

CI63G Planificación de Sistemas de Transporte Público Urbano

Clase 4
Semestre Otoño 2008

Unidades Temáticas

1. **La oferta de transporte público urbano (2 semanas)**
2. La demanda por TPU (1,5 sem.)
3. Diseño y optimización de servicios de TPU (2,5 sem.)
4. Determinación de tarifas en TPU (2,5 sem.)
5. Modelos de planificación de operaciones (2,5 sem.)
6. Equilibrio y asignación en redes de TPU (2,5 sem.)
7. Formas de organización del TPU (1,5 sem.)

La Oferta de TPU

- **Tipo de relación contractual con el usuario**
- **Tipos de vehículo**
- **Tipo de segregación de la vía**
- **Otros:**
 - **Tipo de frecuencia o intervalo**
 - **Tipo de detención en paraderos**
 - **Proporción de pasajeros de pie**
- **Características de sistemas típicos**
- **Estructura de costos**

Variables Cuantitativas que Caracterizan un Servicio de TPU

- Frecuencia
- (a) Velocidad comercial
- Confiabilidad
- Seguridad
- (b) Capacidad de la línea: flujo de plazas en un punto de la línea
- Capacidad productiva:
- Productividad:
- Utilización:
- (Fuente: Vuchic, 1981 p70)

Tipo de Detención en Paradero

- Tipos y uso de paraderos
 - Sin paraderos (para en cualquier parte)
 - Con paraderos (para sólo en paradas establecidas)
 - Expresos (para sólo en algunas de las paradas establecidas)
- Detención obligada o no
 - Detención obligada en los paraderos que corresponda
 - Detención en los paraderos que corresponda sólo si alguien quiere subir o bajar

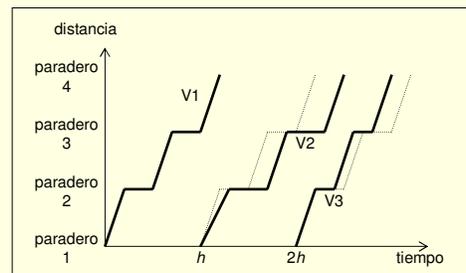
Confort: Pasajeros de Pie/Sentados

- A mayor espacio por pasajero mayor confort y mayor costo de operación
 - Sólo pasajeros sentados
 - Típico en servicios interurbanos
 - Pasajeros sentados y de pie
 - Mayores proporciones de pasajeros de pie en viajes cortos y modos con poca aceleración lateral (curvas sin peralte)
 - Pasajeros sólo de pie
 - Viajes muy cortos y sin aceleración lateral (ascensores, escaleras mecánicas)

Tipo de Frecuencia o Intervalo

- Horario establecido
 - Se publica la hora exacta a la que pasa cada servicio
 -
- Intervalo constante
 - Vehículos circulan a intervalos fijos, controlados desde una central de operaciones
- Salida desde cabezal a intervalo constante
 - Sin control de intervalo en ruta, se produce efecto pelotón
- Convoy de buses
 - Vehículos circulan juntos, simulando un tren

Efecto pelotón (*bunching*)

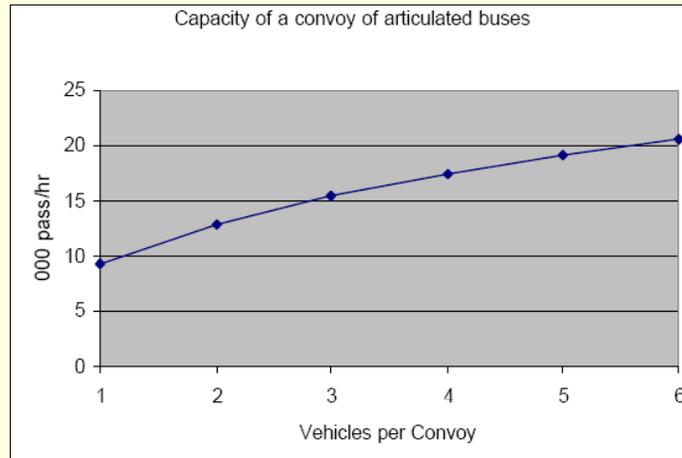


Fuente: Gschwender (2000)



Fuentes: Daganzo (1997), Gschwender (2000)

Convoy de Buses



Fuente: Steer Davis Gleave

Tipo de Frecuencia o Intervalo

- Vehículos salen cuando se llenan (*Demand responsive*)
 - Poco usual, se observa por ejemplo en algunas líneas de taxi colectivo
- Área servida sólo cuando alguien solicita previamente el servicio (*Demand responsive*)
 - Para zonas o períodos de muy baja demanda
 - Ej: Anruf-Sammel-Taxi en Alemania
 - Otros

Tipo y Nivel de Integración (Sistema)

- Tipos de integración tarifaria
 - Abono de transporte
 - Boleto unitario válido para viaje completo, incluyendo transbordo entre diferentes líneas y modos
 - Tarifa rebajada en los transbordos
 - Semi-integración: sirven los mismos boletos, pero se para cada vez que se sube
 - Sin integración: se paga cada vez que se sube.
- Tipos de integración u organización física de las líneas
 -
 -
 -
 -

Bibliografía

- Daganzo, C. F. (1997) **Fundamentals of Transportation and Traffic Operations**, Pergamon-Elsevier, Oxford, U.K
- Gschwender, A. (2000) **Caracterización microeconómica de la operación del transporte público urbano: un análisis crítico**. Tesis de Magister, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
- Vuchic, V. (1981) **Urban Public Transportation**. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey

Paratransit

- *Dial-a-ride, demand responsive (DRT)*
 - Más flexible que TP tradicional
 - Servicio puede ser *demand responsive* en dos sentidos: ruteo (servicio *door-to-door*) e itinerario (vehículo arriba cuando el pasajero quiere)
 - Sistemas *dial-a-ride*: área de servicio más que rutas específicas.
 - Patrones de servicio: *many-to-one, many-to-few, many-to-many*.

Paratransit

- Vehículos (más bien pequeños): van estándar, van modificada, automóvil, bus pequeño.



Sistemas *DRT*: experiencias en US (1992)

Area	Annual passenger trips	Operating cost per passenger (US\$)	Average passenger load (pax/veh)
Chicago	1,566,410	9.01	1.36
Dallas	803,923	14.61	1.36
Houston	663,046	12.53	1.11
Los Angeles	2,365,895	8.74	1.29
Miami	1,110,617	11.98	1.14
Orange County	1,742,633	6.23	2.14
Pittsburg	2,018,730	9.86	0.93
San Diego	566,148	9.70	1.78
Means (muestra de 20)	811,267	9.88	1.39

Paratransit: Fracaso de sistemas *DRT*

☞ no son una alternativa real para el automóvil
☞ sistemas no rentables : baja tasa de ocupación (< 1.5 pax/veh), altos costos operacionales (10US\$/pax), excesivos tiempos de viaje y espera

- Subsidios estatales
- Mala cobertura (muy pocos vehículos)
- Baja tasa de respuesta
- Destinados a servir comunidades pequeñas, pasajeros discapacitados, ancianos, etc.

Alternativas más utilizadas que DRT

- Taxis: servicio puerta a puerta sin compartir vehículo
- *JITNEY*: parecido a un taxi colectivo (servicio entre taxi y bus regular)
- *RIDE SHARING*: viajeros se agrupan y comparten vehículos
- *Carpooling*: promovidos por infraestructura especializada (vías verdes)
- *Vanpooling* (*average passenger load* ≈ 10)

DRT: Problema de ruteo de vehículos estático (*VRP*) vs dinámico (*DVRP*)

- *VRP*:
 - Toda la información relevante respecto de planificación de rutas se supone conocida por el despachador antes de comenzar el proceso de ruteo
 - Información relevante de ruteo no cambia una vez que las rutas han sido construidas
- *DVRP*
 - No toda la información relevante respecto de planificación de rutas es conocida por el despachador antes de comenzar el proceso de ruteo
 - Información puede cambiar después que las rutas iniciales han sido construidas

$$VRP \subset DVRP$$

Clasificación de problemas dinámicos de ruteo de vehículos en la realidad

- Área de despacho (local, regional, nacional, internacional)
- Importancia de componente de ruteo

	Área local	Área más amplia
Ruteo	Courier services <i>Dial-a-ride</i>	Less-than-truckload trucking
No ruteo	Emergency services	Truckload trucking

Clasificación de problemas dinámicos de ruteo de vehículos en la realidad

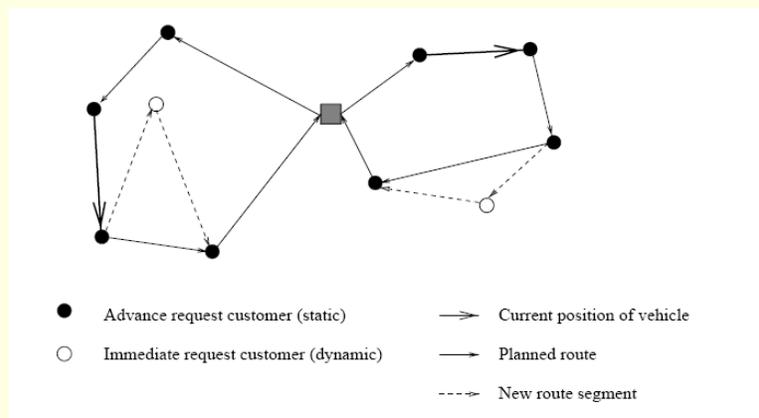
- Para el caso de problemas de ruteo dinámico en áreas locales:

	Many-to-many	One-to-many
Restricción de capacidad	<i>dial-a-ride</i>	Feeder system
Sin restricción de capacidad	Express mail delivery	Courier or repair services

DVRP

- DVRP ejecuta algoritmos online para trabajar en tiempo real y servir requerimientos inmediatos si es factible hacerlo
- VRP y DVRP son NP-hard (casos realistas): mayoría de los autores proponen heurísticas
- En rigor, cada vez que ocurre un nuevo requerimiento, un VRP estático debiera ser resuelto
- Psaraftis (1980) se refiere a la solución *estática* del problema *dinámico* como una solución *tentativa*

Ejemplo de DVRP: dos vehículos sin restricción de capacidad



Mientras más complejo y restrictivo sea el problema, complica mucho la inserción de nuevos requerimientos

VRP dinámico versus estático (Psaraftis, 1986)

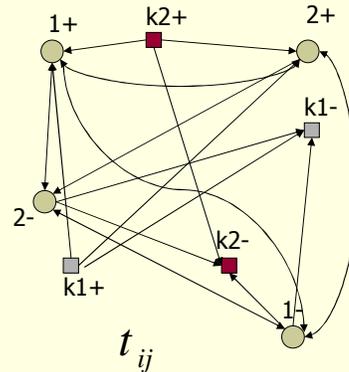
- Dimensión temporal es esencial
- El problema puede ser de fin abierto (open-ended)
- Información futura puede ser imprecisa o desconocida
- Eventos cercanos se vuelven muy importantes
- Mecanismos de actualización de información son esenciales
- Decisiones de re-secuenciamiento y reasignación deben ser incluidas
- Tiempos de computación muy rápidos son necesarios
- Mecanismos para evitar posponer servicios son fundamentales

VRP dinámico versus estático (Psaraftis, 1986)

- Función objetivo debe ser distinta
- Restricciones de ventanas de tiempo se deben modificar
- Flexibilidad para cambiar el tamaño de flota es menor
- Consideraciones de procesos de colas se vuelven relevantes
- Atributos de información
 - Evolución de la información
 - Calidad de la información: inputs podrían ser conocidos con certeza, conocidos con incerteza (predicciones), o siguiendo cierta distribución de probabilidades.
 - Disponibilidad de información
 - Procesamiento de información (centralizada o descentralizada)

El Problema de Recoger y Dejar Pasajeros

- Entrada
 - Clientes (demanda)
 - Vehículos (oferta)
 - Red
 - Costos en Arcos
- Salida
 - Rutas satisfaciendo la demanda y minimizando cierta función objetivo



PDPTW: single vehicle

$$\text{Minimize } \sum_{(i,j) \in A} c(L_i) c_{ij} X_{ij}$$

s.a.

$$\sum_{j \in NU\{d\}} X_{ij} = 1, \quad \forall i \in N$$

$$\sum_{j \in N^P} X_{o,j} = 1,$$

$$\sum_{i \in NU\{0\}} X_{ij} - \sum_{i \in NU\{d\}} X_{ji} = 0, \quad \forall j \in N$$

$$\sum_{i \in N^D} X_{i,d} = 1,$$

$$X_{ij}(T_i + t_{ij} - T_j) \leq 0, \quad \forall (i, j) \in A$$

$$a_i \leq T_i \leq b_i, \quad \forall i \in V$$

$$X_{ij}(L_i + l_j - L_j) = 0, \quad \forall (i, j) \in A$$

$$l_i \leq L_i \leq Q, \quad \forall i \in N^P$$

$$0 \leq L_{n+i} \leq Q - l_i, \quad \forall n+i \in N^D$$

$$L_0 = 0,$$

$$T_i + t_{i,n+i} \leq T_{n+i}, \quad \forall i \in N^P$$

$$X_{ij} \text{ binary}, \quad \forall (i, j) \in A$$

PDPTW: Multi-vehicle

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^k} c^k(L_i^k) c_{ij}^k X_{ij}^k$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} X_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in N^P$$

$$\sum_{j \in N^P \cup \{d(k)\}} X_{0(k),j}^k = 1, \quad \forall k \in K$$

$$\sum_{i \in N \cup \{0(k)\}} X_{ij}^k - \sum_{i \in N \cup \{d(k)\}} X_{ji}^k = 0, \quad \forall k \in K, \forall j \in N$$

$$\sum_{i \in N^P \cup \{0(k)\}} X_{ij}^k = 1, \quad \forall k \in K$$

$$X_{ij}^k (T_i^k + t_{ij}^k - T_j^k) \leq 0, \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A^k$$

$$a_i \leq T_i^k \leq b_i, \quad \forall k \in K, \forall i \in V^k$$

$$X_{ij}^k (L_i^k + t_{ij}^k - L_j^k) = 0, \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A^k$$

$$l_i \leq L_i^k \leq Q^k, \quad \forall k \in K, \forall i \in N^P$$

$$0 \leq L_{n+i}^k \leq Q^k - l_i, \quad \forall k \in K, \forall n+i \in N^D$$

$$L_{0(k)}^k = 0, \quad \forall k \in K$$

$$T_i^k + t_{i,n+i}^k \leq T_{n+i}^k, \quad \forall k \in K, \forall i \in N^P$$

$$\sum_{j \in N} X_{ij}^k - \sum_{j \in N} X_{j,n+i}^k = 0, \quad \forall k \in K, \forall i \in N^P$$

$$X_{ij}^k \geq 0, \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A^k$$

$$X_{ij}^k \text{ binary}, \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A^k$$

Reformulación

Generate complete daily schedule for each vehicle

R : pool of routes

θ^r : variable 1 if route $r \in R$ served out by some vehicle

c^r : cost of the route r

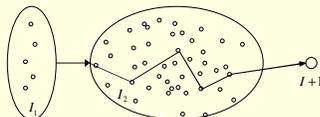
a_i^r : parameter 1 if client i is in route r

Master Problem
Set Partitioning
Model

Dual
Multipliers

Columns

COLUMN
GENERATOR
Sub Problem



$$P: \min_x \sum_{r \in R} c^r \theta^r$$

$$\sum_{r \in R} a_i^r \theta^r = 1 \quad \forall i \in I$$

α_i : dual variable

$$\theta^r \in \{0, 1\}, \quad r \in R$$

$$\bar{c}_k^* \leq 0?$$

Reduced Cost Column

$$\bar{c}_k = c_k - \sum_{i \in P^k} \alpha_i$$

P^k : path followed by vehicle k

Métodos de solución problemas dinámicos (*dial-a-ride*)

- Métodos de inserción (Wilson et al)
- Adaptación de heurísticas de inserción para problemas estáticos (Madsen et al., 1995)
- Adaptación de algoritmos estáticos: Psaraftis (1980): desarrolla método exacto basado en Programación Dinámica y los extiende al caso dinámico

CI63G Planificación de Sistemas de Transporte Público Urbano

Clase 4
Semestre Otoño 2008

Motivación: Sistema más flexible

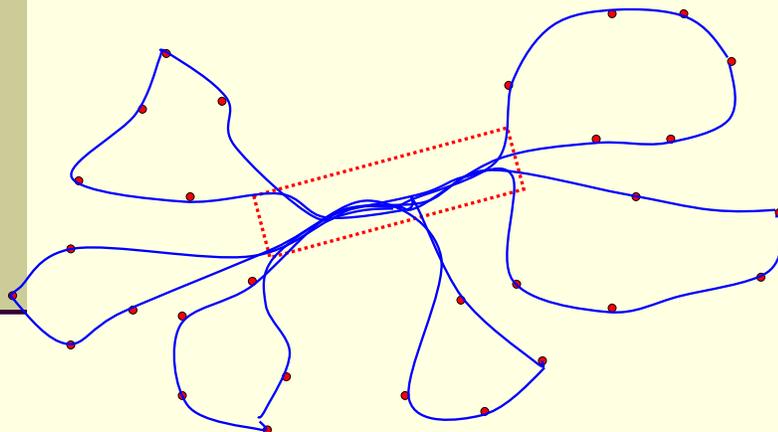
- Si asumimos suficiente demanda producto de una gran cobertura y un buen nivel de servicio (bajos tiempos de espera, a lo más un trasbordo)
- Podría diseñarse un sistema rentable?

Posible solución: Formular un “dynamic pick-up and delivery problem” multiobjetivo: minimizar tiempos de viaje-espera, minimizar costos de operación

- Productividad mejorada debido a mejores tasas de ocupación en corredores expresos

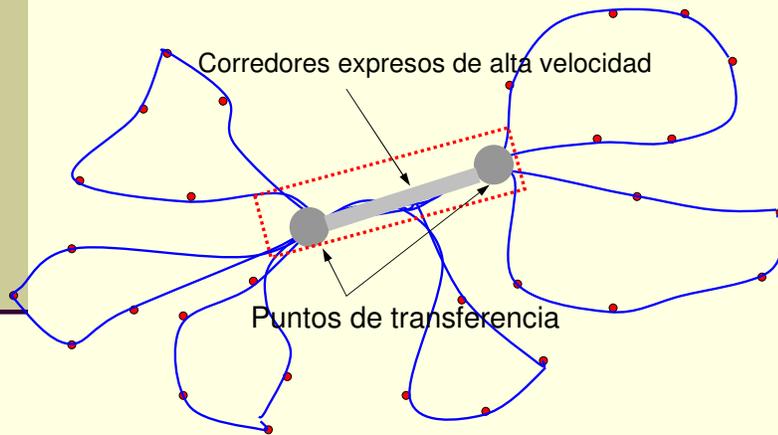
Motivación

Solución óptima podría ser de la forma



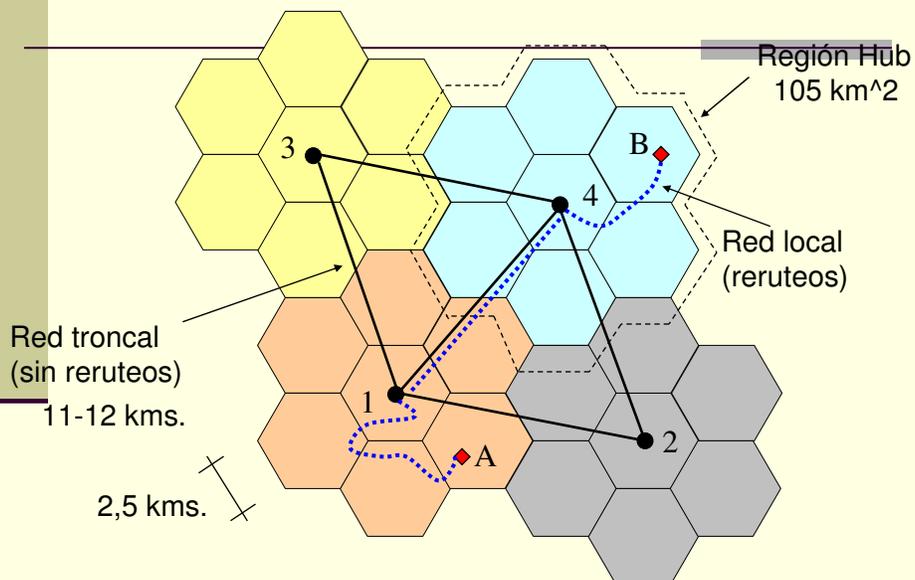
Motivación

Restringir la solución a un diseño específico
Forma más eficiente de usar veh-asientos

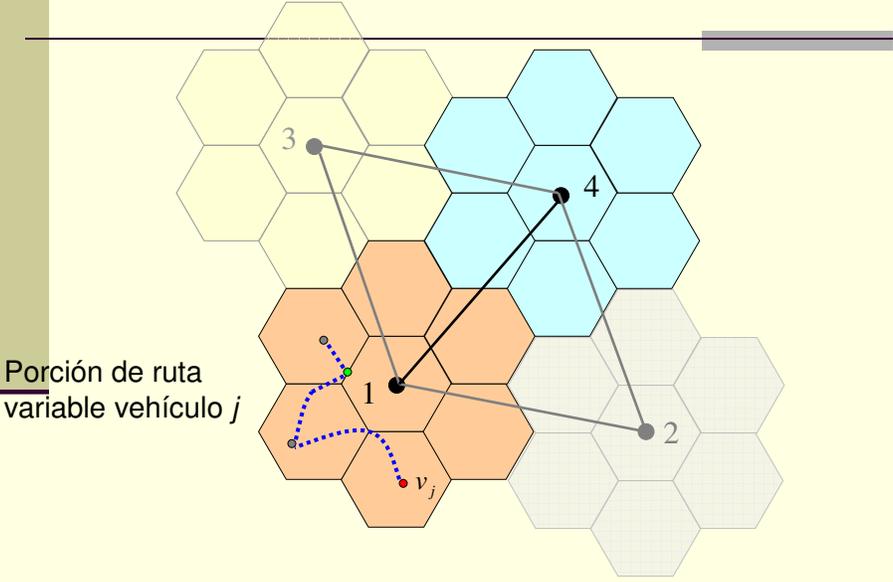


Problema: Requiere dos transbordos

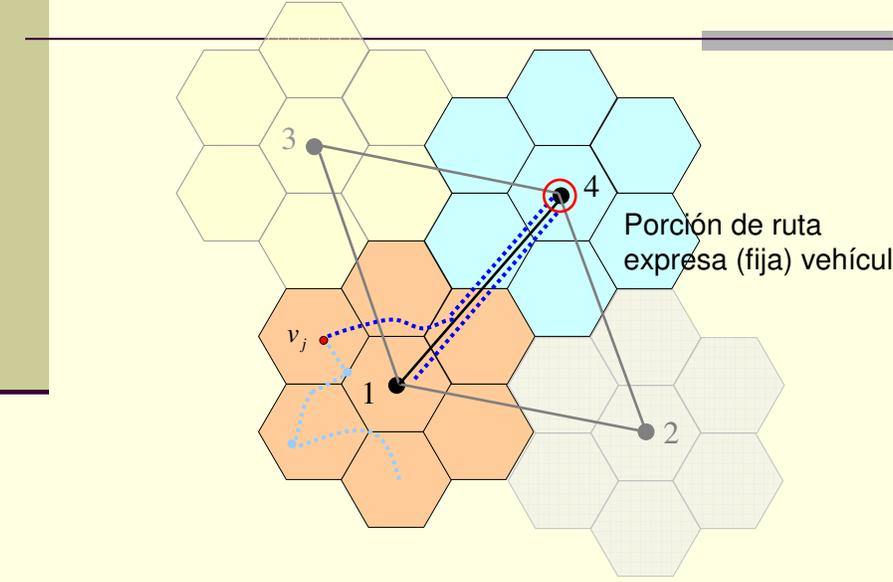
El concepto propuesto



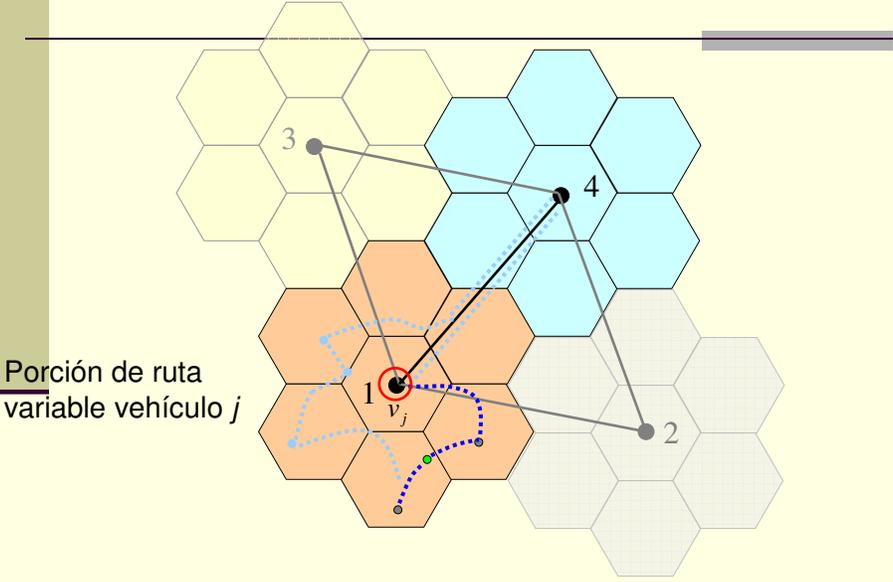
Operación de vehículos HCPPT



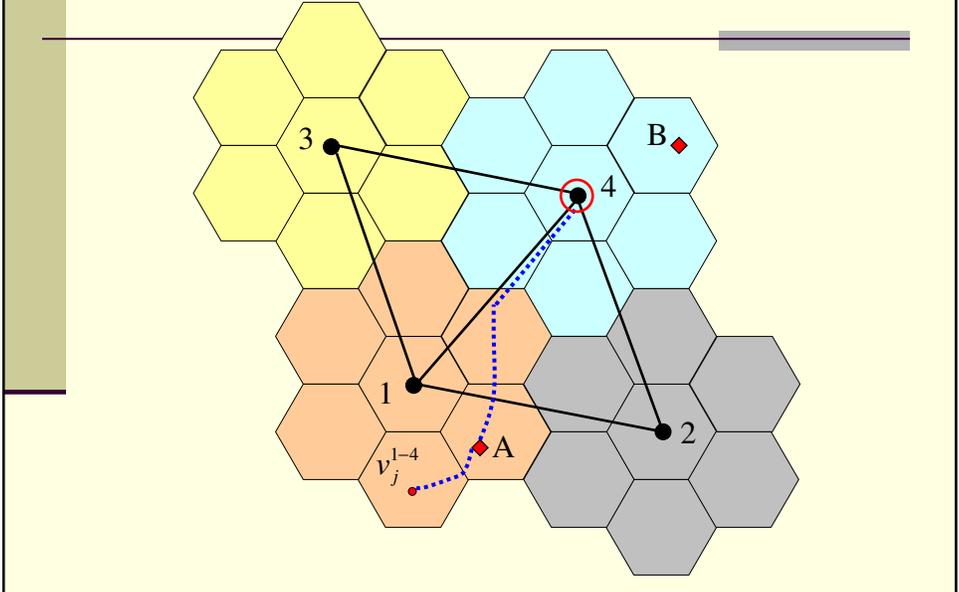
Operación de vehículos HCPPT



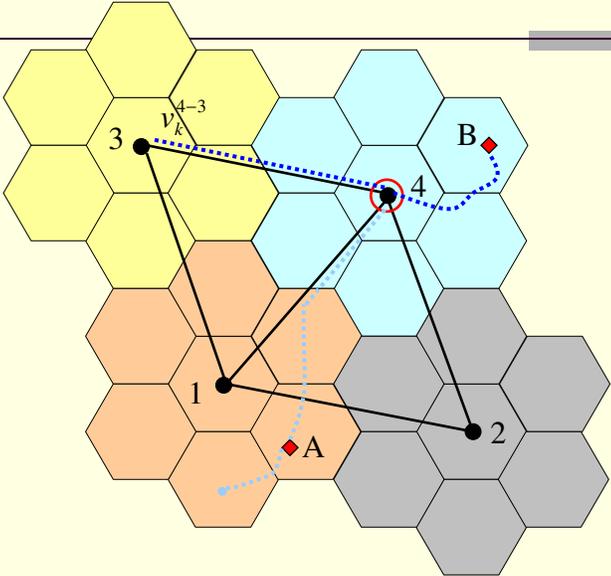
Operación de vehículos HCPPT



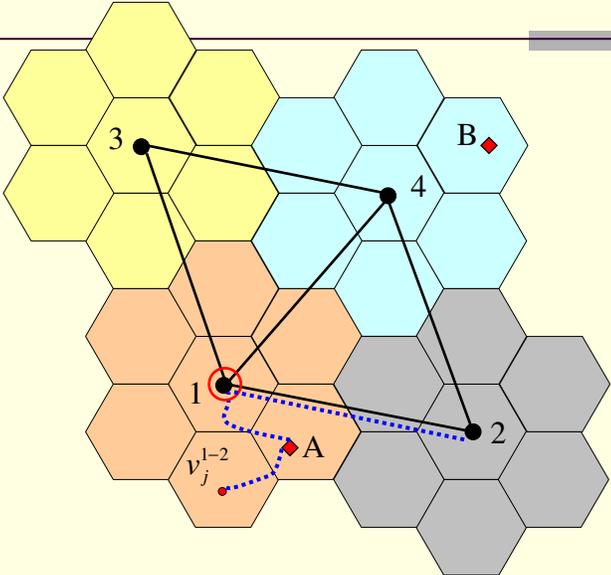
Operación de vehículos HCPPT



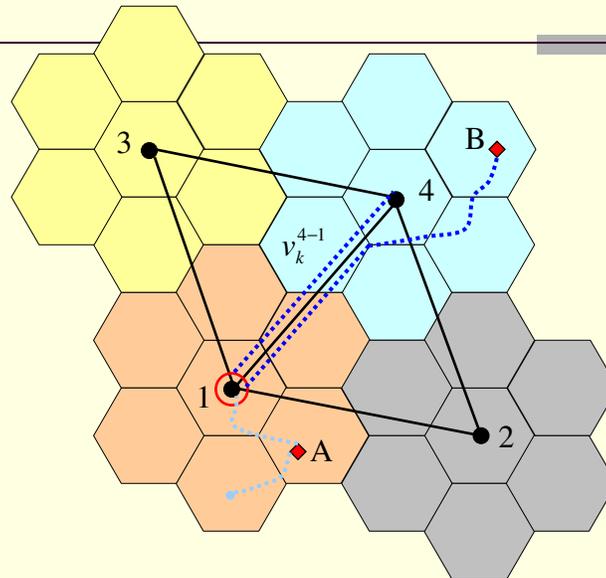
Operación de vehículos HCPPT



Operación de vehículos HCPPT

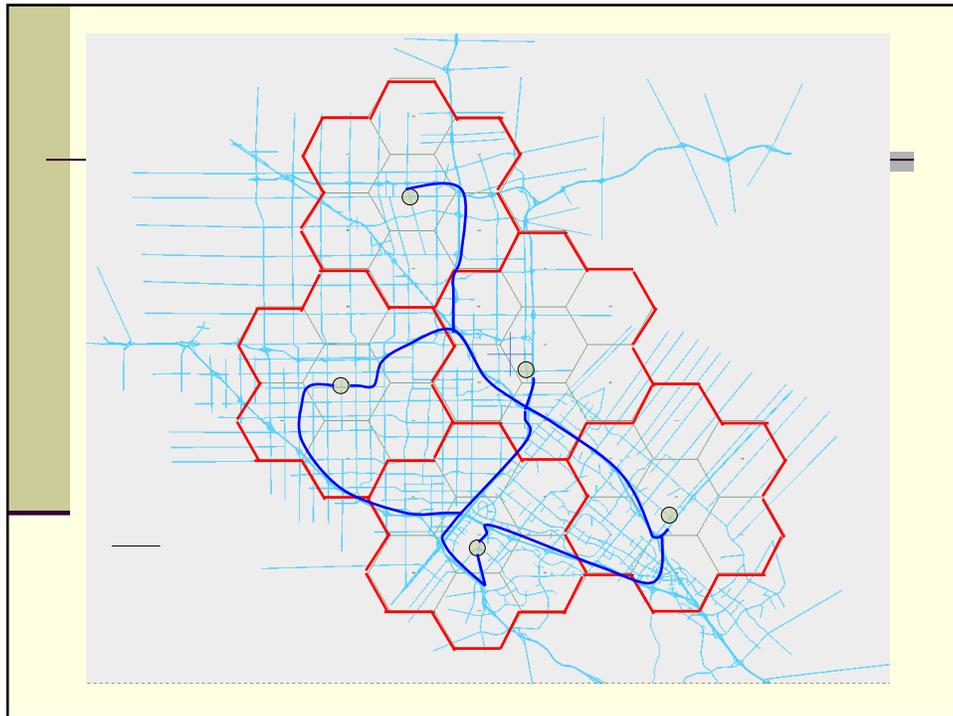


Operación de vehículos HCPPT



HCPPT: características principales

- Vehículos pequeños: (vans de 7 asientos): más baratos, rápidos y flexibles
- Tarifas más bajas
- Tasa de ocupación mejorada: "Passenger pooling"
- Optimización del sistema distribuída a nivel de hubs
- Potencial cooperación privada-pública (inversión, operación)
- Tecnología en tiempo real, algoritmos eficientes



HCPPT resultados simulación

- Tasa de ocupación promedio = sobre 3 pax/veh.
- Tiempo de espera promedio = 10-15 minutos en casa (significativamente mejor que sistemas DRT)
- Tiempo de trasbordo promedio = 5-10 minutos
- Tiempo total (incluye espera y trasbordo) = 35-45 minutos por un viaje promedio de 12 millas (20 km.)

Resumen y comentarios finales

Qué podemos decir de este sistema??

Sistemas de buses actuales: \$ 8.5 por viaje
viaje promedio de 10-15 millas

- DRT (occ. 1.0-1.3): \$ 20 por viaje
- Taxi: \$ 30 per viaje-person (occ. 1.0)
- *HCPPT*: \$ 20 - 30 por viaje (occ. 3.0-3.5)
\$ 7 por viaje personal
con algún subsidio: \$ 4 por viaje-persona

Resumen y comentarios finales

- Con diseños apropiados, podemos operar *HCPPT* eficientemente, en el contexto de optimización en tiempo real.
- Sistema ideal para cooperación pública-privada con contratos a compañías de tipo taxi.
- La tecnología requerida por *HCPPT* está siendo demostrada en proyectos en ejecución (ADART).