Programación de servicios nocturnos

Proponiendo un horario optimizado para Transantiago

Kameron Decker Harris

Marcela Munizaga
Antonio Gschwender

December 15, 2010

Horario o "timetable" nocturno

No existe **ningún** horario

Por qué nocturno?

- horarios fijos son más importantes cuando hay menos frecuencias, como de noche
- el usuario puede mejor planificar sus viajes

Ahora: frequencias programadas (pero cumplidas a veces)

Se espera ofrecer mejor servicio con los mismos recursos

Horario o “timetable” nocturno

No existe **ningún** horario

Por qué nocturno?

- horarios fijos son más importantes cuando hay menos frecuencias, como de noche
- el usuario puede mejor planificar sus viajes

Ahora: frequencias programadas (pero cumplidas a veces)

Se espera ofrecer mejor servicio con los mismos recursos

Horario o “timetable” nocturno

No existe **ningún** horario

Por qué nocturno?

- horarios fijos son más importantes cuando hay menos frecuencias, como de noche
- el usuario puede mejor planificar sus viajes

Ahora: frequencias programadas (pero cumplidas a veces)

Se espera ofrecer mejor servicio con los mismos recursos

Horario o "timetable" nocturno

No existe **ningún** horario

Por qué nocturno?

- horarios fijos son más importantes cuando hay menos frecuencias, como de noche
- el usuario puede mejor planificar sus viajes

Ahora: frequencias programadas (pero cumplidas a veces)

Se espera ofrecer mejor servicio con los mismos recursos

Horario o “timetable” nocturno

No existe **ningún** horario

Por qué nocturno?

- horarios fijos son más importantes cuando hay menos frecuencias, como de noche
- el usuario puede mejor planificar sus viajes

Ahora: frequencias programadas (pero cumplidas a veces)

Se espera ofrecer mejor servicio con los mismos recursos

Horario o “timetable” nocturno

No existe **ningún** horario

Por qué nocturno?

- horarios fijos son más importantes cuando hay menos frecuencias, como de noche
- el usuario puede mejor planificar sus viajes

Ahora: frequencias programadas (pero cumplidas a veces)

Se espera ofrecer mejor servicio con los mismos recursos

Horario o “timetable” nocturno

No existe **ningún** horario

Por qué nocturno?

- horarios fijos son más importantes cuando hay menos frecuencias, como de noche
- el usuario puede mejor planificar sus viajes

Ahora: frequencias programadas (pero cumplidas a veces)

Se espera ofrecer mejor servicio con los mismos recursos

Horario “óptimo”

Meta

Escoger tiempos de llegada y espera en los paraderos para que

- buses cumplan con demanda
- trasbordos estén sincronizados

Tradicionalmente, horarios escogidos a mano

Algoritmos heurísticos pueden hallar soluciones suficientemente óptimas en redes realisticas
(algoritmos exactos tb. si hay una formulación fuerte)

Horario "óptimo"

Meta

Escoger tiempos de llegada y espera en los paraderos para que

- buses cumplan con demanda
- trasbordos estén sincronizados

Tradicionalmente, horarios escogidos a mano

Algoritmos heurísticos pueden hallar soluciones suficientemente óptimas en redes realisticas
(algoritmos exactos tb. si hay una formulación fuerte)

Tamaño del problema

	entre 1:00 y 5:30	% muestra total
emisiones GPS	935 950	< 1
paraderos	4 777	43
rutas	117	18
viajes	84 448	< 1

36.056.735 transacciones bip! fueron usadas para calcular viajes

(Estas cifras representan una semana, la primera de marzo, 2009)

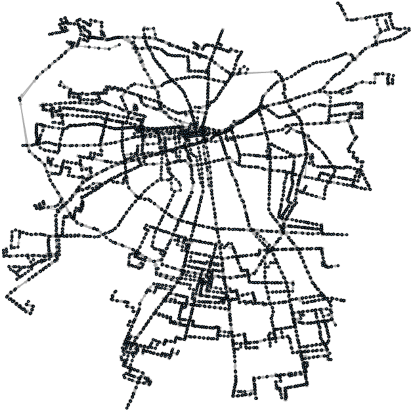
Cobertura nocturna

Red física

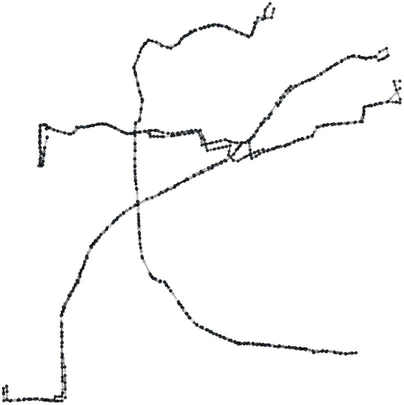
Los recorridos ocurren sobre una red dirigida física en la cual

- los vértices son paraderos
- enlaces entre paraderos representan un segmento de un recorrido, tb. tienen estructura espacial.

La optimización no cambia las rutas.



Caso prueba



Cobertura de red y visualización de trasbordos
Sólo 3 servicios (ida y regreso): 107, 401, 504

Formulación básica

En todo problema de optimización, se minimiza la

Función objetivo

- suma de tiempos (para hacer trasbordo) de espera modelados
- podemos penalizar también tiempos de detención

bajo unas

Restricciones

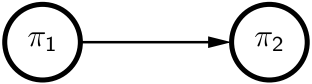
- intervalo (frecuencia) asignado a cada servicio
- límites de tiempos de espera, viaje, y trasbordo

Otras suposiciones: determinístico, discreto, condiciones de borde periódicas

El concepto de eventos

evento 1 corresponde a **llegar** en un bus de la primera línea

evento 2 corresponde a **salir** en un bus de la segunda línea



un trasbordo

Definiciones

π_i tiempo al que occure por primera vez evento i
P_i periodo con que repite evento i

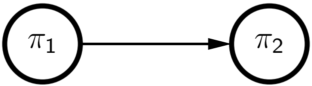
Anotar

Escogemos $\pi_i \in [0, P_i)$
P_i transportistas usualmente anidados, ej. $P_i \in \{7.5, 15, 30\}$

El concepto de eventos

evento 1 corresponde a **llegar** en un bus de la primera línea

evento 2 corresponde a **salir** en un bus de la segunda línea



un trasbordo

Definiciones

π_i tiempo al que occure por primera vez evento i
P_i periodo con que repite evento i

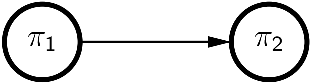
Anotar

Escogemos $\pi_i \in [0, P_i)$
P_i transportistas usualmente anidados, ej. $P_i \in \{7.5, 15, 30\}$

El concepto de eventos

evento 1 corresponde a **llegar** en un bus de la primera línea

evento 2 corresponde a **salir** en un bus de la segunda línea



un trasbordo

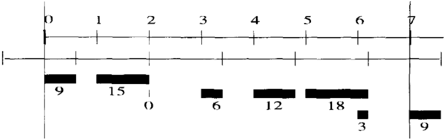
Definiciones

π_i tiempo al que occure por primera vez evento i
P_i periodo con que repite evento i

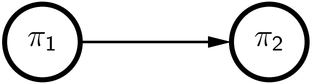
Anotar

Escogemos $\pi_i \in [0, P_i)$
P_i transportistas usualmente anidados, ej. $P_i \in \{7.5, 15, 30\}$

Calculando tiempos de espera para un trasbordo



2 eventos y su tiempo "slack", de Nachtigall 1996



un trasbordo

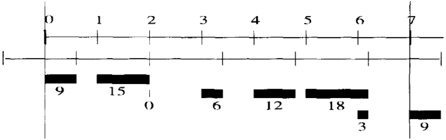
Cada evento *i* genera una secuencia de tiempos periódicos

$$\pi_i + qP_i;\ q \in \mathbb{Z}$$

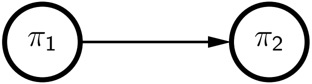
Así que nos interesa la diferencia para nuestro trasbordo

$$(\pi_2 + rP_2) - (\pi_1 + qP_1);\ q, r \in \mathbb{Z}$$

Calculando tiempos de espera para un trasbordo



2 eventos y su tiempo "slack", de Nachtigall 1996



un trasbordo

Δt entre ocurrencias específicas (q, r) de estos dos eventos

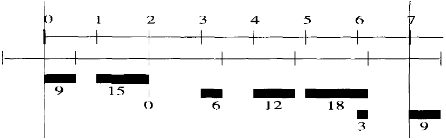
$$(\pi_2 + rP_2) - (\pi_1 + qP_1);\ q, r \in \mathbb{Z}$$

Recorrer todo $(q, r) \in \mathbb{Z}^2$ equivale recorrer todo $k \in \mathbb{Z}$ con un solo periodo,

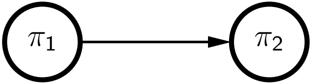
$$\pi_2 - \pi_1 + kP_a$$

donde $P_a = \gcd(P_1, P_2)$ es el periodo del trasbordo $a = (1, 2)$

Calculando tiempos de espera para un trasbordo



2 eventos y su tiempo "slack", de Nachtigall 1996



un trasbordo

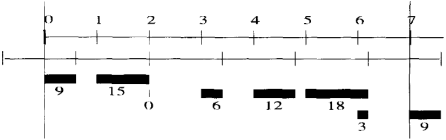
Realmente, el pasajero sube al primer bus que puede.

$$\Delta t_{\min} = \min_{k \in \mathbb{Z}} \{\pi_2 - \pi_1 + kP_a \mid \pi_2 - \pi_1 + kP_a \geq 0\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a$$

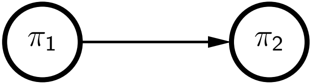
$$\Delta t_{\max} = \Delta t_{\min} + \max_{k \in \mathbb{Z}} \{kP_a \mid kP_a < P_2\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + (P_2 - P_a)$$

$$\Delta t_{\text{med}} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + \frac{1}{2}(P_2 - P_a)$$

Calculando tiempos de espera para un trasbordo



2 eventos y su tiempo "slack", de Nachtigall 1996



un trasbordo

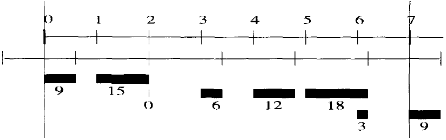
Realmente, el pasajero sube al primer bus que puede.

$$\Delta t_{\min} = \min_{k\in\mathbb{Z}}\{\pi_2 - \pi_1 + kP_a | \pi_2 - \pi_1 + kP_a \geq 0\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a$$

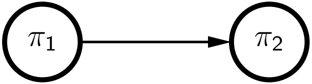
$$\Delta t_{\max} = \Delta t_{\min} + \max_{k\in\mathbb{Z}}\{kP_a | kP_a < P_2\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + (P_2 - P_a)$$

$$\Delta t_{\text{med}} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + \frac{1}{2}(P_2 - P_a)$$

Calculando tiempos de espera para un trasbordo



2 eventos y su tiempo "slack", de Nachtigall 1996



un trasbordo

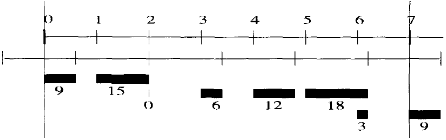
Realmente, el pasajero sube al primer bus que puede.

$$\Delta t_{\text{min}} = \min_{k\in\mathbb{Z}}\{\pi_2 - \pi_1 + kP_a | \pi_2 - \pi_1 + kP_a \geq 0\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a$$

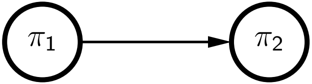
$$\Delta t_{\text{max}} = \Delta t_{\text{min}} + \max_{k\in\mathbb{Z}}\{kP_a | kP_a < P_2\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + (P_2 - P_a)$$

$$\Delta t_{\text{med}} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + \frac{1}{2}(P_2 - P_a)$$

Calculando tiempos de espera para un trasbordo



2 eventos y su tiempo “slack”, de Nachtigall 1996



un trasbordo

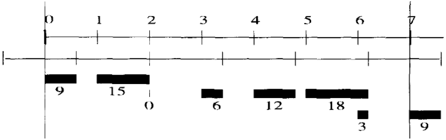
Realmente, el pasajero sube al primer bus que puede.

$$\Delta t_{\min} = \min_{k\in\mathbb{Z}}\{\pi_2 - \pi_1 + kP_a | \pi_2 - \pi_1 + kP_a \geq 0\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a$$

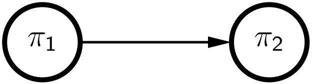
$$\Delta t_{\max} = \Delta t_{\min} + \max_{k\in\mathbb{Z}}\{kP_a | kP_a < P_2\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + (P_2 - P_a)$$

$$\Delta t_{\mathrm{med}} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + \frac{1}{2}(P_2 - P_a)$$

Calculando tiempos de espera para un trasbordo



2 eventos y su tiempo "slack", de Nachtigall 1996



un trasbordo

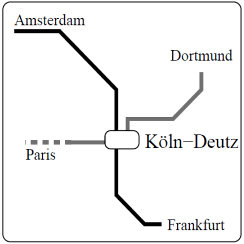
Realmente, el pasajero sube al primer bus que puede.

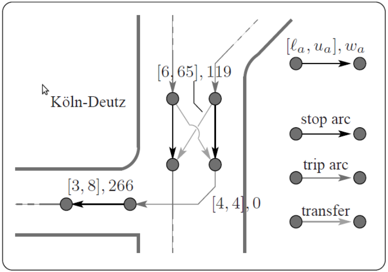
$$\Delta t_{\text{min}} = \min_{k\in\mathbb{Z}}\{\pi_2 - \pi_1 + kP_a | \pi_2 - \pi_1 + kP_a \geq 0\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a$$

$$\Delta t_{\text{max}} = \Delta t_{\text{min}} + \max_{k\in\mathbb{Z}}\{kP_a | kP_a < P_2\} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + (P_2 - P_a)$$

$$\Delta t_{\text{med}} = (\pi_2 - \pi_1) \mod P_a + \frac{1}{2}(P_2 - P_a)$$

Más que trasbordos





Ejemplo para intersección de 2 trenes, de Liebchen 2006

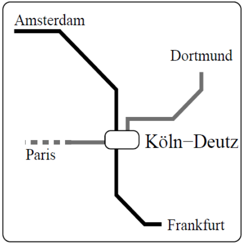
Grafo de eventos

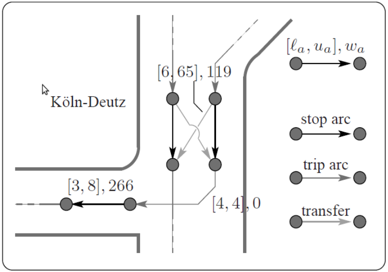
Expandimos la red física a un grafo abstracto en lo cual

- vértices son eventos (llegada o salida de buses de cierta línea y cierta parada)
- arcos son actividades (viaje, detención, trasbordo)

Después, se puede simplificar sistemáticamente

Más que trasbordos





Ejemplo para intersección de 2 trenes, de Liebchen 2006

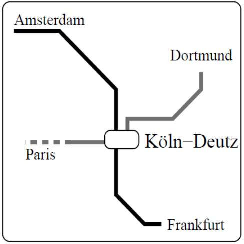
Grafo de eventos

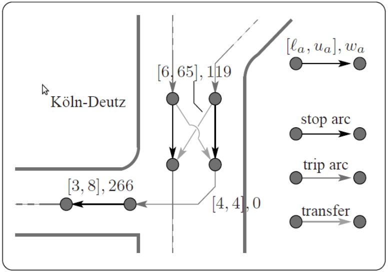
Expandimos la red física a un grafo abstracto en lo cual

- vértices son eventos (llegada o salida de buses de cierta línea y cierta parada)
- arcos son actividades (viaje, detención, trasbordo)

Después, se puede simplificar sistemáticamente

Más que trasbordos





Ejemplo para intersección de 2 trenes, de Liebchen 2006

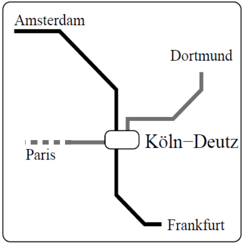
Grafo de eventos

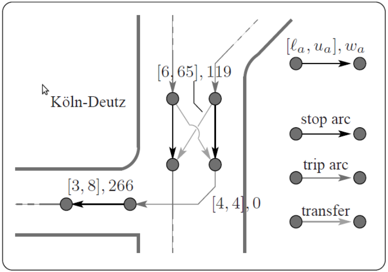
Expandimos la red física a un grafo abstracto en lo cual

- vértices son eventos (llegada o salida de buses de cierta línea y cierta parada)
- arcos son actividades (viaje, detención, trasbordo)

Después, se puede simplificar sistemáticamente

Más que trasbordos





Ejemplo para intersección de 2 trenes, de Liebchen 2006

Grafo de eventos

Expandimos la red física a un grafo abstracto en lo cual

- vértices son eventos (llegada o salida de buses de cierta línea y cierta parada)
- arcos son actividades (viaje, detención, trasbordo)

Después, se puede simplificar sistemáticamente

Modelo completo

"Periodic event scheduling problem" (PESP)

Dado un digrafo de eventos $G = (V, E)$ y dado límites inferior $l \in \mathbb{Z}^{|A|}$ y superior $u \in \mathbb{Z}^{|A|}$, y periodos de actividad $P \in \mathbb{N}^{|A|}$, y un vector de costos $w \in \mathbb{Z}^{|A|}$, el siguiente programa define el PESP:

$$\min \sum_{(i,j)=a \in E} w_a(\pi_j - \pi_i + k_a P_a) = \min \left\{ w^T (B^T \pi + \operatorname{diag}(P) k) \right\}$$

(B es la matriz de incidencia nodo-arco)

$$B^T \pi + \operatorname{diag}(P) k \leq u \qquad \pi \in [0, P)$$

$$B^T \pi + \operatorname{diag}(P) k \geq l \qquad k \in \mathbb{Z}^{|A|}$$

Modelo completo

"Periodic event scheduling problem" (PESP)

Dado un digrafo de eventos $G = (V, E)$ y dado límites inferior $l \in \mathbb{Z}^{|A|}$ y superior $u \in \mathbb{Z}^{|A|}$, y periodos de actividad $P \in \mathbb{N}^{|A|}$, y un vector de costos $w \in \mathbb{Z}^{|A|}$, el siguiente programa define el PESP:

$$\min \sum_{(i,j)=a \in E} w_a(\pi_j - \pi_i + k_a P_a) = \min \left\{ w^T (B^T \pi + \mathrm{diag}(P) k) \right\}$$

(B es la matriz de incidencia nodo-arco)

$$\begin{aligned} B^T \pi + \mathrm{diag}(P) k &\leq u & \qquad \pi &\in \{0, \ldots, P-1\}^{|V|} \\ B^T \pi + \mathrm{diag}(P) k &\geq l & \qquad k &\in \mathbb{Z}^{|A|} \end{aligned}$$

Herramientas computacionales

Datos

- **R**: lenguaje estadístico, para procesar todo
- packages importantes: **igraph**, **sp**, **RdbiPgSQL**
- comunica con una base de datos
  PostegreSQL + **PostGIS** (conciencia espacial)

Optimización

Gurobi: solucionador genérico MILP, licencias académicas sin costo

Resultados caso prueba - 3 líneas

problema (grafo no-reducida)

IP variables $= |V| + |E| = 1024 + 1043 = 2067$
arcos de trasbordo: 24
arcos a con $l_a < u_a$: 50
trasbordos: min 1, max 23, mean 4.12, N=103

MIP solucionador

tiempo hasta probar optimalidad 0.91 hr
(2 x 2.4 GHz, 2 GB RAM)
función objetivo = 27 791 s
costo (incl. caminata) $\approx$ 4.5 min/trasbordo
(de 5.9 min/trasbordo primera solucion factible, 23% mejor)

Gracias! Preguntas?

Gracias también a Carolina Palma, Mauricio Zuñiga, Daniel Fischer, la División de Transporte, Transantiago, Fulbright, Andrés Moreira, Eric Goles, y el Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso.