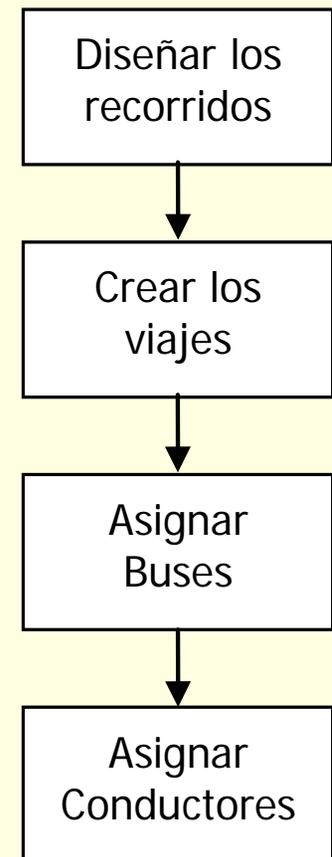

CI63G Planificación de Sistemas de Transporte Público Urbano

Clase 19
Semestre Otoño 2008

Descripción del Problema

- Proceso de planificación de cualquier empresa de transporte público:

1. Diseño de la red de transporte
 2. Diseño del horario de los buses (timetable)
 3. Asignación de los vehículos a los viajes (vehicle scheduling)
 4. Asignación de los conductores (driver scheduling)
- Etapa I {
- Etapa II {



Modelo entero mixto que resuelve

- Creación de los viajes (timetable)
 - Hora de inicio y fin de un viaje
 - Tipo de bus que realizará el viaje
 - Recorrido en el cual se debe hacer el viaje
- Asignación de los buses (vehicle scheduling)
 - Que bus asignar a un viaje determinado
 - Que hace ese bus luego de que realizó el viaje

Algoritmo de solución

- Adaptación de restricción local branching de Fischetti y Lodi
 - Restringe cambios en el valor de las variables dado un conjunto solución

$$\Delta(X, \tilde{X}) = \sum_{j:\tilde{X}_j=0} X_j + \sum_{j:\tilde{X}_j=1} (1 - X_j) \leq k$$

- Se aplica sobre conjunto de variables de salidas iniciales del horario punta
- Valores de k: 2, 4 y 6

Resolución del modelo

- Discretización del tiempo en intervalos de 2 minutos
- Restricciones de plazas y capacidad de terminal no permiten resolver el modelo por recorrido
- Consideraciones de resolución
 - Flota inicial determinada por horario punta
 - No se va de un terminal a otro
 - Un bus realiza siempre el mismo recorrido

Resolución del modelo

- Lenguaje de programación
 - Visual C++ 6.0
- Software de optimización
 - Solver Cplex 9.0
- Parametrización de Cplex
 - Enfoque en búsqueda de solución
- Procesador Pentium M 1,5 Ghz 512 MbRAM

Casos a resolver

- Caso I

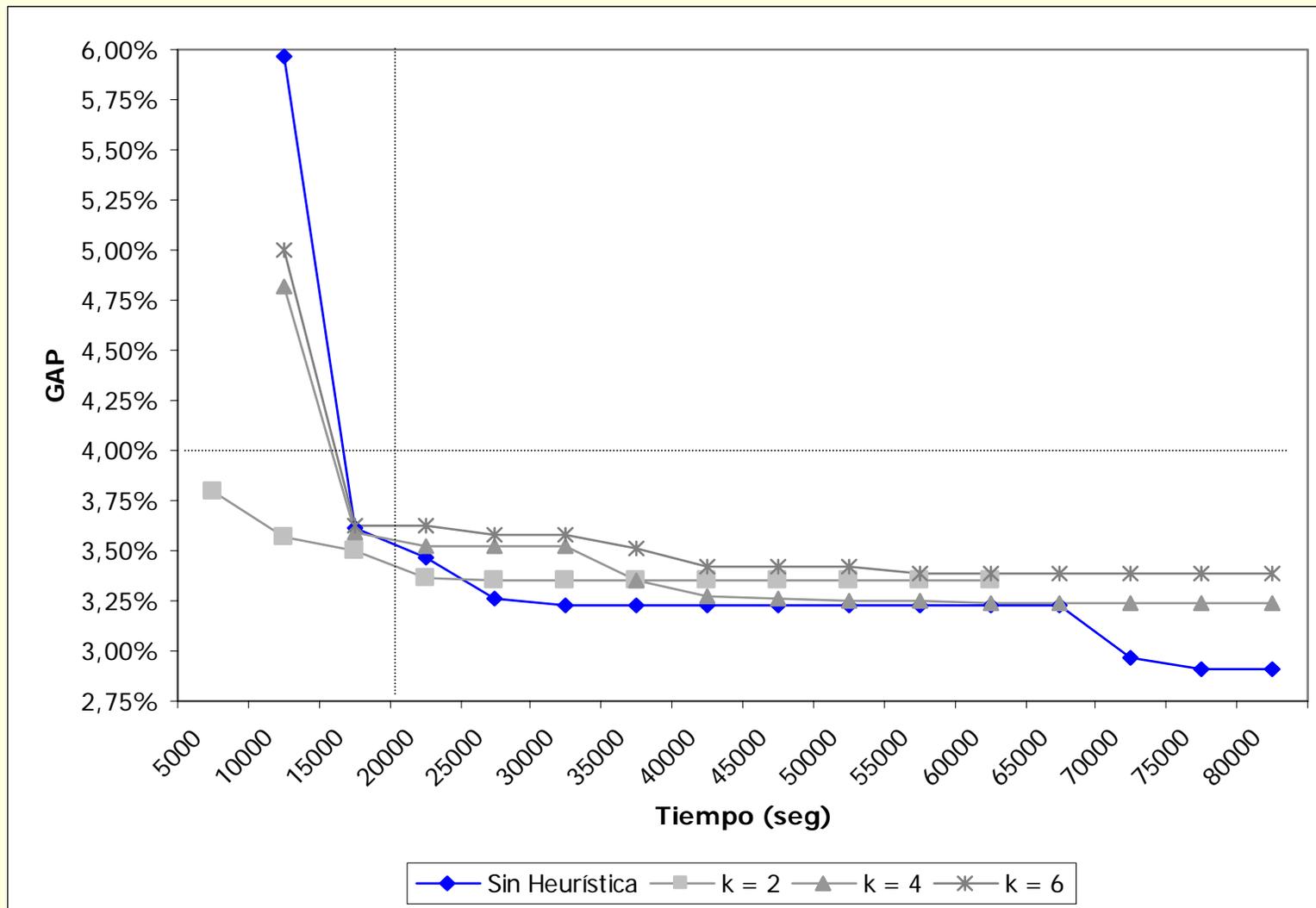
- 120 buses
- 16 recorridos
- 1 terminal

- Caso II

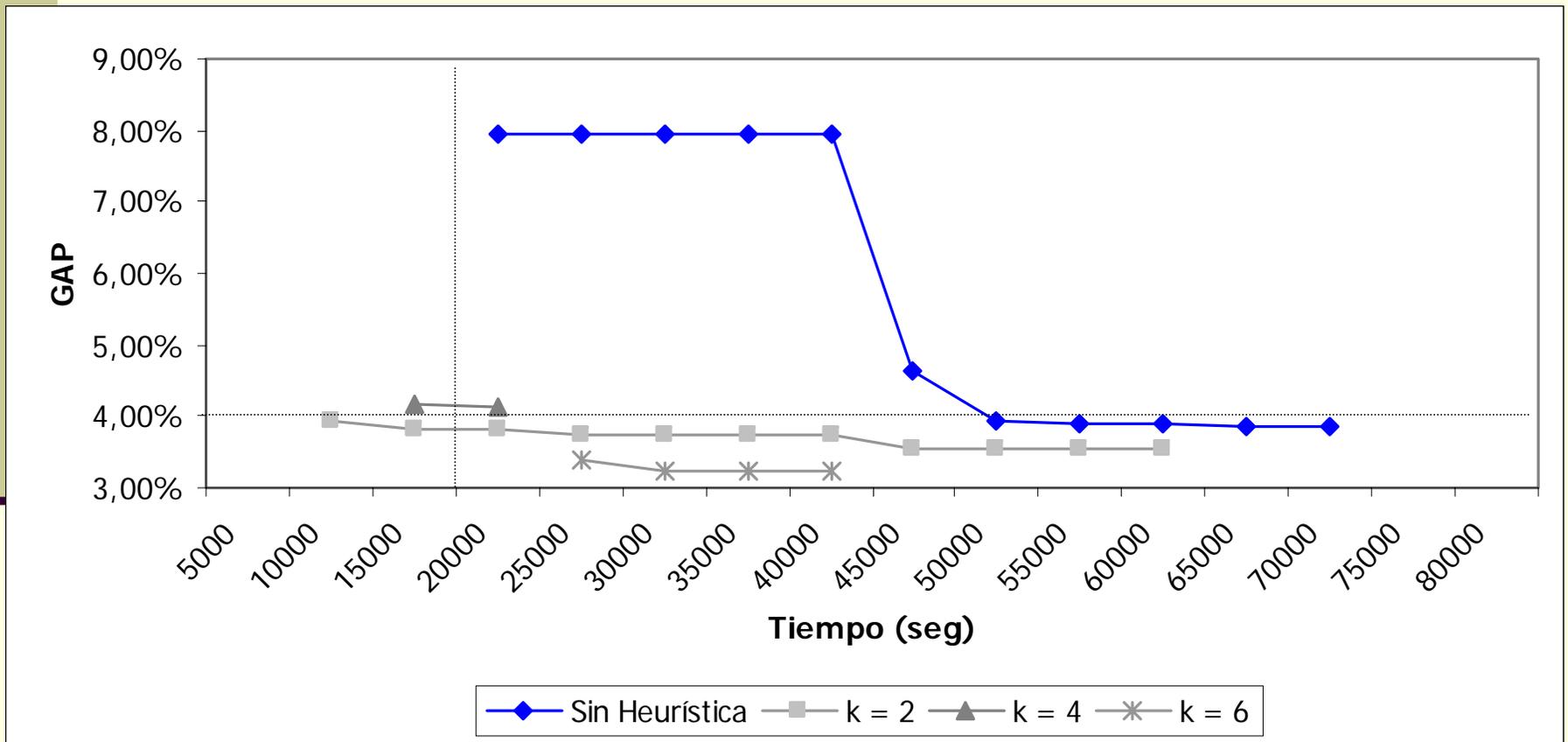
- 160 buses
- 11 recorridos
- 3 terminales

- Existen cuatro tipos de buses
- Tiempo máximo de ejecución: 24 horas
- 1.500 viajes en cada caso aproximadamente

Resultados Caso I



Resultados Caso II



Resultados ambos Casos

- Criterio de parada: GAP 4%
 - Tiempos de resolución Caso I

Soluciones	Sin heurística	k = 2	k = 4	k = 6
1ª Solucion	6.700	3.500	5.200	7.200
GAP 4%	12.600	3.500	10.300	12.000

- Tiempos de resolución Caso II

Soluciones	Sin heurística	k = 2	k = 4	k = 6
1ª Solucion	19.500	8.700	12.000	22.300
GAP 4%	48.500	9.600	--	22.900

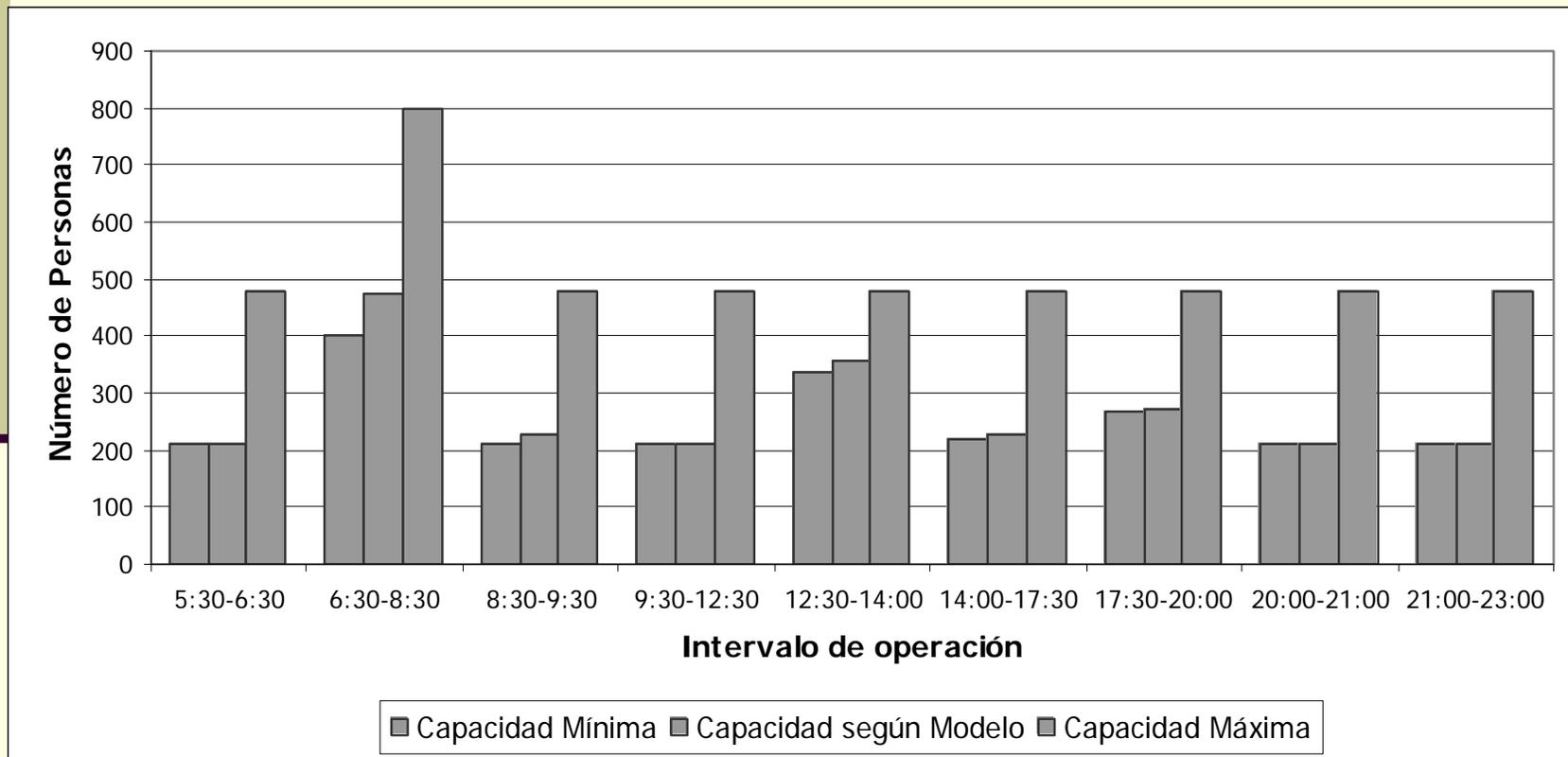
Resultados para la empresa

■ Planificación para el servicio 204

Hora Inicio	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7
5:39	x						
5:48		x					
5:57			x				
6:09				x			
6:18					x		
6:30	x						
6:42		x					
6:54			x				
7:03				x			
7:12					x		
7:21	x						
7:33						x	
7:45							x
7:48		x					
8:00			x				
8:12				x			
8:24					x		
8:39	x						
8:51						x	
8:54		x					
9:06			x				
9:18				x			

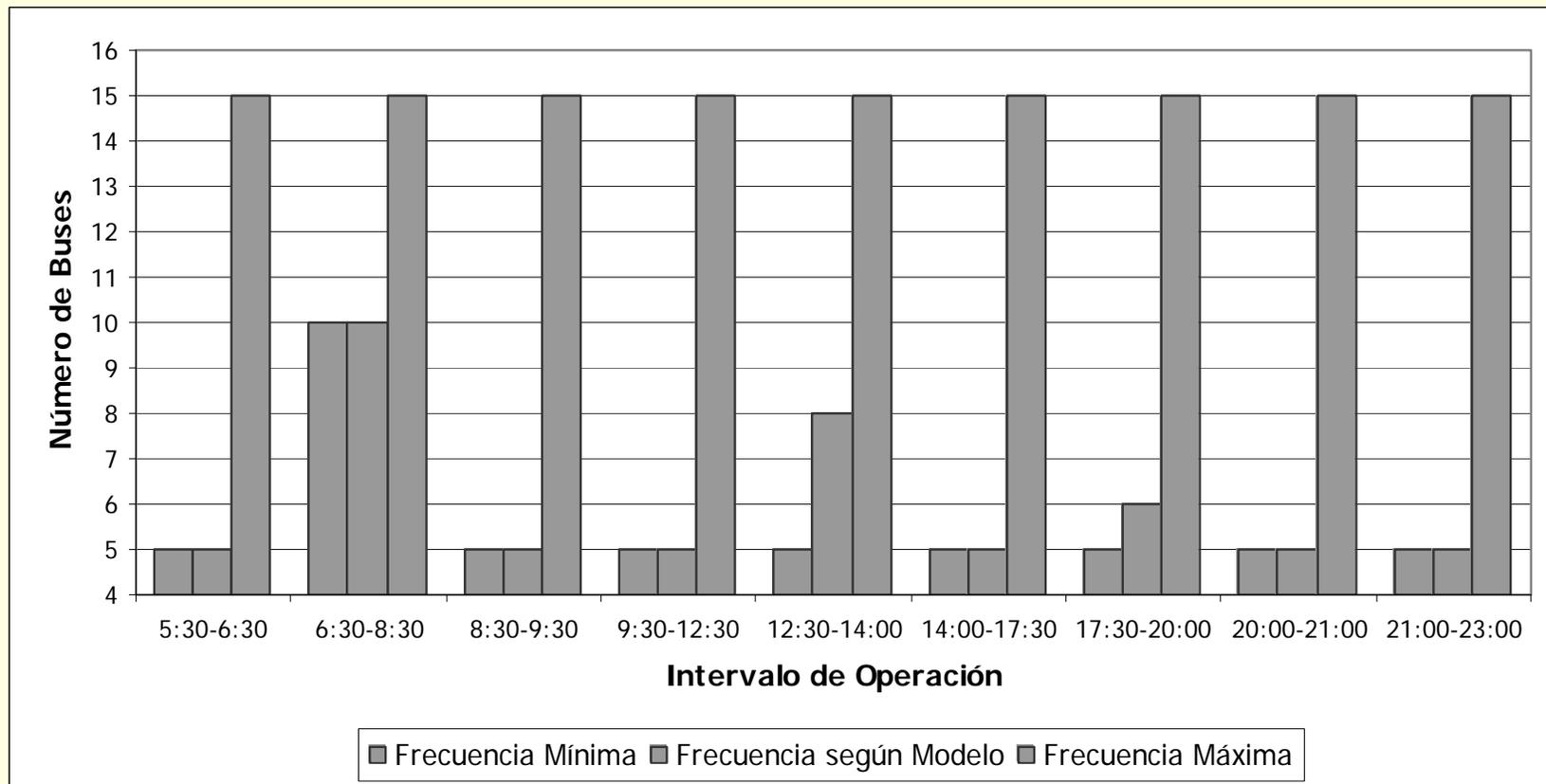
Resultados para la empresa

- Capacidades por Intervalos de Operación para el servicio 203



Resultados para la empresa

- Frecuencias por Intervalos de Operación para el servicio 203



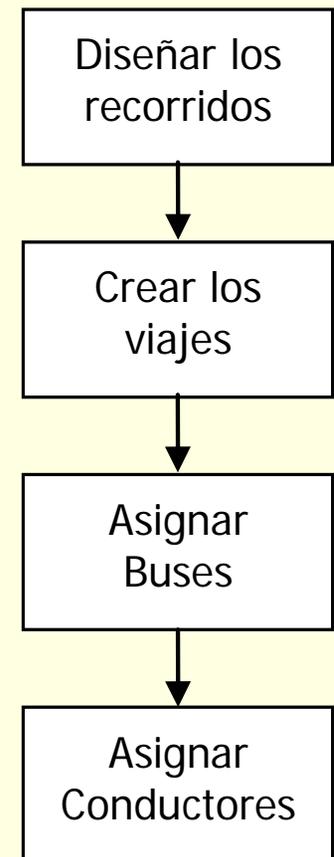
Referencias

- Bertacco, L., Fischetti, M., Lodi, A., 2005. A feasibility pump heuristic for general mixed-integer problems.
- Dell'Amico, M., Fischetti, M., Toth, P., 1993. Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem. Management Science Vol. 39 No. 1.
- Fischetti, M., Lodi, A., Martello, S., Toth, P., 2001. A polyedral approach to simplified crew scheduling and vehicle scheduling problems. Management Science Vol 47, N° 6, 833-850.
- Fischetti, M., Lodi, A., 2003. Local Branching. Mathematical Programming 98, 23-47.
- Fischetti, M., Glover, F., Lodi, A., 2005. The Feasibility Pump. Mathematical Programming 104, 91-104.
- Fischetti, M., Lodi, A., 2005. Repairing MIP infeasibility through Local Branching.

Descripción del Problema

- Proceso de planificación de cualquier empresa de transporte público:

1. Diseño de la red de transporte
 2. Diseño del horario de los buses (timetable)
 3. Asignación de los vehículos a los viajes (vehicle scheduling)
 4. **Asignación de los conductores (driver scheduling)**
- Etapa I {
- Etapa II {





Ceder (2002)

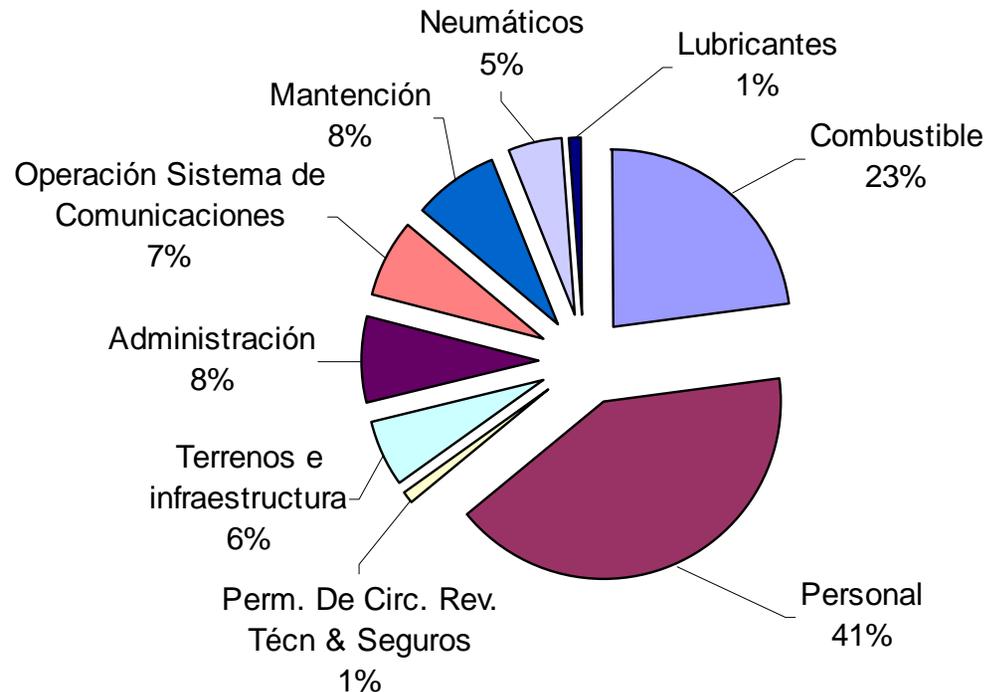
Etapa a estudiar

Asignación de los conductores

- Ceder (2002), se explica el proceso completo de planificación de una empresa de TP en forma general (las cuatro etapas mencionadas antes), y algunas metodologías, poniendo énfasis en los métodos de asignación de flota de conductores.

¿Por qué es importante tratar con cuidado esta etapa?

Costos Operacionales de una empresa de Transporte



Asignación de conductores

- Para la Asignación de Conductores la entrada es la asignación final de vehículos. De dicha asignación se desea conocer la siguiente información:
 - Horario de salida y regreso de los viajes
 - Asignación de los vehículos de cada viaje
 - Terminal desde el cual salen y regresan los buses
- Además es necesario conocer los siguientes datos de la red de transporte:
 - Localización de los puntos de relevo: se refiere a lugares físicos donde es posible realizar un cambio de conductores
 - Tiempos de viaje entre los puntos de relevo

Asignación de conductores

- Con tal información se determinan las **piezas de trabajo**, que se definen como una o más tareas consecutivas que pueden ser efectuadas por un conductor. Las tareas corresponden a viajes entre pares de puntos de relevos, por lo que las piezas de trabajo se construyen uniendo tareas consecutivas y eliminando puntos de relevo innecesarios. Se debe estudiar su factibilidad, la cual depende de su duración máxima o mínima
- **Objetivo es asignar a los conductores** el conjunto de actividades que deben realizar durante la jornada de trabajo, satisfaciendo restricciones contractuales y minimizando el número de conductores que permitan cumplir con la programación de viajes y vehículos ya definida.
- De este problema, se determina el número de conductores que se necesitan diariamente para cubrir todos los viajes de todos los recorridos. Sin embargo, cada conductor tiene un máximo de horas semanales que puede trabajar, además de tener un día libre a la semana, por lo tanto se debe realizar una nueva asignación pero para un período mayor. Este es el proceso que se conoce como **Rostering**, durante el cual se debe considerar las reglas de rotación y las prioridades entre los conductores.

Revisión de la literatura

- Desrochers et al (1989): propone método de cubrimiento de conjuntos (set covering), ya que es más fácil obtener soluciones factibles continuas como también obtener buenas soluciones enteras con heurísticas.
- Para este método, se dispone de un conjunto de jornadas factibles, donde cada jornada posee un costo definido (C_j) e indica que viajes son cubiertos. Entonces, el método de cubrimiento de conjuntos elige el mejor subconjunto de jornadas que permita cubrir todos los viajes.

Desrochers et al (1989): formulación

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n C_j \cdot X_j$$

$$\text{s.a.:} \sum_{j=1}^n f_{ij} \cdot X_j \geq 1 \quad i = \{1, \dots, m\}$$

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si se selecciona la jornada } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$\text{donde } f_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el viaje } i \text{ está en la jornada } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

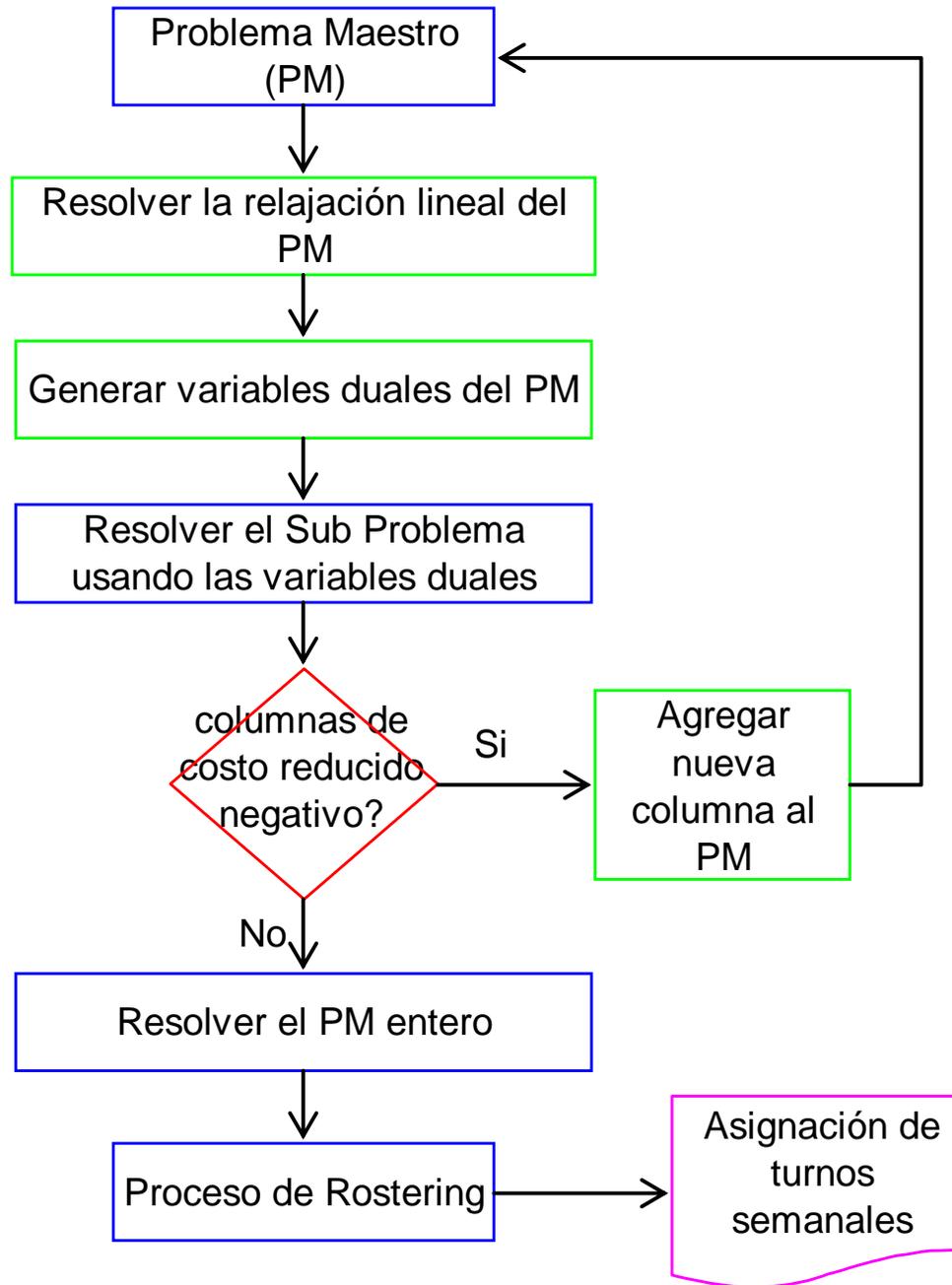
La formulación como problema de partición de conjuntos es idéntica a la anterior, con la diferencia que la restricción de desigualdad se cambia por una de igualdad. La solución óptima del método de cubrimiento de conjuntos coincide con la solución óptima de método de partición.

Enfoque de generación de columnas para asignación de conductores

- Como no siempre se puede llegar a la solución óptima, o demanda mucho tiempo encontrar el óptimo, o una solución cercana al óptimo es suficientemente buena para el problema real, la formulación que normalmente se elige es la de partición de conjuntos, ya que en caso de encontrar soluciones sub óptimas se evita sobre cubrir algunos viajes, es decir, impedir elegir jornadas que cubran un mismo viaje
- Enfoque de generación de columnas: utilizado por la gran mayoría de los trabajos relacionados con asignación de conductores.
- Cada columna representa una secuencia de actividades que pueden ser realizadas por un mismo conductor

Enfoque de generación de columnas para asignación de conductores

- Enfoque de generación de columnas
 - Descompone el problema en dos partes: un problema de cubrimiento (o partición) de conjuntos, denominado problema maestro, y un sub problema.
 - El problema de cubrimiento de conjuntos elige las mejores jornadas (o columnas) dentro de un conjunto ya conocido de jornadas factibles.
 - El sub problema es usado para proponer nuevas jornadas factibles para mejorar la solución actual del problema de cubrimientos de conjunto.
- El Sub Problema consiste en un problema de ruta mínima con restricción de recursos. Una jornada o columna se genera a partir de una ruta mínima desde la fuente hasta el sumidero (que simbolizan el terminal de buses), pasando por diversos nodos, que representan los viajes. La restricción de recursos proviene de respetar la duración máxima de la jornada o cubrir un número máximo de viajes, por lo tanto, si se denomina como recurso a la duración de la jornada o al número de viajes, el consumo de estos recursos es restringido.
- La función objetivo de este problema de ruta mínima será definida de forma tal que las rutas mínimas factibles sean las de mínimo costo reducido.
- En Desrochers et al. (1989) el sub problema se resuelve con Programación Dinámica. En trabajos posteriores se resuelve con otros métodos: algoritmos genéticos, búsqueda tabú, programación de restricciones (CP), y también con programación dinámica más sofisticada



Enfoque para resolver el problema según Ceder (2002)

- **Análisis de los bloques de vehículo:** un bloque de vehículo corresponde al viaje de un bus comenzando en un terminal y regresando a él. Si las duraciones de los bloques son muy extensas, estos se dividen, generando las tareas, que consisten en una porción de un bloque determinado por dos puntos de relevo consecutivos según los distintos puntos de relevo existentes.
- **Análisis de las piezas de trabajo:** una pieza de trabajo es una o más tareas consecutivas que pueden ser efectuadas por un chofer. Se forman las piezas de trabajo uniendo tareas consecutivas y eliminando puntos de relevo innecesarios. Se debe estudiar su factibilidad, la cual depende de su duración máxima o mínima.

Enfoque para resolver el problema según Ceder (2002)

- **Generación de las Jornadas de Trabajo:** como jornada de trabajo se refiere a una o más piezas de trabajo ejecutadas por el mismo conductor. Dichas jornadas deben ser factibles, es decir que respeten restricciones como las siguientes:
 - Duración de las piezas de trabajo
 - Número máximo o mínimo de horas trabajando
 - Número máximo o mínimo de descansos
 - Tiempo máximo o mínimo de descanso
 - Máximo de horas consecutivas manejando
 - Minimizar el número de cambio de máquinas durante una misma jornada
- **Selección de las Jornadas de Trabajo:** las jornadas de trabajo a elegir en la solución final deben ser tales que minimicen en número de conductores, respeten las diversas restricciones y cubran todos los viajes.
- **Proceso de Rostering:** Posteriormente, las jornadas diarias seleccionadas se deberán asignar a cada conductor para un horizonte de planificación semanal. Para ello se deben considerar las restricciones en máximo de horas laborales y de cantidad de días libres a la semana.

Revisión de la literatura

- Huisman et al (2003) presentan dos modelos y algoritmos para el problema integrado de asignación de vehículos y asignación de conductores en el caso de varios terminales. Ambos algoritmos están basados en una combinación de generación de columnas y relajación lagrangeana.
- Haase et al (2001), tratan el problema integrado de asignación de vehículos y conductores. Nuevamente se emplea una formulación de partición de conjuntos para el problema de asignación de conductores pero incorporando restricciones adicionales para el itinerario de buses que garanticen una óptima asignación de los vehículos. El enfoque de generación de columnas también es aplicado, en conjunto con un esquema *branch-and-bound*.
- Fores et al (1997) y (2002) desarrollan un enfoque de programación matemática para el problema de asignación de conductores, que incluye técnicas de generación de columnas. Se describe un enfoque que combina un problema lineal entero con heurísticas, permitiendo la solución de instancias muy grandes para buses y trenes.

Revisión de la literatura

- Haase y Friberg (1997) presentan un algoritmo *branch-and-cut* exacto para el problema de asignación de vehículos y conductores en sistemas urbanos de transporte público.
- Desrosiers et al (1995) resuelven los problemas de asignación de vehículos y conductores con restricciones de tiempo, utilizando nuevamente generación de columnas para asignación de los conductores. Se estudia en detalle el problema de ruta mínima con restricción de recursos y se discuten algunos algoritmos para su solución.

Referencias

- A. Ceder, "Urban Transit Scheduling: Framework, Review and Examples", *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 128, No 4, Diciembre 2002 pp. 225-244.
- M. Desrochers, F. Soumis, "A Column Generation Approach to the Urban Transit Crew Scheduling Problem", *Transportation Science*, Vol. 23, No. 1, Febrero 1989.
- J. Desrosiers, Y. Dumas, M. Solomon, F. Soumis, "Time Constrained Routing and Scheduling", *Handbook in OR & MS*, Vol. 8, 1995, Capítulo 2, pp. 35-139.
- K. Haase and C. Friberg, "An Exact Algorithm for the Vehicle and Crew Scheduling Problem", *Computer-Aided Transit Scheduling*, Agosto 1997, pp 63-80.
- K. Haase, G. Desaulniers, J. Desrosiers, "Simultaneous Vehicle and Crew Scheduling in Urban Mass Transit Systems", *Transportation Science*, Vol. 35, No. 3, Agosto 2001 pp.286-303.
- D. Huisman, R. Freling, A. Wagelmans, "Multiple-Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling", *Econometric Institute Report EI2003-02*, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam.
- S. Fores, L. Proll, A. Wren, "An Improved ILP System for Driver Scheduling", *Computer-Aided Transit Scheduling*, Agosto 1997, pp 43-61.
- S. Fores, L. Proll, A. Wren, "TRACS II: a hybrid IP/heuristic driver scheduling system for public transport", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, 2002 pp. 1093-1100.