lado es conocido el coste de viaje entre todos los puntos de la red $c_{i,j}$.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j}^k \cdot c_{i,j} \quad (5)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k = y_{i,j} \quad \forall i=1,2,\dots,n, \quad \forall j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{i,j} = 1 \quad \forall i=2,\dots,n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{i,j} = 1 \quad \forall j=2,\dots,n \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{1,j} = K \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{i,1} = K \quad (10)$$

$$\sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^n d_i \cdot x_{i,j}^k \leq C_k \quad \forall k=1,2,\dots,K \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{i,j}^k \cdot (c_{i,j} + d_i \cdot t_u) \leq 60 \quad \forall k=1,2,\dots,K \quad (12)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} y_{i,j} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \subseteq \{2,\dots,n\} \quad (13)$$

$$y_{i,j} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall (i,j) \in A \quad (14)$$

$$x_{i,j}^k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall k=1,2,\dots,K \quad (15)$$

donde:

$x_{i,j}^k$: variable muda que toma valor 1 si el vehículo k atiende el punto j inmediatamente después del punto i .

$c_{i,j}$: coste de circulación entre el punto i y el punto j .

$y_{i,j}$: variable muda que toma valor 1 si entre el punto i y el punto j circula algún vehículo.

d_i : demanda de viajes en el punto i con destino el colegio (niños en la parada)

t_u : tiempo medio de subida por cada niño.

C_k : capacidad del vehículo k .

La función objetivo (5) de este problema minimiza los costes totales de viaje del sistema de rutas para atender la demanda del colegio.

El conjunto de restricciones (7), (8), (9) y (10) garantizan que al colegio (nodo 1) llegan los k autobuses necesarios para satisfacer la demanda total mientras que por otro lado aseguran que cada punto debe ser visitado por un único vehículo.

Por otro lado, el grupo de restricciones (11) y (12) aseguran el no sobrepasar la capacidad de los vehículos y los 60 minutos de duración de cada ruta, respectivamente.

Las restricciones (13) aseguran la no creación de subrutas y es conocida como *subtour breaking constraints* (Ahuja et al, 1993). Finalmente las restricciones (14) y (15) garantizan el carácter binaria de las variables $x_{i,j}^k$ y $y_{i,j}$.

Este problema de optimización planteado reporta como solución final las rutas necesarias para atender a la demanda del colegio cumpliendo las restricciones de capacidad de los vehículos y las restricciones de máximo tiempo de circulación y se aborda y se resuelve mediante Programación Lineal Entera Mixta, aunque también puede ser abordado con otras técnicas de resolución heurísticas o meta-heurísticas.

4.4 Segunda Fase: Combinación de Horarios

Dado que el objetivo del problema planteado es tratar que un mismo autobús realice más de una ruta, la función objetivo será minimizar el coste total de adjudicación de un sistema dado de servicios de transporte escolar. Por este motivo, como función objetivo, se utilizará la formula deducida en el modelo de costes.

Se ha optado por tratar el problema bajo un enfoque de programación binivel, donde en un nivel superior la administración fija las horas de entrada de los distintos colegios y en un nivel inferior se resuelve un problema de optimización donde se obtiene la combinación de rutas factible de que sean realizadas por un mismo vehículo. Este nivel inferior reporta el número de autobuses necesario y los kilómetros y tiempos extras en los desplazamientos entre rutas.

El modelo propuesto es el siguiente:

$$\text{Min.} \sum_{c=1}^C \left(\sum_{s=1}^S \left(\frac{CR_b}{K_b} \cdot k_{c,s} + \frac{CP}{H} \cdot h_{c,s} + \frac{CF_b}{B_b} \cdot h_{c,s} \right) \cdot n_{c,s} \right) +$$

$$\sum_k \sum_c \sum_i \left(\left(\frac{CR_b}{K_b} \cdot k_d + \frac{CP}{H} \cdot (H_{ini}^{k,i} - H_{fin}^{k,c}) + \frac{CF_b}{B_b} \cdot (H_{ini}^{k,i} - H_{fin}^{k,c}) \right) \cdot x_{c,i}^k \right) \quad (16)$$

$$\text{s.a.} \quad H_e^c = (H_{\min} \cdot H_{\max}) \quad \forall c=1,\dots,C \quad (17)$$

$$\text{Min.} \sum_k \sum_c \sum_i x_{c,i}^k \cdot c_{c,i} \quad (18)$$

$$x_{c,i}^k = \begin{cases} 1 & \text{si } (H_{ini}^{k,i} - H_{fin}^{k,c}) \geq c_{c,i} \\ 0 & \text{otro_caso} \end{cases}$$

s.a.

$$\forall c = 1, \dots, C, \forall i = 1, \dots, M \quad (19)$$

$$\sum_i x_{c,i}^k = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, K, \forall c = 1, \dots, C \quad (20)$$

$$\sum_c x_{c,i}^k = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, K, \forall i = 1, \dots, M \quad (21)$$

$$H_{fin}^{k,c} = (H_e^c - 10, H_e^c - 2) \quad \forall c = 1, \dots, C \quad (22)$$

$$H_{ini}^{k,i} = H_{fin}^{k,c} - T_c^k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (23)$$

donde:

$k_{c,s}$: kilómetros del servicio s en el contrato c .

$h_{c,s}$: tiempo del servicio s en el contrato c .

k_d : kilómetros de desplazamiento entre rutas.

H_e^c : hora de entrada del colegio c .

H_{min} : hora mínima de entrada al colegio (8:00 a.m.).

H_{max} : hora máxima de entrada al colegio (9:00 a.m.).

$x_{c,i}^k$: variable muda que toma valor 1 si entre el colegio c y el punto inicial de ruta i el tiempo de desplazamiento es inferior a la ventana temporal entre la hora de llegada al colegio c y la hora de inicio de la ruta k en el punto i .

$c_{c,i}$: tiempo de desplazamiento entre el colegio c y el punto inicial de ruta i .

$H_{ini}^{k,i}$: hora inicial de la ruta k en el punto de inicio i .

$H_{fin}^{k,c}$: hora final de la ruta k en el colegio c .

T_c^k : tiempo de la ruta k en el colegio c .

La función objetivo (16) de este problema de optimización binivel se compone de dos términos: i) la suma de todos los costes directos de cada una de las concesiones finales (recordando que son por autobús, es decir por lote) con su número correspondiente de servicios al día; y ii) los costes por desplazamiento entre dos rutas.

Tanto el número de concesiones (autobuses finales) como las distancias kilométricas y tiempos entre dos colegios son datos que devolverá el problema de optimización del nivel inferior, una vez se prefijen las horas de entrada de cada colegio. Estas horas deben estar entre una hora mínima y una hora máxima tal y como se plasma en la restricción (17).

El problema del nivel inferior se fundamenta en la creación de una red de arcos de posible potenciales conexiones entre colegios y puntos iniciales de rutas. Es por esto que de la primera fase, además de enumerar todas las rutas es importante conocer el punto inicial de las rutas. La función objetivo, es minimizar los tiempos de realización de estas combinaciones de rutas (18).

Esta red se creará en base a la posibilidad de desplazar un vehículo entre un colegio y un punto inicial de ruta permitiéndole realizar las dos rutas implicadas. El conjunto de restricciones (19) asegura la creación de esta red.

El grupo de restricciones (20) y (21) garantizan que finalmente de todas las posibles conexiones desde un colegio c para una ruta k hacia puntos iniciales de ruta, únicamente es posible tomar una. La restricción (22) controla que los autobuses o las rutas finalicen sus rutas en los colegios entre 10 y 2 minutos antes de la entrada al colegio. Finalmente la restricción (23) asigna la hora de inicio de todas las rutas como resta entre la hora de llegada al colegio y el tiempo de la ruta (dato de la primera fase)

4.5 Resolución del Problema

En cuanto a la forma de resolver el problema planteado y dadas sus especiales características, se ha decidido recurrir a métodos que no requieran cálculo de derivadas o hessianos de la función objetivo.

Dentro de estos métodos se encuentra el algoritmo de *Hooke-Jeeves*, entre cuyas ventajas destacan el no exigir ningún atributo especial de la función objetivo, lo que ha motivado su elección como algoritmo de búsqueda de la solución óptima (Barquin, M., 2001)

El algoritmo no requiere convexidad de dicha función ni una expresión analítica explícita de sus derivadas con respecto a las variables de decisión del problema. Si requiere que la función sea continua y evaluable para cualquier valor factible de las variables.

En definitiva y tal como se refleja en la figura 2, la resolución del problema anterior sigue los pasos:

Paso 1 – Resolver el problema de ruteo de cada colegio, almacenando la información de cada una de las rutas: kilómetros, tiempos y recorridos.

Paso 2 - Generar un vector de horas de entrada en colegios factibles H_c , que satisfaga las restricciones del problema del nivel superior.

Paso 3 – Resolver el problema de optimización del nivel inferior; obteniendo el numero de concesiones (autobuses) y los tiempos y distancias extras de desplazamiento entre rutas.

Paso 4 – Insertar los resultados del paso 1 y del paso 3 en la función objetivo del nivel superior y comparar en valor de la función objetivo con el de base.

Paso 5 – Repetir los pasos 2 a 4 hasta minimizar la función objetivo o alcanzar los criterios de parada del algoritmo de Hooke-Jeeves.

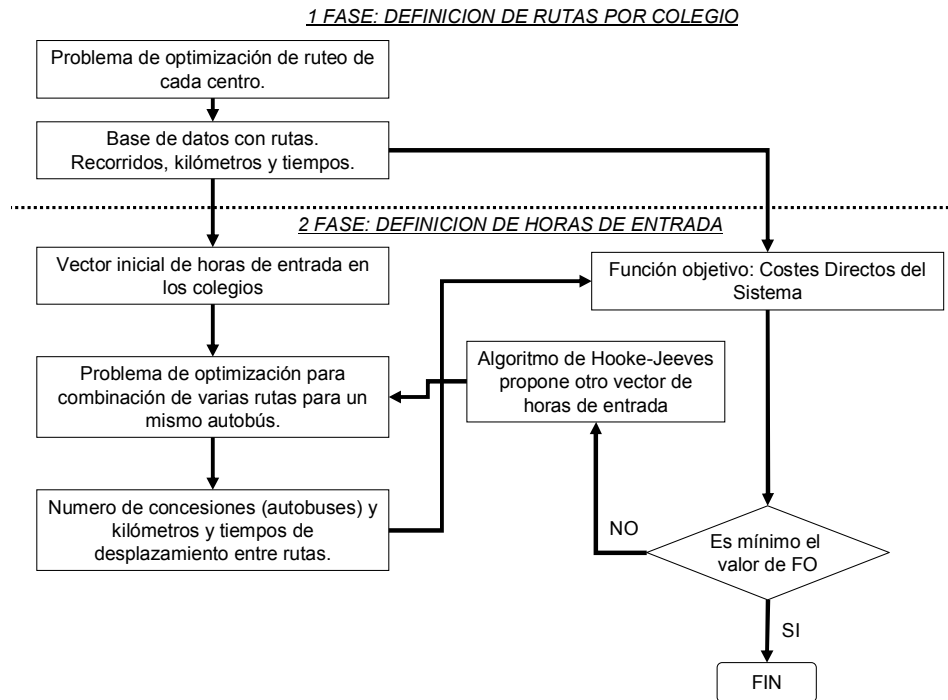


FIGURA 2: Resolución del Problema

5. CONCLUSIONES

La principal aportación de este trabajo es la posibilidad de modificar horas de entrada en los colegios, con lo que además de optimizar los recorridos de los autobuses para cada colegio se minimiza el número de estos, y por tanto se reducen los costes totales del sistema, al lograr que un autobús puede realizar más un contrato (servir más un colegio).

En cuanto a las hipótesis adoptadas hay que destacar que es conocido el punto exacto donde se recoge a un niño y el colegio de destino. Esto es un dato de entrada y por tanto su posible determinación óptima es una de las posibles líneas futuras de investigación.

Asimismo se ha considerado independencia entre el problema de ruteo de cada colegio con el problema general de combinación de horarios. Esta hipótesis es tomada para asegurar la consistencia con la metodología utilizada. Esta se comprende de dos fases: una primera fase donde se plantea un clásico problema de ruteo a través de Programación Lineal Entera Mixta y una segunda fase donde con un enfoque de programación binivel se trata de encontrar el vector de horas de entrada en los colegios, que cumpliendo las restricciones del problema, minimice los costes directos del sistema.

En cuanto al cambio horario de entrada en los colegios, este grupo investigador, consciente de su posible dificultad, está desarrollando paralelamente una investigación enfocada a la valoración de la disposición a recibir compensación económica, tanto los colegios como las asociaciones de padres, por aceptar una modificación de sus horarios. Es de esperar, que ambas investigaciones converjan con conclusiones sobre los posibles puntos de equilibrio entre ambos puntos de vista (administración-colectivo de padres y maestros)

Por último indicar que actualmente se está completando la aplicación del problema planteado para un área específica de la comunidad autónoma de Cantabria.

REFERENCIAS

- Ahuja, R.K., T.L. Magnanti y J.B. Orlin (1993) **Network Flows: Theory, algorithms and applications**. Prentice-Hall, New Jersey
- Barquin, M. (2001) **Diseño operacional de redes de transporte público: formulación matemática y algoritmos de solución**. Master os science thesis. Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile.
- Cordeau, J.F., G. Laporte y A. Mercier (2001) A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. **Journal of the operational research society**. Volume 52, Number 8, 928-936.
- Delgado, C. y J. Pacheco (2001) Minmax vehicle routing problems: application to school transport in the province of Burgos (Spain). **Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**, 505, 297-318.
- Fisher M. L. y R. Jaikumar (1981) A generalized assignment heuristics for vehicle routing. **Networks**, 11, 109-124
- Hanley, P. (2007) Transportation cost changes with statewide school district consolidation. **Socio-Economic Planning Sciences** 41, 163-179.
- Ibeas, A., J.L. Moura, L. Dell'Olio, J. de D. Ortuzar (2006) Costing School Transport in Spain. **Transportation Planning and Technology**, 29, 6, 483-501.
- Laporte, G. (1992) The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, Volume 59, Issue 3, 345-358.
- Letchford, A.N. (1996) Allocation of school bus contracts by integer programming. **Journal of the Operational Research Society** 47, 369-372.
- Solomon, M., E. Baker, J.R. Schaffer (1988). Vehicle routing and scheduling problems with time window constrains: efficient implementation of solution improvement procedures, **Vehicle Routing: Methods and studies**, 85-105.