ARRIVAL I

Algorithms for **R**obust and online **R**ailway optimization: **I**mproving the **V**alidity and reli**A**bility of **L**arge scale systems

Juan A. Mesa
Universidad de Sevilla

ARRIVAL

- Sexto Programa Marco
- Prioridad 2: Tecnologías de la Sociedad de la Información (Information Society Technologies)
- Proyecto de Investigación Orientado (Specific Targeted Research Project)
- Contrato: 021235-2
- Periodo de vigencia: 01/02/06 – 31/01/09

Entidades participantes

- Instituto Tecnológico de Computación (Universidad de Patras, Grecia): C. Zaroliagis, P. Spirakis, S. Kontogiannis.
- Universidad de Karlsruhe (Facultad de Informática, cooperación con DB, Alemania): Dorothea Wagner, P. Sanders.
- Universidad Erasmus de Rotterdam (Holanda, conexión con NS): L. Kroon, A. Wagelmans

Entidades Participantes

- Escuela Politécnica Federal de Zurich (ETCH, Suiza): P. Widmayer, R. Jacob, L. Peeters.
- Universidad de L'Aquila (Dpto. de Ingeniería Eléctrica con Dpto. de Informática y Sistemas de la Universidad de Roma "La Sapienza", Italia): G. Di Stefano, D. Frigioni, C. Demetrescu, A. Marchetti.
- Universidad Técnica de Eindhoven (TUE, Dpto. de Matemáticas y Ciencias de la Computación con Centro de Matemáticas y Computación de Amsterdam, CWI): L. Stougie, C. Hurkens, G. Woeginger.

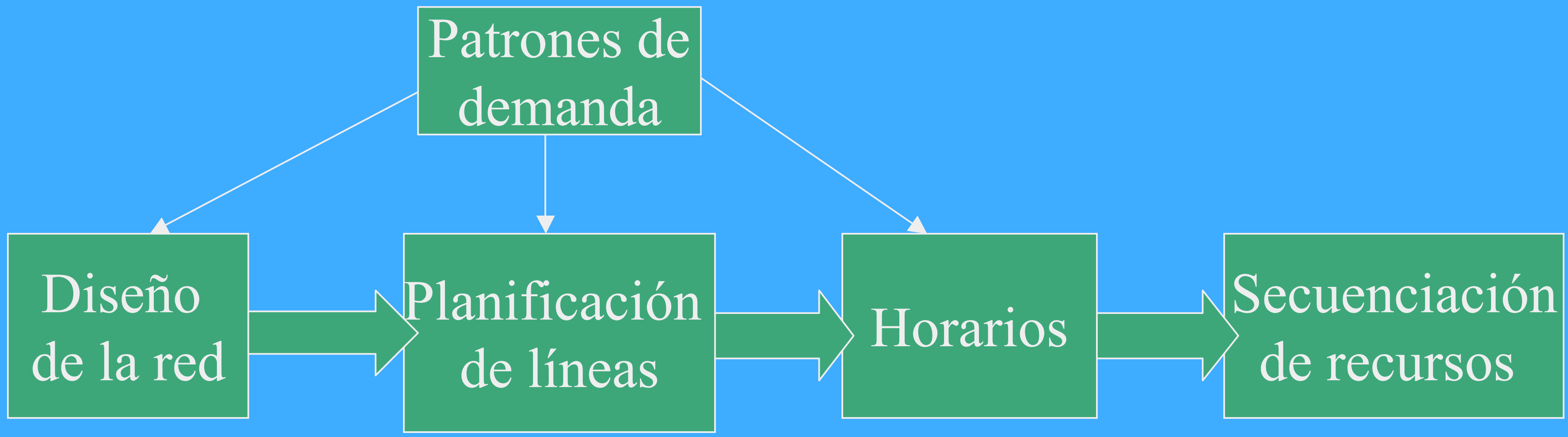
Entidades Participantes

- Universidad Técnica de Berlín (Grupo de Optimización, Combinatoria y Algoritmos en Grafos, TUB, Berlín, cooperación con DB): R. Moehring, M. Luebbecke, F. Geraets (DB)
- Universidad de Bolonia (Dpto. de Electrónica, Ciencias de la Computación y Automática): P. Toth, A. Caprara
- Universidad de Padua (Dpto. de Ingeniería de la Información): M. Fischetti, M. Monaci
- Universidad de Gotinga (Facultad de Matemáticas, cooperación con DB): A. Schöbel

Entidades participantes

- Universidad de Sevilla (cooperación con UPM, UCLM, UHU): J.A. Mesa, A. Marín, F. Ortega, R. García, F. Perea
- Universidad Politécnica de Valencia (Dpto. de Lenguajes, Ciencias de la Computación e IA): F. Barber, P. Tormos, Salido
- Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses (SNCF, Dpto. de Investigación y Desarrollo): C. Weber, D. de Almeida

Planificación jerárquica



Finalidad y objetivos

- Finalidad principal:
  Realizar investigación algorítmica básica con objeto de proporcionar respuestas a cuestiones sobre eficacia y calidad, encuadradas en la planificación robusta y en tiempo real de sistemas de gran escala como son los ferrocarriles

Finalidad

- Comprender las razones que hacen que los problemas de optimización robusta y en tiempo real en ferrocarriles sean *difíciles*
- Desarrollar principios de complejidad y algorítmicos para tratar la *dureza* de dichos problemas mediante una metodología interdisciplinar

Objetivos

- **Planificación robusta:** Optimización de las diferentes etapas de la planificación, antes de la operación, de forma que se absorban de la mejor manera posible las posibles interrupciones
- **Solución robusta:** mantiene la calidad de la solución óptima tanto como sea posible en el supuesto de interrupciones
- **Precio de la robustez:** diferencia (en calidad) entre el de la solución óptima y de la robusta

Objetivos

- Planificación en tiempo real: optimización de las reacciones y replanificación después de una interrupción y antes de que se produzca toda la cadena de interrupciones
- Precio de la recuperabilidad: diferencia cuantitativa (en calidad) entre el plan óptimo y el tiempo real
- Relaciones entre planificación robusta y en tiempo real

Objetivos científicos

- Comprender la interacción entre la planificación a largo plazo y la optimización en presencia de sucesos; precio de la robustez
- Comprender y modelizar matemáticamente los problemas de planificación en tiempo real e investigar la existencia de soluciones de calidad garantizada; precio de la recuperabilidad
- Comprender las interacciones entre la planificación en tiempo real y las distintas etapas de la planificación

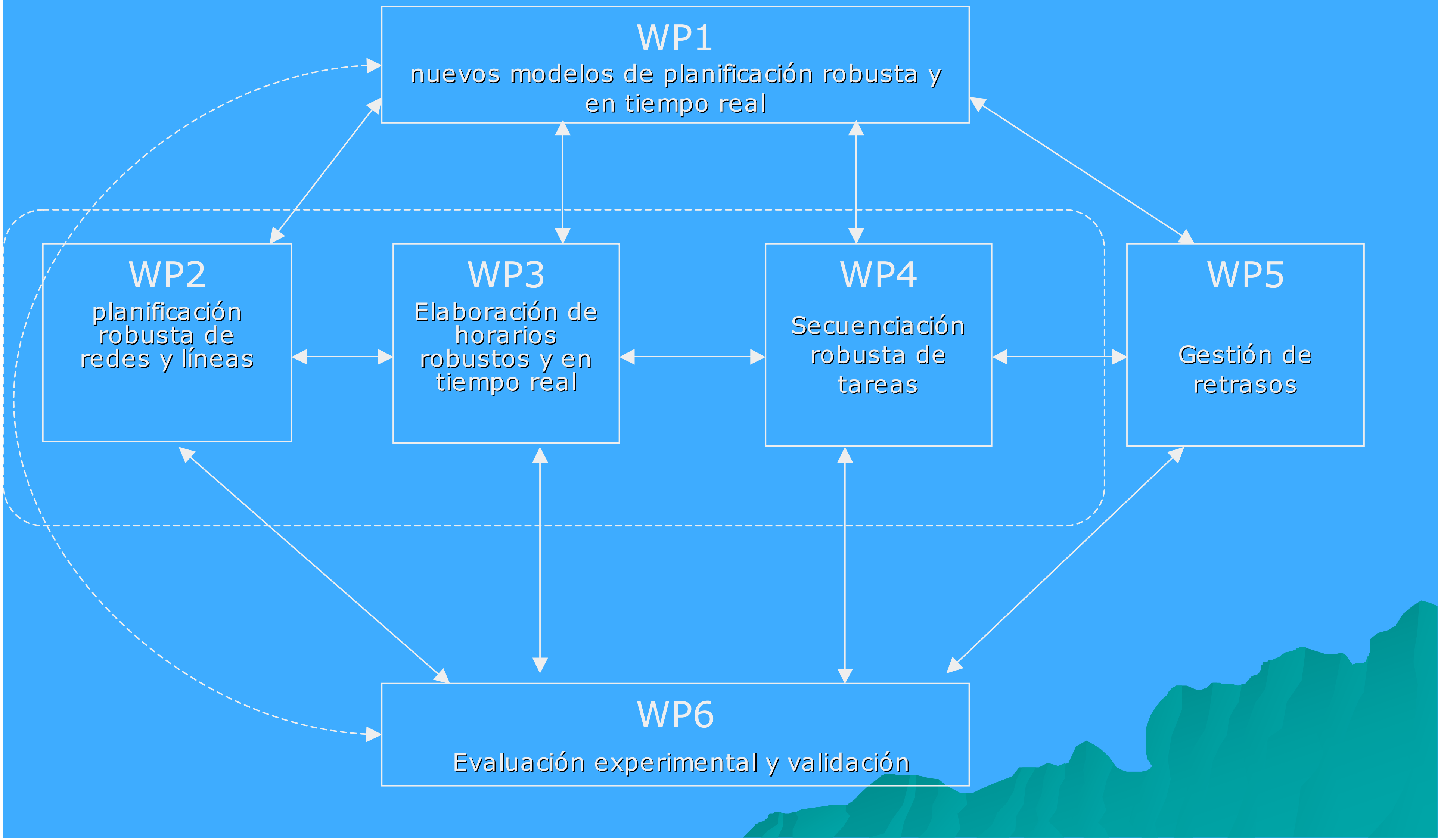
Objetivos científicos

- Investigar cómo se pueden tratar los objetivos (posiblemente) conflictivos de la planificación en tiempo real y la (robusta) a largo plazo en un sistema con componentes (etapas) interdependientes.
- Iniciar y explorar nuevos modelos de optimización, en tiempo real y robusta, de sistemas de gran escala
- Identificar los métodos técnicamente maduros y validar experimentalmente sus garantías teóricas

Plan de trabajo

- WP1: nuevos modelos de planificación robusta y en tiempo real
- WP2: planificación robusta de redes y líneas
- WP3: tablas de horarios robustas y en tiempo real, y su actualización
- WP4: secuenciación robusta y en tiempo real de recursos
- WP5: gestión de retrasos
- WP6: evaluación experimental y validación
- WP7: gestión, difusión y autoevaluación

Representación gráfica de los grupos de trabajo



TRABAJO YA CONCLUIDO

- Critical evaluation of existing approaches to robustness and online optimization in view of very large-scale systems.
- New theoretical notion of the prices of robustness and recoverability.
- Critical evaluation of nominal line planning approaches.
- Critical examination of game-theoretic approaches from a robust optimization perspective.
- Critical evaluation of the existing solution approaches for timetabling problems.
- Analysis of data structures and algorithms for online queries in timetable information updating.

TRABAJO YA CONCLUIDO

- Critical analysis and evaluation of existing methods for railway resource (re-) scheduling
- Critical analysis of computational complexity of robust and online railway resource scheduling problems
- Modelling of operational constraints, stochastic online delay management, and definition of robustness for delay management
- Collection of real-world data from railway companies

ROBUSTEZ EN PLANIFICACIÓN DE FERROCARRILES: ¿DÓNDE APARECE?

- Fluctuaciones en los parámetros: datos de pasajeros, tiempo de viaje, costes a medio y largo plazo.
- Perturbaciones o interrupciones en el servicio.
- Integración de varias fases de la planificación, por ejemplo en la información proporcionada por el plan de líneas para la elaboración de horarios.

ROBUSTEZ EN PLANIFICACIÓN DE FERROCARRILES: ¿CÓMO SE TRATA?

- Optimización robusta:
  [A,b] conjunto de realizaciones posibles de los parámetros A,b.

  $$\left\{ \min_x \left\{ c^t x : Ax \leq b \right\} [A,b] \in \zeta \right\}$$

  Problema homólogo robusto

  $$\min_x \left\{ \sup(c^t x) : Ax \leq b \right\}$$

ROBUSTEZ EN PLANIFICACIÓN DE FERROCARRILES: ¿CÓMO SE TRATA? II

- Programación estocástica: cuando se conoce la distribución de probabilidad de los parámetros.
  - Optimizar el valor esperado de la f.o.
  - Imponer que las restricciones estocásticas se satisfagan con probabilidad alta.
- Otras: problemas de satisfacción de restricciones (secuenciación), lógica difusa,...

Diseño de la red

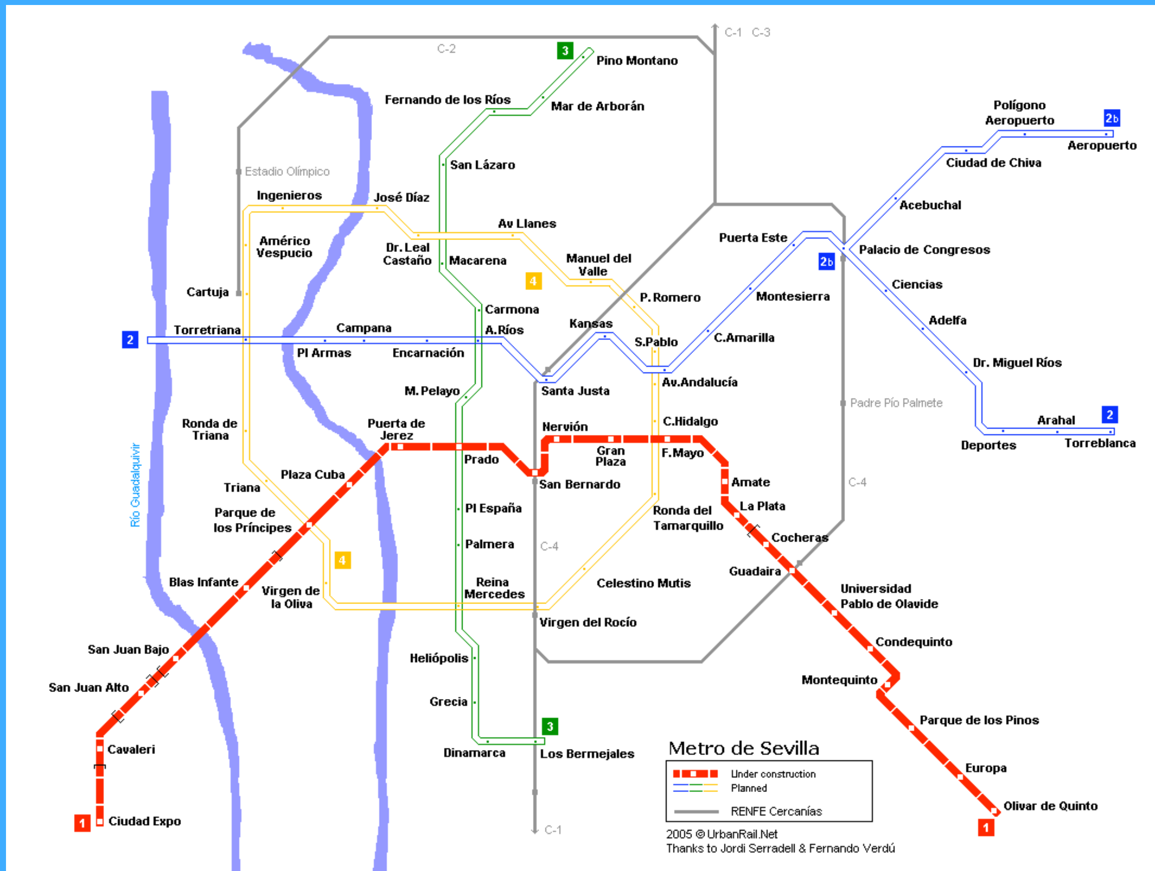
- Elección de arcos (aristas)
- Localización de estaciones
- Localización de otras instalaciones:

  cocheras, subestaciones, intercambiadores, “park-and-ride”, etc.

Diseño de la red, Localización de estaciones

- Partiendo de la nada o de casi nada
- Existe ya una red y se trata de extenderla o mejorarla
- Existe una red (o unos alineamientos previstos) y se trata de localizar las estaciones

Diseño de la red



Diseño de la red

OBJETIVOS:

- Orientados a los departamentos de planificación: Cobertura poblacional, cobertura de viajes, disminución de la congestión y de la polución, sostenibilidad, etc.
- Orientados a las empresas: costes de construcción, de material movil y de operación
- Orientados a los usuarios: accesibilidad, tiempo de recorrido, etc.

Diseño de la red: datos

Diseño de la red: variables

Diseño de la red: función objetivo

Diseño de la red: restricciones

Diseño de la red: restricciones

Diseño de la red: restricciones

Diseño de la red: restricciones

Inclusión de la robustez en el modelo

- Condiciones sobre el flujo
  - Restricciones flujo arco-demanda
  - Restricciones flujo arco
  - Restricciones arco-demanda
- Tiempo total de viaje
  - Minimización tiempo de viaje al fallar un arco (1er modelo).
  - Minimización de la diferencia de tiempos entre el pleno rendimiento y el fallo de un arco (2º modelo).
- Cobertura de viajes
  - Maximización de la mínima cobertura de viajes ante el fallo de un arco (tercer modelo).

Restricciones de flujo 1: restricciones de flujo de arco-demanda

$$f_{ij}^{w} \leq \frac{1}{q_{ij}^{w}}, \ (n_i, n_j) \in A'_{daf} \subseteq A', \ w \in W_{daf} \subseteq W,$$

Sólo cierto porcentaje de algunas demandas se pueden enrutar a través de los arcos seleccionados.
Si falla un arco, sólo tal porcentaje de la demanda se verá afectado

Restricciones de flujo 2: restricciones de arco flujo

$$\sum_{w \in W_{af}} f_{ij}^{w} + \sum_{w \in W_{af}} f_{ji}^{w} \leq \frac{|W_{af}|}{q_{ij}}, (n_i, n_j) \in A'_{af} \subseteq A', W_{af} \subseteq W.$$

Sólo cierto porcentaje del número total de pares origen-destino se puede enrutar a través de los arcos seleccionados.

En caso de que falle un arco, como mucho el porcentaje elegido del flujo se verá afectado.

Restricciones de flujo 3: restricciones de arco demanda

$$\sum_{w \in W_{ad}} f_{ij}^{w} g_w + \sum_{w \in W_{ad}} f_{ji}^{w} g_w \leq \frac{\sum_{w \in W} g_w}{q_{ij}}, (n_i, n_j) \in A'_{ad} \subseteq A',\ W_{ad} \subseteq W.$$

Sólo cierto porcentaje de la demanda total se puede enrutar a través de los arcos seleccionados.

En caso de que falle un arco, no más de dicho porcentaje de demanda se verá afectado.

Tiempo total de viaje

$$\min_{r \in R} \max_{(i,j) \in A'} [T^{ij}(r) - T(r)] \text{ or } \min_{r \in R} \max_{(i,j) \in A'} T^{ij}(r)$$

$T(r)$ is the total traveling time of r

$T^{ij}(r)$ is the total traveling time if arc (i,j) fails

También imponemos un límite inferior en la cobertura de viajeros de la red, no puede ser inferior a σz^*

Siendo z^* la cobertura de una red óptima, σ en [0,1]

Pseudocódigo

Calculate the optimal network, r^*

$R = \{r^*\}$

until break

Calculate the optimal network $r \notin R$

if $C(r) \geq \sigma C(r^*)$

  $R := R \cup \{r\}$

else

  break

end if

$\alpha := +\infty$

for $r \in R$ do

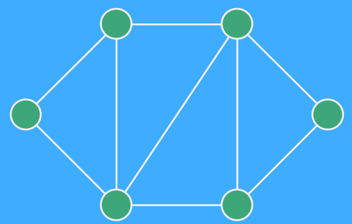
  $\alpha_r = \max_{a \in A'}(T^a(r) - T(r))$ or $\max_{a \in A'} T^a(r)$

  if $\alpha_r < \alpha \Rightarrow r^{SOL} := r$ end if

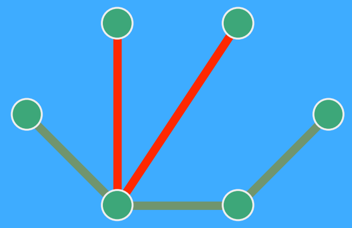
end do

return r^{SOL}

EJEMPLO

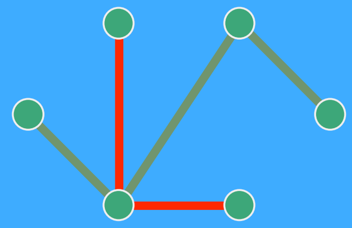


$\sigma = 0.9$ {Cobertura de viaje, $\max(T^{ij}(r)-T(r))$, $\max T^{ij}(r)$}



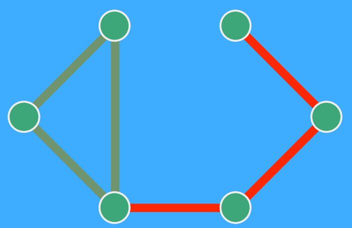
{430, 222.2, 789.4}

r^*



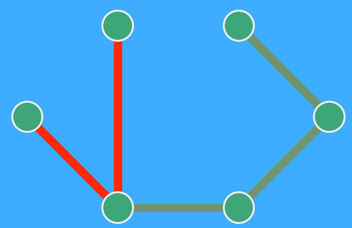
{399, 119.6, 751}

r_2



{391, 212.4, 744.4}

r_3



{391, 212.4, 760.4}

r_4

$$\min_{r\in R}\ \max_{(i,j)\in A'} [T^{ij}(r) - T(r)] \Rightarrow r_2$$

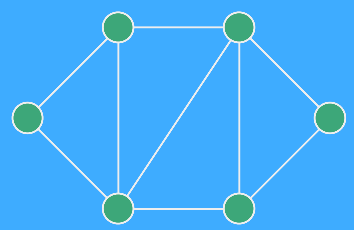
$$\min_{r\in R}\ \max_{(i,j)\in A'} T^{ij}(r) \Rightarrow r_3$$

Modelo cuadrático

Aún no hemos podido formular un único problema de programación lineal entera, pero sí un problema entero cuadrático.

$$
\begin{array}{ll}
\min & z \\
\text{s.t.:} & T^w_{i_0 j_0} = p_w\left(\sum_{(i,j)\neq(i_0,j_0)} d_{ij} f^w_{ij} + (u^{COM}_{i_0 j_0} + 0.2) f^w_{i_0 j_0} + (u^{COM}_{j_0 i_0} + 0.2) f^w_{j_0 i_0}\right) + \mu u^{COM}_{ij}(1 - p_w) \\
& T_{ij} = \sum_{w\in W} T^w_{ij} g_w \\
& T = \sum_{w\in W} g^w (p_w u^{RTN}_w + (1-p_w) u^{COM}_w) \\
& z^{RTN} \geq 0.9 z^* \\
& T_{ij} \leq z \text{ or } (T_{ij} - T) \leq z \\
& \text{Budget constraints} \\
& \text{Alignment location constraints} \\
& \text{Routing demand conservation constraints} \\
& \text{Location-Allocation and splitting-demand constraints}
\end{array}
$$

Ejemplo



Modelo cuadrático $\longrightarrow$

2799 filas
2090 columnas
20834 noceros

No resuelto aún…

Cobertura de viaje

$$\max_{r \in R} \min_{(i,j) \in A'} C^{ij}(r)$$

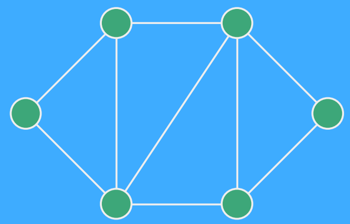
$C^{ij}(r)$ is the trip coverage of the network r if arc $(i,j) \in A'$ fails

Este problema se puede modelar como un problema de Programación lineal entera

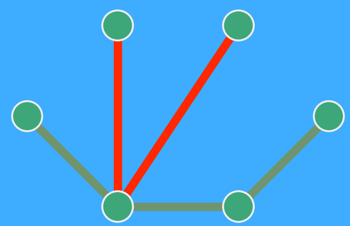
Problema ILP

$$
\begin{aligned}
\max \quad & z \\
\text{s.t.:} \quad & u_w^{RTN}(i,j) = \sum_{(r,s)\neq(i,j)} d_{rs} f_{rs}^w + (u_{ij}^{COM} + \alpha_{ij}) f_{ij}^w + \sum_{(r,s)} \mu u_{rs}^{COM} \varphi_{rs}^w \\
& \varepsilon + u_w^{RTN}(i,j) - u_{ij}^{COM} - M(1 - p_w^{ij}) \leq 0 \\
& \varepsilon + u_w^{RTN}(i,j) - u_{ij}^{COM} + M p_w^{ij} \geq 0 \\
& C^{ij} = \textstyle\sum_{w\in W} g^w p_w^{ij} \\
& z^{RTN} \geq \sigma z^* \\
& C^{ij} \geq z \\
& \text{Budget constraints} \\
& \text{Alignment location constraints} \\
& \text{Routing demand conservation constraints} \\
& \text{Location-Allocation and splitting-demand constraints}
\end{aligned}
$$

Ejemplo



Ejemplo



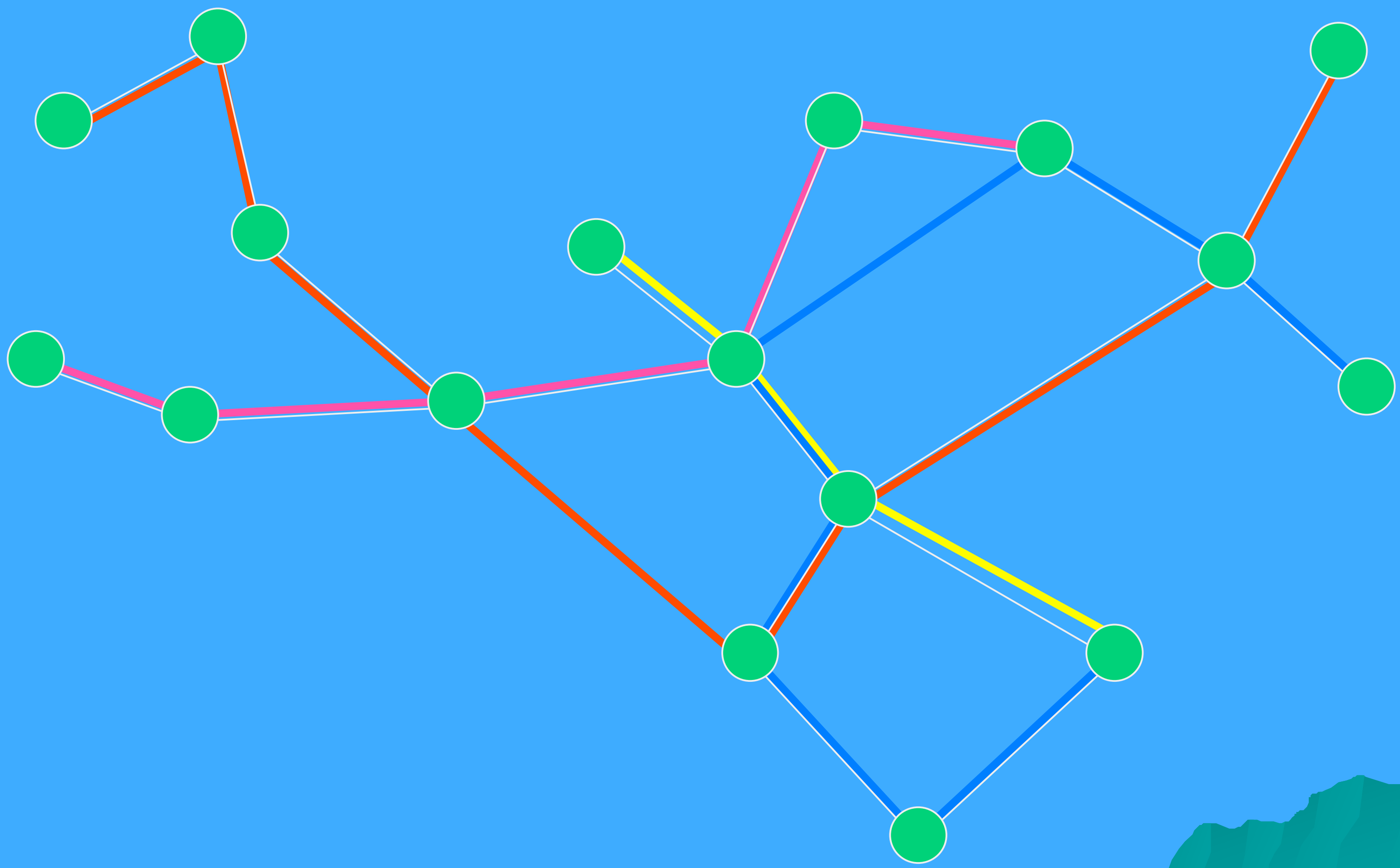
6323 filas
3928 columnas
46062 valores no nulos

18’39’’

CONCLUSIONES

- Debemos tener en cuenta la robustez en el diseño de una red de transporte.
- Se puede medir de diferentes maneras
- Modelos computacionalmente complejos
- Fallos en estaciones
- Heurísticos?

Planificación de líneas



Planificación de líneas

- Dada una red física de transporte $RT=(V,E)$ con
  - Paradas: V
  - Conexiones directas: E
- Encontrar un conjunto de líneas, es decir
  - Determinar su número
  - Las rutas
  - Sus frecuencias
- Tal que
  - Maximice el número de clientes (o los capture todos)
  - Minimice tiempos (acceso, ahorro en la red,…)
  - Minimice costes

Planificación de líneas

- Concepto de línea (L,f) L:conjunto de líneas
- $f=(f_l)$ sus frecuencias
- Cada arista tiene asociadas unas frecuencias mínimas y máximas, f_l^{min} y f_l^{max}
- La frecuencia de una arista con respecto a un concepto de línea

OTROS PROBLEMAS

- Asignación de locomotoras
  - Minimizar el número de locomotoras en uso
  - Minimizar costes
  - Formulaciones de grafos y de IP
- Asignación de vagones
  - Minimizar el número de vagones en uso
  - Minimizar costes
  - Formulaciones de grafos y de IP
- Secuenciación del personal
  - Set covering models
- Asignación de vías en estaciones
  - Complejidad computacional
  - Formulación IP
- Aparcamiento de los trenes cuando no operan (Shunting)
  - Formulación basada en teoría de grafos

CONTACTOS Y EVENTOS

- Página web del proyecto: http://arrival.cti.gr/
- Arrival Fall School http://www.aloj.us.es/fsarrival/
- ATMOS conference http://www.math.tu-berlin.de/atmos07/

Fin

Gracias por su atención