

**Algorithms for Robust and online Railway  
optimization: Improving the Validity and  
reliability of Large-scale systems  
(ARRIVAL)  
FP6-021235-2, EU-IST-STREP**

**Federico Barber**  
**Grupo de Planificación, Scheduling y Restricciones**  
DSIC, DEIOAC Universidad Politécnica de Valencia



Artificial Intelligence  
Planning, Scheduling and  
Constraint-Based Reasoning

DSIC

Presentation Research Lines and Developed Tools Transparencia de Tecnología  
Location map Research Projects / Contracts Awards (Premios)  
Members Papers, Publications Some Links

Copyright: Federico Barber (fbarber@dsic.upv.es)  
Open Source: Metodología y Computación  
DSIC  
Universidad Politécnica de Valencia (UPV)  
Carretera de Vera s/n. - P.O. Box 22.012  
46100 Valencia (Spain)  
Phone: (+34) 96.387.32.01 Fax: 96.387.32.09

MOM An automated support tool for railway scheduling



<http://www.dsic.upv.es/users/ia/gps/index.html>

## ARRIVAL WP's

### **WP1: New Models for Robust and Online Planning**

New modelling and algorithmic approaches in very large-scale robust and online optimization.

### **WP2: Robust Network and Line Planning**

### **WP3: Robust and Online Timetabling and Information Updating**

To design of robust timetables and their online update

### **WP4: Robust and Online Resource Scheduling**

### **WP5: Delay Management**

### **WP6: Experimental Evaluation and Validation**

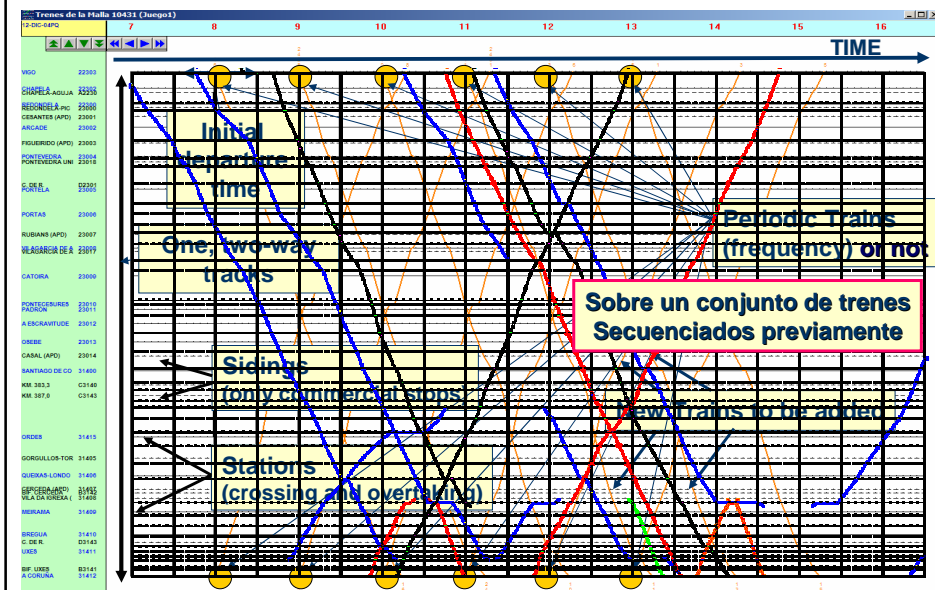
Prototype implementations experimental evaluations

## Temas ARRIVAL – UPVLC (WP1, WP3, WP6)

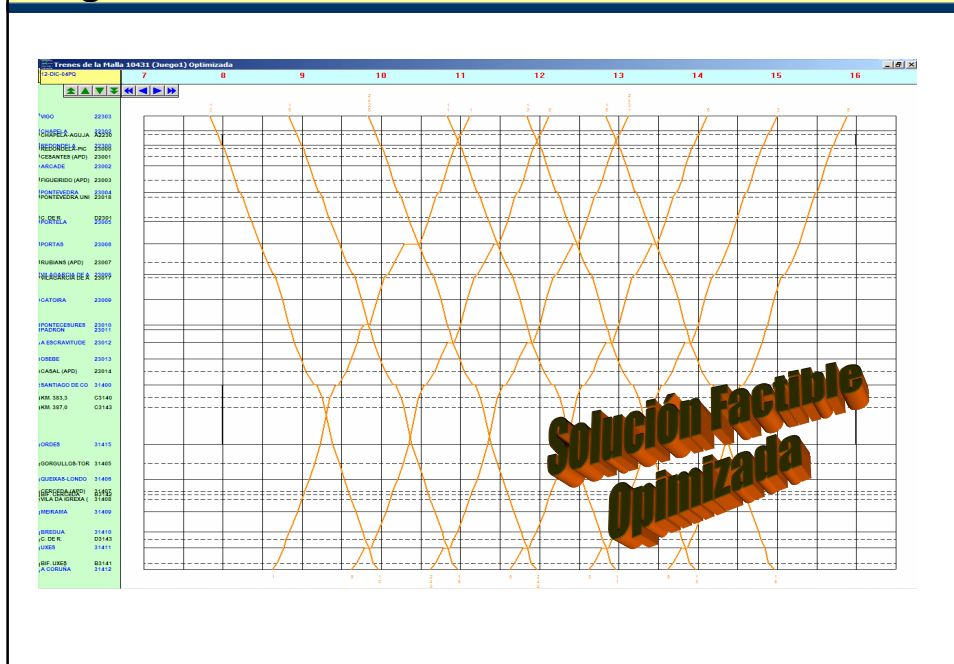
1. Diseño de modelos algorítmicos para complejos problemas de planificación (entorno ferroviario).
2. Aplicación a la generación eficiente de horarios (ferroviarios) optimizados (timetabling).
3. Robustez. Análisis y Modelización. Generación de horarios robustos (Robust Timetabling).
4. On-line timetabling (debido a incidencias).
5. Implementación, Aplicación y Evaluación.



## 1. La Programación de Tráfico Heterogéneo



## Programación de Tráfico Cadenciado



## Programación de Nuevos Trenes con Trenes ya Planificados

También, dado un conjunto de trenes secuenciados previamente....

...podemos añadir nuevos trenes

...que deben hacerse compatibles con los anteriores.



## Datos, Restricciones y Optimalidad

### Deben Satisfacerse:

#### Restricciones de Infraestructura:

- Vía única / Vía doble: Operaciones de cruce y Adelantamiento.
- Número de Vías en Estación.
- Tiempo de Cierre en Estaciones, Intervalos de Mantenimiento, etc.

#### Restricciones de Tráfico:

- Tiempo de Recepción, Tiempo de Expedición, Tiempo de Sucesión, etc.
- Tiempo de Trayecto entre estaciones, Demora por parada no prevista, etc.

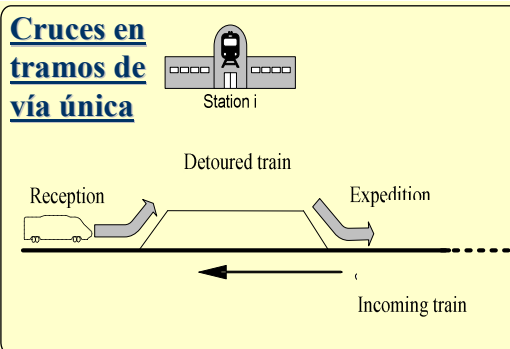
#### Requerimientos de Usuario:

- Tiempos de Salida/Llegada de los trenes ; Cadencias.
- Tiempos entre salidas consecutivas.
- Paradas Comerciales, etc.

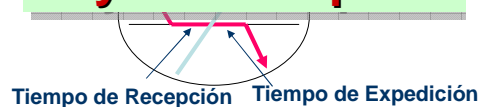
### Optimizando determinados Criterios de Optimización:

- Optimizar Tiempo de Trayecto (minimizar paradas técnicas).
- Equilibrio entre trenes ida/vuelta.
- Robustez, etc.

## Por ejemplo, Conflictos de Tráfico:



**... y otros requerim**



## Timetabling $\Rightarrow$ Problema Combinatorio de Optimización

### Problema de Planificación/Scheduling:

Tareas:  $\{\text{Tren}_1, \text{Tren}_2, \dots, \text{Tren}_n\}$

Recursos:  $\{\text{Estación}_1, \text{Estación}_2, \dots, \text{Estación}_n\} \cup \{\text{Tramo}_1, \text{Tramo}_2, \dots, \text{Tramo}_n\}$

Operaciones:  $\text{Tren}_i * \text{Recurso}_j$

### Problema de Scheduling de Ferrocarriles:

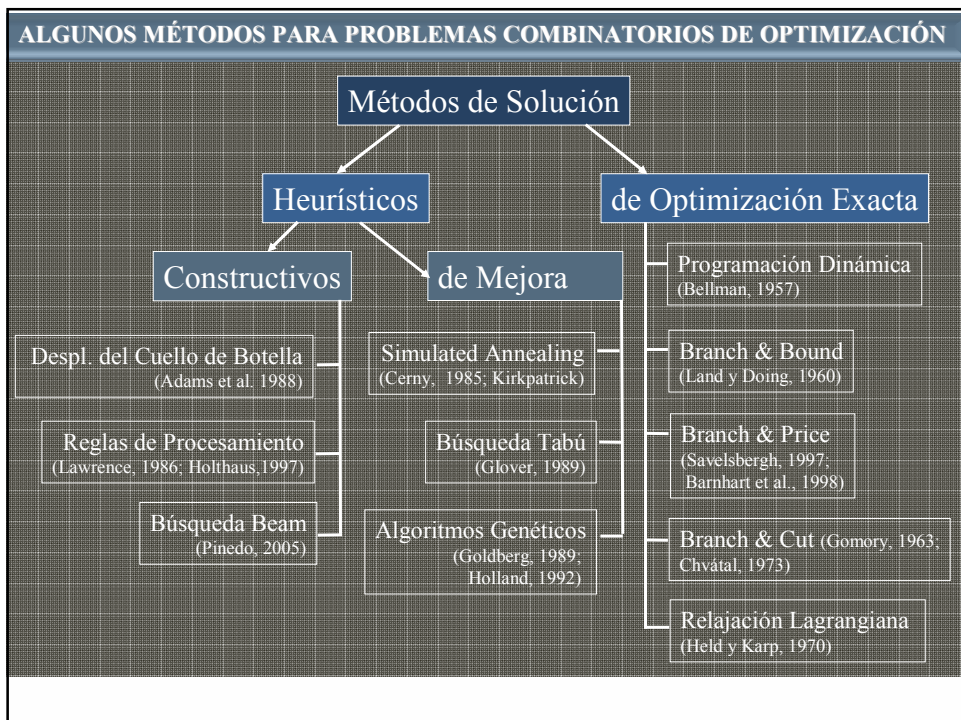
Cada **Tren** puede descomponerse en un conjunto ordenado de **Tren-tramo (T-t)** que debe satisfacer un conjunto de restricciones temporales y de recursos:

▪ **Restricciones Temporales:** Relaciones de precedencia en los tramos de recorrido de cada Tren (+ otras restricciones).

▪ **Restricciones de Recursos:** Un **tramo de vía única** no puede ser ocupado simultáneamente por dos Trenes. (+ Recursos de Estaciones)

▪ **Objetivo:** Generar una secuencia (**horario de los trenes**) donde cada Tren-tramo satisfice las restricciones temporales y de recursos de modo que se optimice una medida de eficiencia y la solución se alcance en el menor tiempo computacional posible.

▪ **NP-Hard:** Los **heurísticos** son los únicos métodos capaces de obtener "buenas" soluciones en un tiempo computacional aceptable.



## MÁS ESPECÍFICAMENTE RELACIONADOS

- Primera formulación empleando programación matemática disyuntiva (Szpigel, 1972).
- Correspondencia con un problema de scheduling tipo Job Shop (Jovanovic, 1989, 1991; Silva 2001).
- Regular el consumo de combustible como parte de la función objetivo (Kraay et al. 1991).
- Regular el tráfico en tramos de vía única utilizando variables binarias (Higgins et al. 1996, 1997).
- Obtener el camino con menor coste utilizando teoría de grafos (Caprara et al. 2002, 2006; Brucker y Strotmann, 2003).
- Minimizar tiempo de espera en las conexiones (Carey, 1994).
- Evitar alcance por considerar todos los trenes con un mismo recorrido y con la misma velocidad (Cai y Goh, 1994).
- Obtener Horarios Periódicos empleando la formulación PESP (Liebchen, y Mohring, 2002)

### **Timetabling** ⇒ Problema Combinatorio de Optimización

#### **Problema de Planificación/Scheduling:**

Tareas: {Tren<sub>1</sub>, Tren<sub>2</sub>, ..., Tren<sub>n</sub>}

Recursos: {Estación<sub>1</sub>, Estación<sub>2</sub>, ..., Estación<sub>n</sub>} ∪ {Tramo<sub>1</sub>, Tramo<sub>2</sub>, ..., Tramo<sub>n</sub>}

Operaciones: Tren<sub>i</sub> \* Recurso<sub>j</sub>

**Que puede ser Modelado como Problema de Satisfacción de Restricciones (CSP) ⇒ Técnicas CSP**

Propiedades de un problema de Scheduling tipo Job Shop	Correspondencia de OPT al Problema de Scheduling tipo Job Shop
Trabajo	Recorrido <i>origen - destino</i> realizado por un tren
Operación	- Visita de un Tren a una Dependencia - Recorrido de un tramo por un Tren
Recurso	Vías ferroviarias en dependencias o en tramos
Centro de Trabajo	- Dependencia - Tramo
Relación de Precedencia	Secuencia ordenada de dependencias que debe visitar un tren
Restricción de Capacidad	- Capacidad de una dependencia - Cruce - Alcance - Sucesión Manual
Inicio de un Trabajo (Release Date)	- Intervalo de Salida - Salidas Periódicas
Finalización de un Trabajo (Due Date)	- Intervalo de Llegada - Retraso Máximo
Preparación del recurso (Setup Time)	- Tiempo de Recepción - Tiempo de Expedición
Restricciones Adicionales. (necesarias para la factibilidad de la solución en el dominio de aplicación)	- Sucesión Automática - Horario de Cierre - Bandas de Mantenimiento - Adelantamiento - Tiempo de Recepción - Tiempo de Expedición - Demora por parada no prevista - Parada Comercial
Función Objetivo	- Minimizar retraso promedio de los Trenes - Minimizar diferencia entre el retraso promedio de trenes que viajan en sentido Ida y el retraso promedio de los trenes que viajan en sentido vuelta

### Un Problema de Satisfacción de Restricciones (CSP)

se puede representar como:

- Un Conjunto de Variables:  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
- Dominios de Interpretación ( $D = \langle D_1, \dots, D_n \rangle$ ) para las variables:  $x_i \in D_i$
- Un Conjunto de Restricciones entre las variables:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$$

Cada restricción es un par:  $c_i = (S_i, R_i)$ ,

$S_i$ : Lista de variables, de longitud  $m_i$  (*aridad de la restricción*)

$R_i$ : Relación  $m_i$ -aria (*relación de la restricción*),  
que expresa las combinaciones válidas de valores simultáneos de las variables en  $s_i$

## Problemas de Satisfacción de Restricciones (CSP) Programación por Restricciones

- Variables: s,e,n,d,m,o,r,y
- Dominios: s,e,n,d,m,o,r,y ∈ {0,...,9}
- Restricciones

**s e n d**  
**+ m o r e**  

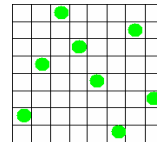

---

**m o n e y**

$$10^3(s+m) + 10^2(e+o) + 10(n+r) + d + e = 10^4m + 10^3o + 10^2n + y$$

### Objetivos

- Consistencia
- Soluciones, Optimalidad



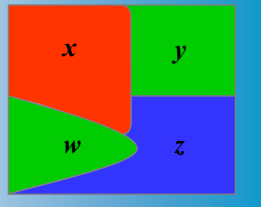
8 Reinas...

6	1	4	5	
	8	3	5	6
2				1
8	4	7		6
	6		3	
7		9	1	4
5				2
	7	2	6	9
4	5	8		7

### Coloreado de Mapas

- Variables: x,y,z,w
- Dominios: x,y,z,w : {r,v,a}
- Restricciones: binarias

$$x \neq y, y \neq z, z \neq x, \dots$$



## Programación Por Restricciones

1)

ESPECIFICACION  
CSP

Variables, Dominios, Restricciones

*(EXPRESIVIDAD)*

2)

RESOLUCIÓN  
CSP

Técnicas Resolución CSP

*(EFICIENCIA)*

- Técnicas Inferenciales (clausura)
- Búsqueda Solución (backtracking, heurísticas)
- Métodos Híbridos: FC, MAC, etc.



## Timetabling $\Rightarrow$ Problema Combinatorio de Optimización

### Problema de Planificación/Scheduling:

Tareas:  $\{\text{Tren}_1, \text{Tren}_2, \dots, \text{Tren}_n\}$

Recursos:  $\{\text{Estación}_1, \text{Estación}_2, \dots, \text{Estación}_n\} \cup \{\text{Tramo}_1, \text{Tramo}_2, \dots, \text{Tramo}_n\}$

Operaciones:  $\text{Tren}_i * \text{Recurso}_j$

### Que puede ser Modelado como Problema de Satisfacción de Restricciones (CSP) $\Rightarrow$ Técnicas CSP

**Variables** (tiempos de entrada / salida de estaciones):  $X = \{T_{i-S}, T_{i-L}\}$

**Dominios** de Instanciación de las variables: **D** (granularidad decasegundos)

#### Conjunto de Restricciones (C):

- Cadencias / Tiempos de Salida-Llegada,
- Restricciones de tráfico: cruce / alcance.
- Tiempos recepción, expedición, sucesión, alcance, etc.
- Tiempos de recorrido y Paradas comerciales, etc..

Factibilidad

Optimalidad

#### Optimizando (F):

- Tiempos de trayecto, Rotación de Trenes, Balance I/V, ...
- Robustez

## Modelización CSP (X, D, C, FC)

### Complejo Conjunto de Restricciones:

#### Tiempo de Sucesión

$\forall (t_i, t_j) \in T, \forall (i, j_{k+1}) \in S_{ij}$   
 $((t_i, t_j) \in T_0 \vee (t_i, t_j) \in T_1) \wedge (t_i, t_j) \notin T_2 \wedge i_k = i_k \wedge j_k = j_k \rightarrow$   
 $((dep_{i_k}^k - dep_{j_k}^k \geq \tau_{ij}^{k+1} \wedge arr_{i_k}^k - arr_{j_k}^k \geq \tau_{ij}^{k+1})$   
 $\vee (dep_{i_k}^k - dep_{j_k}^k \geq \tau_{ij}^{k+1} \wedge arr_{i_k}^k - arr_{j_k}^k \geq \tau_{ij}^{k+1}))$

#### Capacidad finita en Estación

$\forall t_i \in T_{\text{arr}}, \forall i_k \in J_i : \sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_i, t_j, i_k) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_i, t_j, i_k) < N_k$   
 $\wedge C_k > 0 \rightarrow \sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_i, t_j, i_k) < N_k$

#### Horario de Cierre

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall i \in J_i, \forall (A_i, B_i, t_{\text{cierre}}) \in HC_i :$   
 $(t_j^i = i \wedge dep_j^i > A_i \wedge arr_j^i < B_i) \rightarrow$

$\sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) < N_k$

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall i \in J_i, \forall (A_i, B_i, t_{\text{cierre}}) \in HC_i : t_j^i = i \wedge (arr_j^i > A_i \wedge dep_j^i < B_i) \rightarrow$

$\sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) < N_k$

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall i \in J_i, \forall (A_i, B_i, t_{\text{cierre}}) \in HC_i : t_j^i = i \wedge (arr_j^i > A_i \wedge dep_j^i < B_i) \rightarrow$

$\sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) < N_k$

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall i \in J_i, \forall (A_i, B_i, t_{\text{cierre}}) \in HC_i : t_j^i = i \wedge (arr_j^i > A_i \wedge dep_j^i < B_i) \rightarrow$

$\sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) < N_k$

#### Cruce

$\forall t_j \in T_0, \forall t_k \in T_1, \forall i, i_{k+1} \in J_i \cap J_k :$   
 $arr_{i_{k+1}}^k < dep_{i_{k+1}}^k \vee arr_i^k < dep_i^k$

#### Alcance

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall t_k \in T_{\text{dep}} : ((t_j, t_k) \in T_0 \vee (t_j, t_k) \in T_1) \wedge (i_j^k, i_{k+1}^k) \in J_i \cap J_k \rightarrow$   
 $(dep_j^k < dep_k^k \wedge arr_{i_{k+1}}^k < arr_{i_{k+1}}^k)$

#### Adelantamientos

$\forall t_i, t_j \in T, \forall i_k \in J_i \cap J_j :$   
 $(t_i, t_j) \notin T_0 \wedge p_j \leq p_i \rightarrow (dep_j^k < dep_i^k \rightarrow arr_i^k < arr_j^k)$

#### Recepción

$\forall t_i \in T_{\text{arr}}, \forall t_j \in T_0, \forall i_k \in (J_i \cap J_j) \setminus \{i_k\} :$

#### Intervalo de Salida

$\forall t_i \in T_{\text{arr}} : I_i^s \leq dep_i^s \leq I_i^e$

#### Intervalo de Llegada

$F_i^d \leq arr_i^d \leq F_i^e$

#### Retraso máximo

$\tau_i = \sum_{j=0}^{m-1} \Delta_j - j_{i+1} + C_j$   
 $(\forall t_i)_{T_{\text{arr}}} (D_i = \frac{A_i - \tau_i}{\tau_i})$

$\forall t_i \in T_{\text{arr}} : D_i \leq D_i^{\text{max}}$

#### frecuencia

$\forall t_x \in G_i, \forall t_y \in G_i, \forall i_k \in S_{\text{parada}_k} :$   
 $> dep_x^k \wedge (t_x \in G_i : dep_x^k > dep_y^k \wedge dep_y^k < dep_x^k) \rightarrow$   
 $P_i^k \leq dep_y^k - dep_x^k \leq P_i^k$

**Restricciones de Tráfico**  
**Trenes que viajan en el MISMO SENTIDO**

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall i \in J_i, \forall (A_i, B_i, t_{\text{cierre}}) \in HC_i : t_j^i = i \wedge (arr_j^i > A_i \wedge dep_j^i < B_i) \rightarrow$

$\sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) < N_k$

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall i \in J_i, \forall (A_i, B_i, t_{\text{cierre}}) \in HC_i : t_j^i = i \wedge (arr_j^i > A_i \wedge dep_j^i < B_i) \rightarrow$

$\sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) < N_k$

$\forall t_j \in T_{\text{arr}}, \forall i \in J_i, \forall (A_i, B_i, t_{\text{cierre}}) \in HC_i : t_j^i = i \wedge (arr_j^i > A_i \wedge dep_j^i < B_i) \rightarrow$

$\sum_{t_j \in T_{\text{arr}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) + \sum_{t_j \in T_{\text{dep}}} \text{Meet}(t_j, t_i, i) < N_k$

#### Demora

$\forall t_i \in T_{\text{arr}}, \forall i_k \in J_i, \forall (i_k, i_{k+1}) : (C_k = 0 \wedge dep_k^k - arr_k^k > 0) \rightarrow$   
 $(arr_k^k = dep_{k-1}^k + \Delta_{(k-1)} + \tau_i \wedge arr_{k+1}^k = dep_k^k + \Delta_{(k+1)} + \tau_i)$

#### Parada Comercial

$\forall t_i \in T_{\text{arr}}, \forall t_j \in J_i \setminus \{i_k, i_{k+1}\} : dep_j^k - arr_j^k \geq C_j$

## Modelización CSP (X, D, C, FC)

### Complejo Conjunto de Restricciones:

<p><b>Tiempo de Sucesión</b></p> $\forall (i, j) \in T, \forall (i, i+1) \in S_j :$ $((i, i) \in T_0 \vee (i, i) \in T_1) \wedge \{ (i, i) \notin T_0 \wedge i_0 = i_1 \vee i_0 = i_1 \} \rightarrow$ $((dep_i^a - dep_i^b \geq v_{ij}^{ab} \wedge arr_i^a - arr_i^b \geq v_{ij}^{ba}) \vee$ $(dep_i^b - dep_i^a \geq v_{ij}^{ba} \wedge arr_i^b - arr_i^a \geq v_{ij}^{ab}))$	<p><b>Cruce</b></p> $\forall t_j \in T_a, \forall t_i \in T_b, \forall i, i+1 \in J_j \cap J_i :$ $arr_{i+1}^i < dep_{i+1}^j \vee arr_i^j < dep_i^i$	<p><b>Intervalo de Salida</b></p> $\forall t_i \in T_{new} : I_i^l \leq dep_i^l \leq I_i^u$
<p><b>Capacidad finita en Estación</b></p> $\forall t_i \in T_{new}, \forall i \in J_i : \sum_{t_j \in T_a} Most(t_i, t_j, i_0) + \sum_{t_j \in T_b} Most(t_i, t_j, i_0) < N_{i_0}$ $\wedge C_i^l > 0 \rightarrow \sum_{t_j \in T_a} Most(t_i, t_j, i_0) < N_{i_0}$	<p><b>Alcance</b></p> $\forall t_j \in T_{new}, \forall i \in T : ((i, i) \in T_0 \vee (i, i) \in T_1) \wedge \{ (i, i) \in J_j \cap J_i \} \rightarrow$ $(dep_i^l < dep_i^r \wedge arr_{i+1}^l < arr_{i+1}^r)$	<p><b>Intervalo de Llegada</b></p> $F_i^l \leq arr_{i_0}^l \leq F_i^u$
<p><b>Horario de Cierre</b></p> $\forall t_j \in T_{new}, \forall i \in J_j, \forall (A_i, B_i, type_i) \in HC_i :$ $(i_j^b = i_i \wedge dep_i^b > A_i \wedge arr_i^b < B_i) \rightarrow$ $\sum_{t_j \in T_a} Most(t_j, t_i, i_0) + \sum_{t_j \in T_b} Most(t_j, t_i, i_0) < 1$	<p><b>Adelantamientos</b></p> $\forall t_i, t_j \in T, \forall i \in J_i \cap J_j :$ $(i, i) \notin T_0 \wedge i_j \leq i_i \rightarrow (dep_i^j < dep_i^i \wedge arr_i^j < arr_i^i)$	<p><b>Retraso máximo</b></p> $\tau_i = \sum_{j=0}^{m_i-1} \Delta_{j \rightarrow j+1} + C_j$
<p><b>Operaciones de Mantenimiento</b></p> $\forall t_j \in T_{new}, \forall i \in J_j, \forall (A_i, B_i, type_i) \in HC_i : i_j^b = i_i \wedge (arr_i^j \geq B_i \vee dep_i^j < A_i)$	<p><b>Recepción</b></p> $\forall t_i \in T_{new}, \forall t_j \in T_{old}, \forall i \in (J_i \cap J_j) \setminus \{i_0, i_1\} :$ $arr_i^j \rightarrow arr_i^i \rightarrow arr_i^j \geq B_i \vee arr_i^j \rightarrow arr_i^i \rightarrow arr_i^j \geq B_i$	<p><math>(\forall t_i) T_{new} (D_i = \frac{A_i - \tau_i}{\tau_i})</math></p> <p><math>\forall t_i \in T_{new} : D_i \leq D^{max}</math></p>
<p><math>\forall t_j \in T_{new}, \forall i \in J_j \setminus \{i_0, i_1\} : N_{i \rightarrow i+1} = 1 - (i_j^b = i_i \wedge [dep_i^j, arr_{i+1}^j] \cap [dep_i^i, arr_{i+1}^i])</math></p> <p><math>\forall t_j \in T_{new}, \forall i \in J_j \setminus \{i_0, i_1\} : N_{i \rightarrow i+1} = 1 - (i_j^b = i_i \wedge [dep_i^j, arr_{i+1}^j] \cap [dep_i^i, arr_{i+1}^i])</math></p>	<p><b>Expedición</b></p> $\forall t_i \in T_{new}, \forall t_j \in T_{old}, \forall i \in (J_i \cap J_j) \setminus \{i_0, i_1\} :$ $N_{i \rightarrow i+1} = 1 \wedge (dep_i^j \geq arr_i^i) \rightarrow dep_i^j - arr_i^i \geq E_i$	<p><b>Frecuencia</b></p> $\forall t_i \in G_i, \forall t_j \in G_i, \forall i \in S_{symetric} :$ $(dep_i^j > dep_i^i \wedge (i_j^b \in G_i : dep_i^j > dep_i^i \wedge dep_i^j < dep_i^i)) \rightarrow$ $P_i^l \leq dep_i^j - dep_i^i \leq P_i^u$

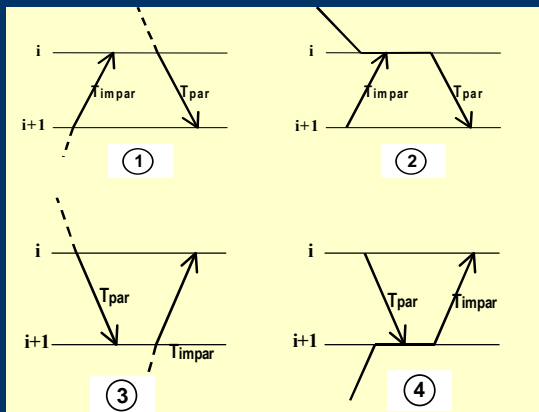
**Restricciones de Tráfico**  
Trenes que viajan en SENTIDOS OPUESTOS

## Ejemplos de Restricciones (Disyuntivas)

### Restricción de Cruce

Para cada par de Trenes en sentido opuesto (Tpar, Timpar),

y cada Tramo (Ei, Ei+1) de posible cruce:



(Timpar\_Li+1 < Tpar\_Si+1) OR (Tpar\_Li < Timpar\_Si)

## Modelización CSP (X, D, C, FC)

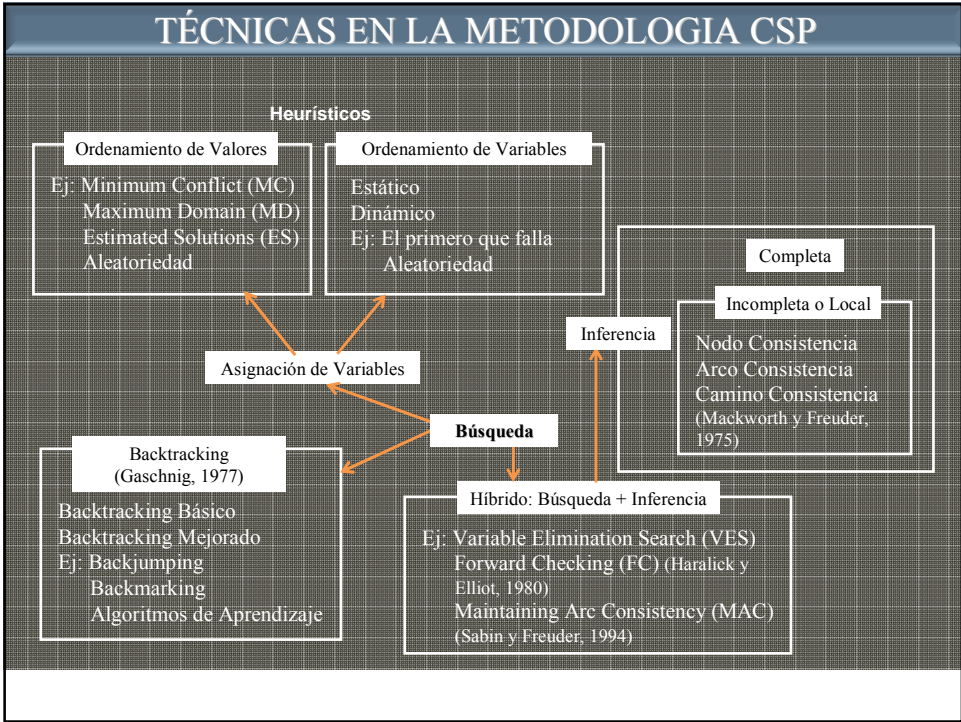
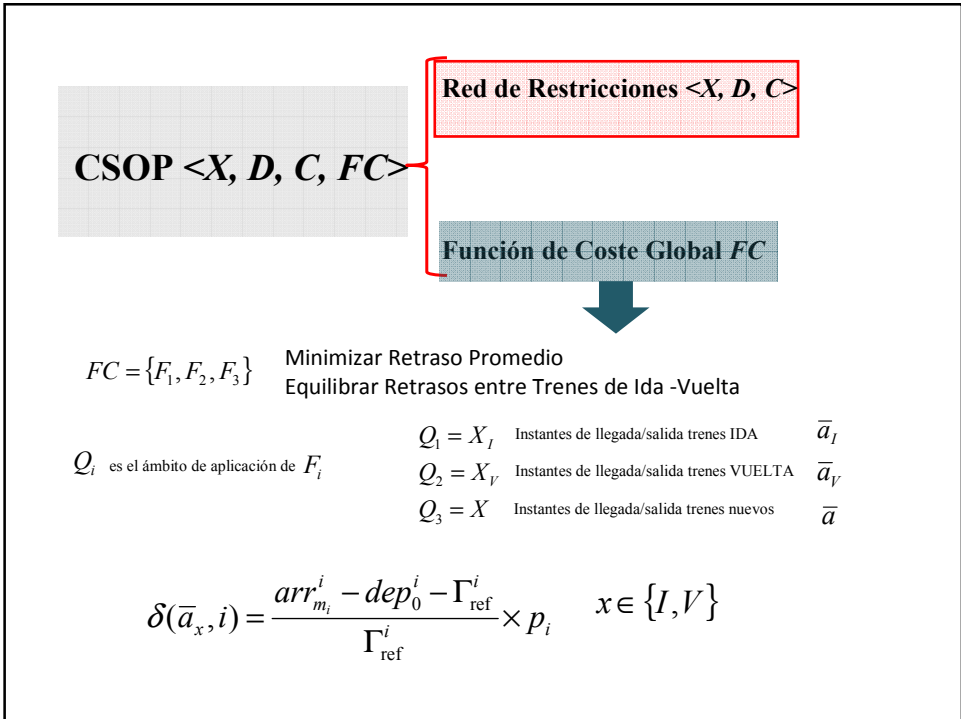
### Complejo Conjunto de Restricciones:

<p><b>Tiempo de Sucesión</b></p> $\forall (t_i, t_j) \in T, \forall (i, k, l) \in S_C:$ $((t_i, t_j) \in T_0 \vee (t_i, t_j) \in T_1) \wedge (t_i, t_j) \notin T_0 \vee (t_i, t_j) \in T_1 \wedge (i, k) \neq (j, l) \rightarrow$ $((dep_{i,k}^t - dep_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_0} \wedge arr_{i,k}^t - arr_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_1}) \vee$ $(dep_{i,k}^t - dep_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_0} \wedge arr_{i,k}^t - arr_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_1}))$	<p><b>Cruce</b></p> $\forall t_j \in T_0, \forall t_k \in T_1, \forall i, l, i+1 \in J_1 \cap J_2:$ $arr_{i+1}^t < dep_{i+1}^t \vee arr_i^t < dep_i^t$	<p><b>Intervalo de Salida</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}: I_i^s \leq dep_i^t \leq I_i^e$
<p><b>Capacidad finita en Estación</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i_k \in J_k: \sum_{t_j \in T_0} Meet(t_i, t_j, i_k) + \sum_{t_j \in T_1} Meet(t_i, t_j, i_k) < N_k$ $\wedge C_k > 0 \rightarrow \sum_{t_j \in T_0} Meet(t_i, t_j, i_k) < N_k$	<p><b>Alcance</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall t_k \in T: ((t_i, t_k) \in T_0 \vee (t_j, t_k) \in T_1) \wedge (i, i+1) \in J_1 \cap J_2 \rightarrow$ $(dep_j < dep_k^t - arr_{i+1}^t < arr_{i+1}^t)$	<p><b>Intervalo de Llegada</b></p> $F_i^t \leq arr_{i+1}^t \leq F_i^f$
<p><b>Horario de Cierre</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall i \in J_1, \forall (A_k, B_k, type_k^t) \in HC_i:$ $(i_j^t = i_k \wedge dep_i^t > A_k \wedge arr_j^t < B_k) \rightarrow$ $\sum_{t_i \in T_0} Meet(t_i, t_j, i_k) + \sum_{t_i \in T_1} Meet(t_i, t_j, i_k) < 1$	<p><b>Adelantamientos</b></p> $\forall t_i, t_j \in T, \forall i, j \in J_1 \cap J_2:$ $(t_i, t_j) \notin T_0 \wedge p_j \leq p_i \rightarrow (dep_i^t < dep_j^t \rightarrow arr_i^t < arr_j^t)$	<p><b>Retraso máximo</b></p> $\tau_i = \sum_{j=0}^{m_i-1} \Delta_{j-j+1} + C_j^t$
<p><b>Operaciones de Mantenimiento</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall t_i \in T_0, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: N_{i-1+i} = 2 \rightarrow$ $i_j^t = i_i \wedge [dep_i^t, arr_{i+1}^t] \cap [dep_j^t, arr_{i+1}^t] \notin BM_i$	<p><b>Recepción</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall t_j \in T_0, \forall i \in (J_1 \cap J_2) \setminus \{i_m, i_j^t\}:$ $arr_i^t \leq arr_j^t - arr_i^t - arr_j^t \geq R_i \vee arr_i^t \leq arr_j^t - arr_i^t - arr_j^t \geq R_j$	<p><b>Frecuencia</b></p> $\forall t_i \in G_i, \forall t_j \in G_i, \forall i, j \in S_{periodo_i}:$ $(dep_i^t > dep_j^t \wedge (i \neq j \in G_i : dep_i^t > dep_j^t \wedge dep_j^t < dep_i^t)) \rightarrow$ $P_i^t \leq dep_j^t - dep_i^t \leq P_i^f$
<p><b>Operaciones de Mantenimiento</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: N_{i-1+i} = 1 \rightarrow (i_j^t = i_i \wedge [dep_i^t, arr_{i+1}^t] \notin BM_i)$	<p><b>Tiempo de Recorrido</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: arr_{i+1}^t = dep_i^t + \Delta_{i-(i+1)}$	<p><b>Parada Comercial</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m, i_m\}: dep_j^t - arr_j^t \geq C_j^t$
<p><b>Operaciones de Mantenimiento</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall t_i \in T_1, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: N_{i-1+i} = 2 \rightarrow$ $i_j^t = i_i \wedge [dep_i^t, arr_{i+1}^t] \cap [dep_j^t, arr_{i+1}^t] \notin BM_i$	<p><b>Demora</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m, i_m\}: (C_i^t = 0 \wedge dep_i^t - arr_i^t > 0) \rightarrow$ $(arr_i^t = dep_{i-1}^t + \Delta_{i-(i-1)} + \Gamma_i \wedge arr_{i+1}^t = dep_i^t + \Delta_{i-(i+1)} + \Gamma_i)$	<p><b>Parada Comercial</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m, i_m\}: dep_j^t - arr_j^t \geq C_j^t$

## Modelización CSP (X, D, C, FC)

### Complejo Conjunto de Restricciones:

<p><b>Tiempo de Sucesión</b></p> $\forall (t_i, t_j) \in T, \forall (i, k, l) \in S_C:$ $((t_i, t_j) \in T_0 \vee (t_i, t_j) \in T_1) \wedge (t_i, t_j) \notin T_0 \vee (t_i, t_j) \in T_1 \wedge (i, k) \neq (j, l) \rightarrow$ $((dep_{i,k}^t - dep_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_0} \wedge arr_{i,k}^t - arr_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_1}) \vee$ $(dep_{i,k}^t - dep_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_0} \wedge arr_{i,k}^t - arr_{j,l}^t \geq v_{i,j}^{t_1}))$	<p><b>Cruce</b></p> $\forall t_j \in T_0, \forall t_k \in T_1, \forall i, l, i+1 \in J_1 \cap J_2:$ $arr_{i+1}^t < dep_{i+1}^t \vee arr_i^t < dep_i^t$	<p><b>Intervalo de Salida</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}: I_i^s \leq dep_i^t \leq I_i^e$
<p><b>Capacidad finita en Estación</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i_k \in J_k: \sum_{t_j \in T_0} Meet(t_i, t_j, i_k) + \sum_{t_j \in T_1} Meet(t_i, t_j, i_k) < N_k$ $\wedge C_k > 0 \rightarrow \sum_{t_j \in T_0} Meet(t_i, t_j, i_k) < N_k$	<p><b>Alcance</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall t_k \in T: ((t_i, t_k) \in T_0 \vee (t_j, t_k) \in T_1) \wedge (i, i+1) \in J_1 \cap J_2 \rightarrow$ $(dep_j < dep_k^t - arr_{i+1}^t < arr_{i+1}^t)$	<p><b>Intervalo de Llegada</b></p> $F_i^t \leq arr_{i+1}^t \leq F_i^f$
<p><b>Horario de Cierre</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall i \in J_1, \forall (A_k, B_k, type_k^t) \in HC_i:$ $(i_j^t = i_k \wedge dep_i^t > A_k \wedge arr_j^t < B_k) \rightarrow$ $\sum_{t_i \in T_0} Meet(t_i, t_j, i_k) + \sum_{t_i \in T_1} Meet(t_i, t_j, i_k) < 1$	<p><b>Adelantamientos</b></p> $\forall t_i, t_j \in T, \forall i, j \in J_1 \cap J_2:$ $(t_i, t_j) \notin T_0 \wedge p_j \leq p_i \rightarrow (dep_i^t < dep_j^t \rightarrow arr_i^t < arr_j^t)$	<p><b>Retraso máximo</b></p> $\tau_i = \sum_{j=0}^{m_i-1} \Delta_{j-j+1} + C_j^t$
<p><b>Operaciones de Mantenimiento</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall t_i \in T_0, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: N_{i-1+i} = 2 \rightarrow$ $i_j^t = i_i \wedge [dep_i^t, arr_{i+1}^t] \cap [dep_j^t, arr_{i+1}^t] \notin BM_i$	<p><b>Recepción</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall t_j \in T_0, \forall i \in (J_1 \cap J_2) \setminus \{i_m, i_j^t\}:$ $arr_i^t \leq arr_j^t - arr_i^t - arr_j^t \geq R_i \vee arr_i^t \leq arr_j^t - arr_i^t - arr_j^t \geq R_j$	<p><b>Frecuencia</b></p> $\forall t_i \in G_i, \forall t_j \in G_i, \forall i, j \in S_{periodo_i}:$ $(dep_i^t > dep_j^t \wedge (i \neq j \in G_i : dep_i^t > dep_j^t \wedge dep_j^t < dep_i^t)) \rightarrow$ $P_i^t \leq dep_j^t - dep_i^t \leq P_i^f$
<p><b>Operaciones de Mantenimiento</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall t_i \in T_1, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: N_{i-1+i} = 2 \rightarrow$ $i_j^t = i_i \wedge [dep_i^t, arr_{i+1}^t] \cap [dep_j^t, arr_{i+1}^t] \notin BM_i$	<p><b>Tiempo de Recorrido</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: arr_{i+1}^t = dep_i^t + \Delta_{i-(i+1)}$	<p><b>Parada Comercial</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m, i_m\}: dep_j^t - arr_j^t \geq C_j^t$
<p><b>Operaciones de Mantenimiento</b></p> $\forall t_j \in T_{mov}, \forall t_i \in T_1, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m\}: N_{i-1+i} = 1 \rightarrow (i_j^t = i_i \wedge [dep_i^t, arr_{i+1}^t] \notin BM_i)$	<p><b>Demora</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m, i_m\}: (C_i^t = 0 \wedge dep_i^t - arr_i^t > 0) \rightarrow$ $(arr_i^t = dep_{i-1}^t + \Delta_{i-(i-1)} + \Gamma_i \wedge arr_{i+1}^t = dep_i^t + \Delta_{i-(i+1)} + \Gamma_i)$	<p><b>Parada Comercial</b></p> $\forall t_i \in T_{mov}, \forall i \in J_1 \setminus \{i_m, i_m\}: dep_j^t - arr_j^t \geq C_j^t$



## Modelización CSP (ejemplo):

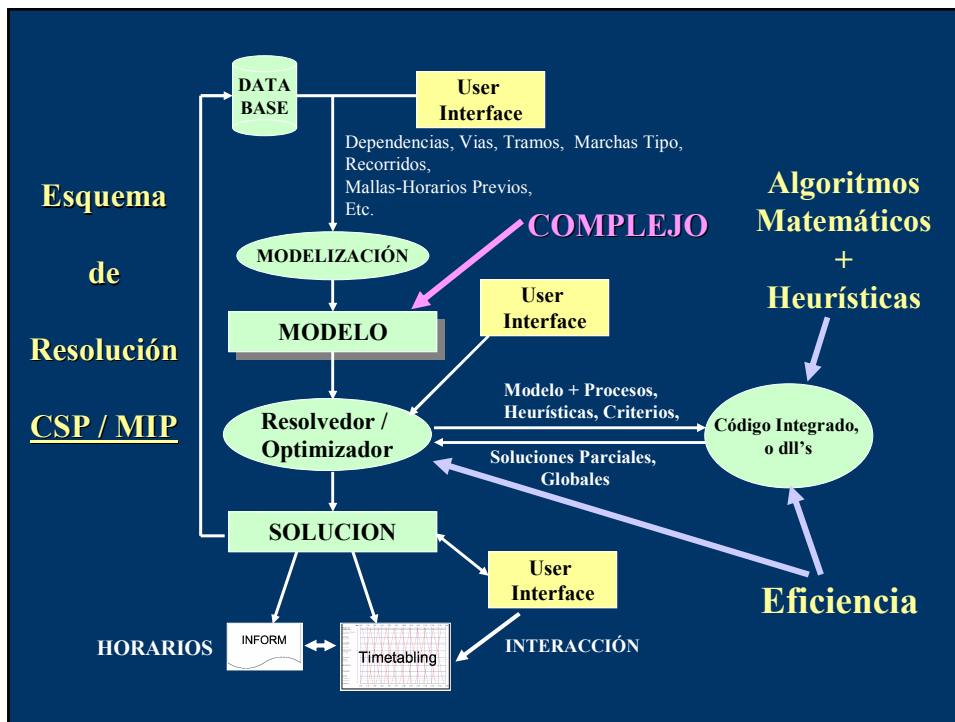
```
!RESTRICCIONES SOBRE TIEMPO DE ESPERA EN ESTACION PARA CADA TREN, IDA;
T0_S23 - T0_L23 = 0 + PT_0E23;
T0_S24 - T0_L24 = 0;
T0_S25 - T0_L25 >= 30;
.....

!RESTRICCIONES SOBRE TIEMPO DE ESPERA EN ESTACION PARA CADA TREN, VUELTA;
T1_S52 - T1_L52 = 0 + PT_1E52;
T1_S51 - T1_L51 = 0;
T1_S50 - T1_L50 >= 30;
T1_S49 - T1_L49 = 0;
T1_S48 - T1_L48 = 0 + PT_1E48;
....

!RESTRICCIONES TENIENDO EN CUENTA TIEMPO DE RECEPCION DE CRUCE;
T0_L22 - T1_L22 <= -20 -60 + 87000*X0T1 + 87000*(1-(1-Y0T1_22E23));
T1_L22 - T0_L22 <= -20 -60 + 87000*(1-X0T1) + 87000*(1-(1-Y0T1_22E23));
T0_L23 - T1_L23 <= -30 -60 + 87000*X0T1 + 87000*(1-(Y0T1_22E23-Y0T1_23E24));
T1_L23 - T0_L23 <= -30 -60 + 87000*(1-X0T1) + 87000*(1-(Y0T1_22E23-Y0T1_23E24));
T0_L28 - T1_L28 <= -45 + 87000*X0T1 + 87000*(1-(Y0T1_25E28-Y0T1_28E30));
T1_L28 - T0_L28 <= -45 +
....
.....
```

## Complejidad de Problema:

- **Numero de Variables:** Trenes x Estaciones
- **Dificultad de la Modelización:** Tipología de Restricciones
  - Restricciones disyuntivas y no disyuntivas.
  - **Variables Enteras:** Modelan las disyunciones (cruces, alcances, tiempos de recepción, expedición, sucesión, cierres, etc.)
  - **Modelo Matemático Entero-Mixto**
- **Objetivo:** Optimización.
- **Complejidad NP-hard.**



### Resolución: Búsqueda de la Solución (exponencial)

Problema NP-hard. Espacio de Búsqueda Exponencial

**Heurística**

- Acota búsqueda solución
- Puede perder optimalidad!

**50+50 Trenes, 30 Estaciones**  
 (30' margen salida, 15' margen cadencia)  
 $10^{7500}$  nodos terminales (24.000 I-variables)  
**Muchas Alternativas.....**

**Así como:**

- Flexibilidad
- Integración con los sistemas del Administrador de Infraestructuras

## Optimización Mallas (CSP): NP-hard

### Objetivos:

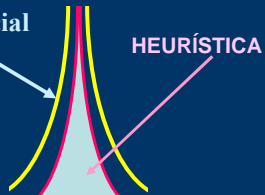
- ↑ Adecuación Funcionalidad
- ↑ Corrección
- ↑ Eficiencia Computacional
- ↑ Optimalidad Soluciones

### Procesos Para Acotar la Búsqueda

- Detección Geométrica de Cruces/Alcances.
- Restricciones Relajadas (PL Optimizada).
- Priorización Cruces
- Simplificación Estaciones
- Proceso Incremental (trenes, tiempo)
- Preproceso topológico
- Branch & Bound
- .....

Búsqueda

Exponencial



Heurística:  
Eficiencia vs Optimalidad

### Ante un caso real típico...

- Resolvedor LINGO: 48 horas....
- Resolvedor CPLEX (ILOG): 8 horas....
- Resolvedor propio  
(heurístico / constructivo): 2-5 min.

## La Planificación de Tráfico Ferroviario es NP-hard

- Diversos métodos matemáticos analizados
  - Particularmente, métodos CSP
- Dificultad en la formalización del problema completo.
- Problema de eficiencia / optimalidad soluciones.

## La Planificación de Tráfico Ferroviario es NP-hard

- Diversos métodos matemáticos
  - Particularmente, métodos CSP
- Dificultad en la formalización del problema completo.
- Problema de eficiencia / optimalidad soluciones.

### Aplicación técnicas CSP (heurísticas / distribuidos):

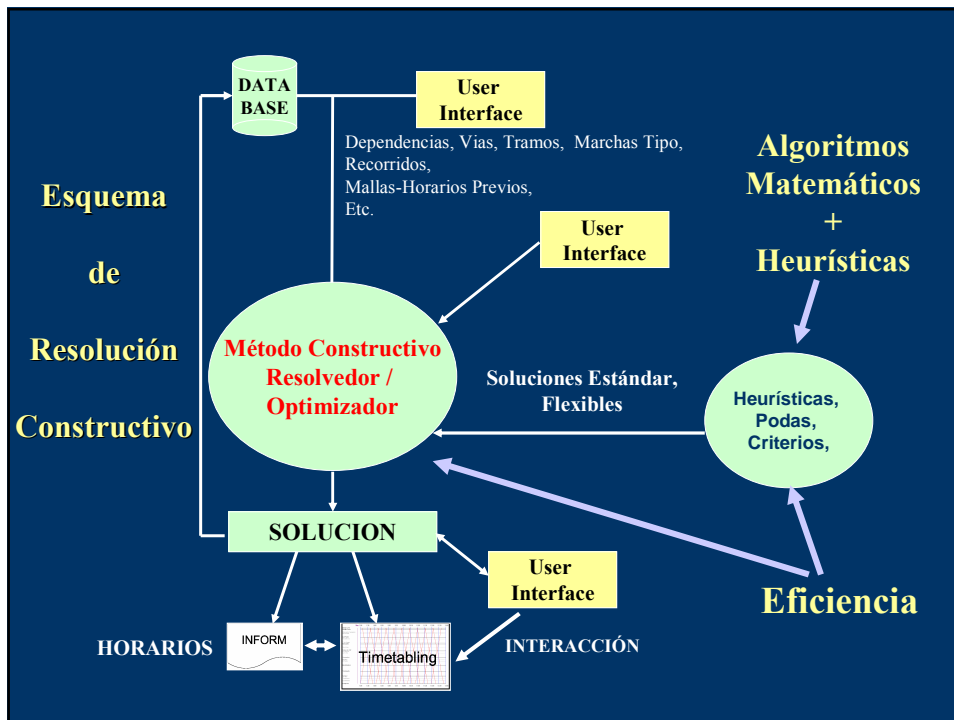
- Ingolotti, Barber, Tormos, Lova, Salido, Abril "An Efficient Method to Schedule New Trains on a High-Loaded Railway Network" LNCS/LNAI vol3315: 164-173 (2004)
- Salido, Abril, Barber, Ingolotti, Tormos, Lova "Domain Dependent Distributed Models for Railway Scheduling". Journal Knowledge Based Systems, 29:186-194 Elsevier (2007)

### Algoritmos Genéticos

- Tormos, Lova, Barber, Ingolotti, Abril, Salido "A Genetic Algorithm for Railway Scheduling Problems". In: Meta-heuristics for Scheduling. Studies in Computational Intelligence (SCI) series (Springer) 2007

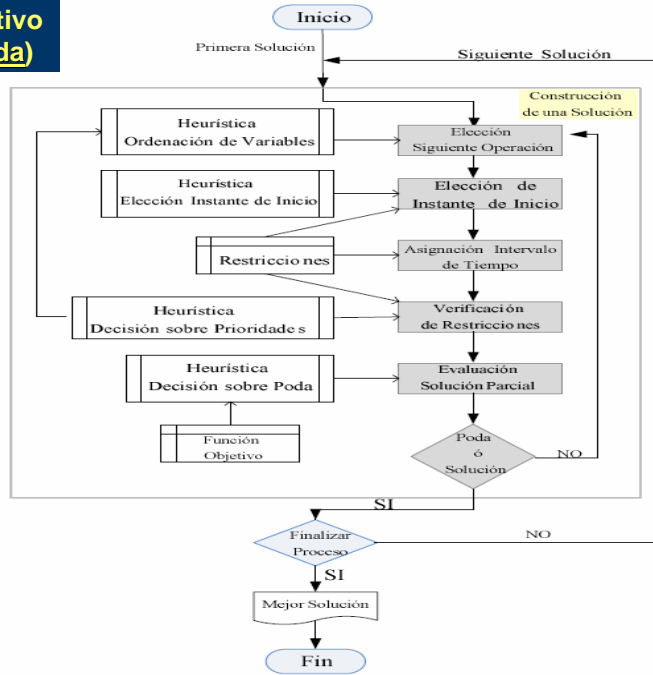
### Métodos Constructivos

- Ingolotti, Barber, Tormos, Lova, Salido M. Abril "A scheduling order-based method to solve timetabling problems" LNCS/LNAI vol.4177:52-61 (2006)

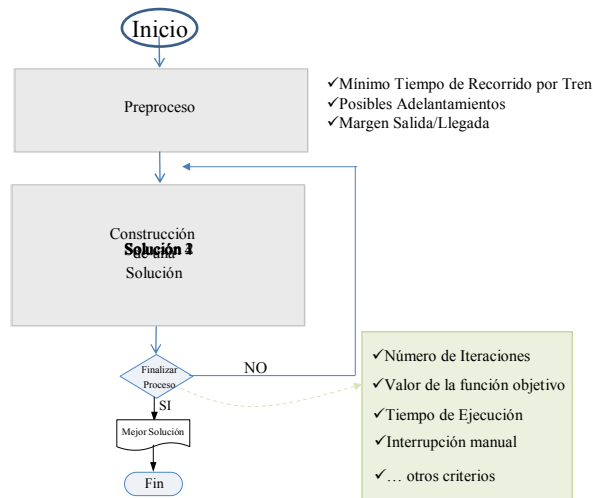




## Método Constructivo (heurístico & poda)



## Método Constructivo / Iterativo (heurístico & poda)

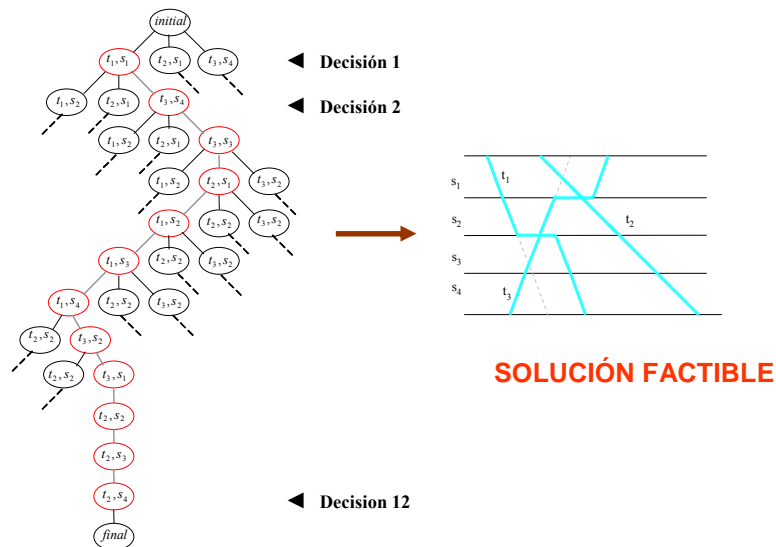


## Método Construtivo / Iterativo (heurístico & poda)

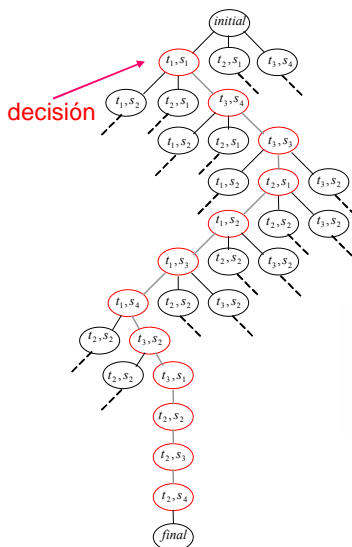
Generar una secuencia (horario de trenes) donde cada **Tren-Tramo** satisfice las restricciones temporales y de recursos de modo que se optimice una medida de eficiencia y la solución se alcance en el menor tiempo computacional posible.

- **Criterio Heurístico:** Selección de Tren-Tramo a Planificar
- **Criterio de Poda:** Estimación de Soluciones

## Método Construtivo / Iterativo (heurístico & poda)



## Método Construtivo / Iterativo (heurístico & poda)



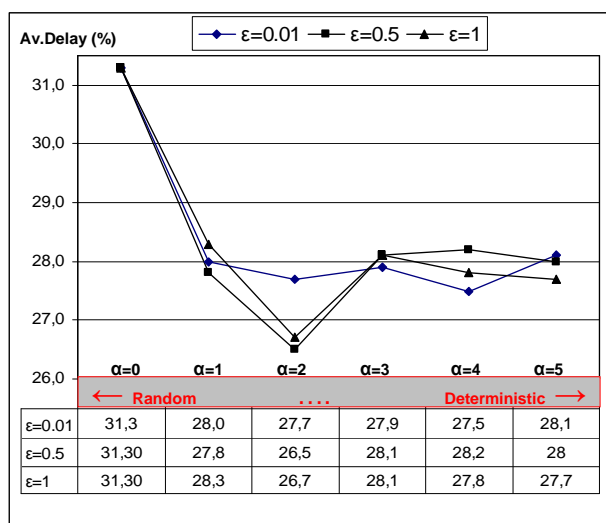
¿Qué **tren** debe secuenciarse en cada punto de decisión?

- RANDOM
- RBRS: (Regret-Based Biased Random Sampling)

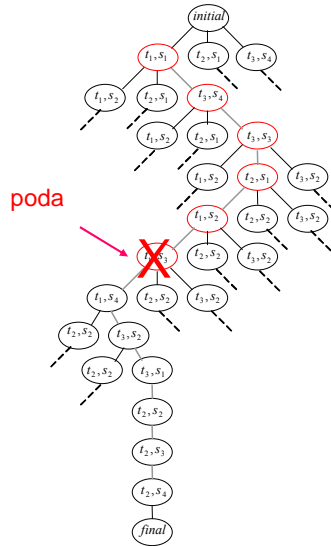
$$\rho_i = \frac{(\delta_{\text{partial}}^i - \delta_{\text{min}} + \varepsilon)^\alpha}{\sum_{t_i \in T_{\text{open}}} (\delta_{\text{partial}}^i - \delta_{\text{min}} + \varepsilon)^\alpha}$$

Prioridad de secuenciación del tren  $i$  ( $\alpha$ ,  $\varepsilon$ )

## Método Construtivo / Iterativo (heurístico & poda)



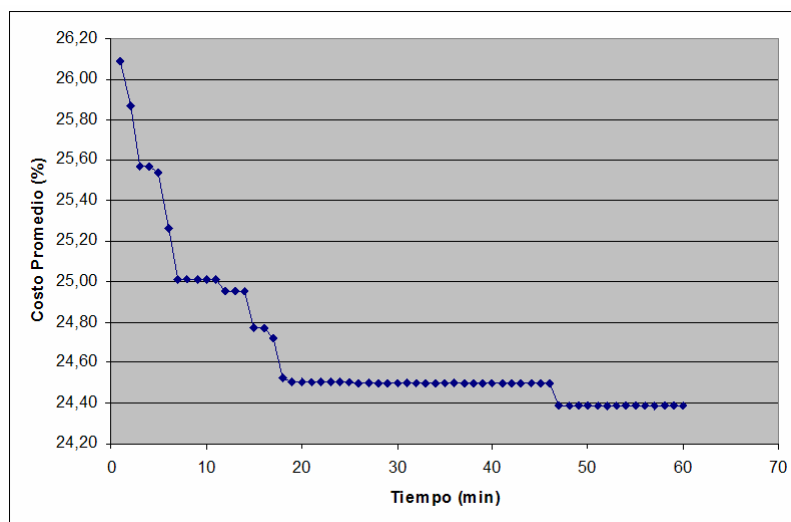
## Método Construtivo / Iterativo (heurístico & poda)



¿Cuándo debe abandonarse una solución parcial?

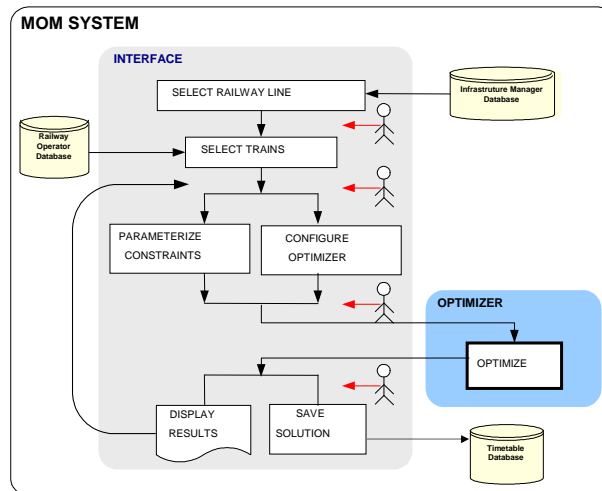
- Estimación de una solución.  
 $f(x) = g(x) + h(x)$   
 $h(x)$ : Heurística de estimación

## Comportamiento any-time



## Arquitectura de un DSS para la programación del tráfico ferroviario

### Arquitectura del Sistema



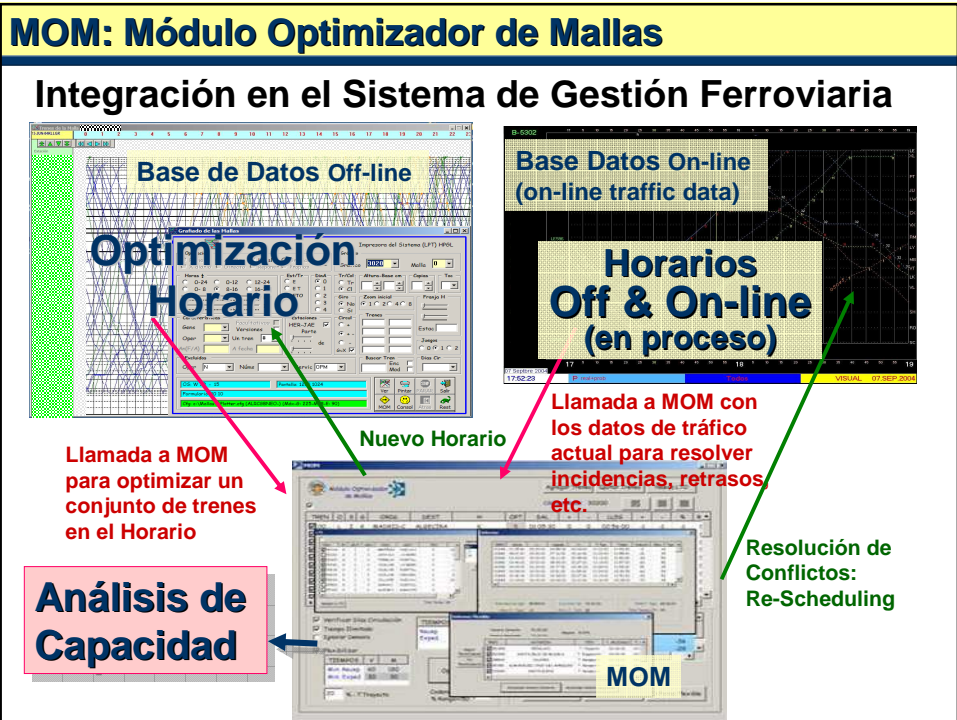
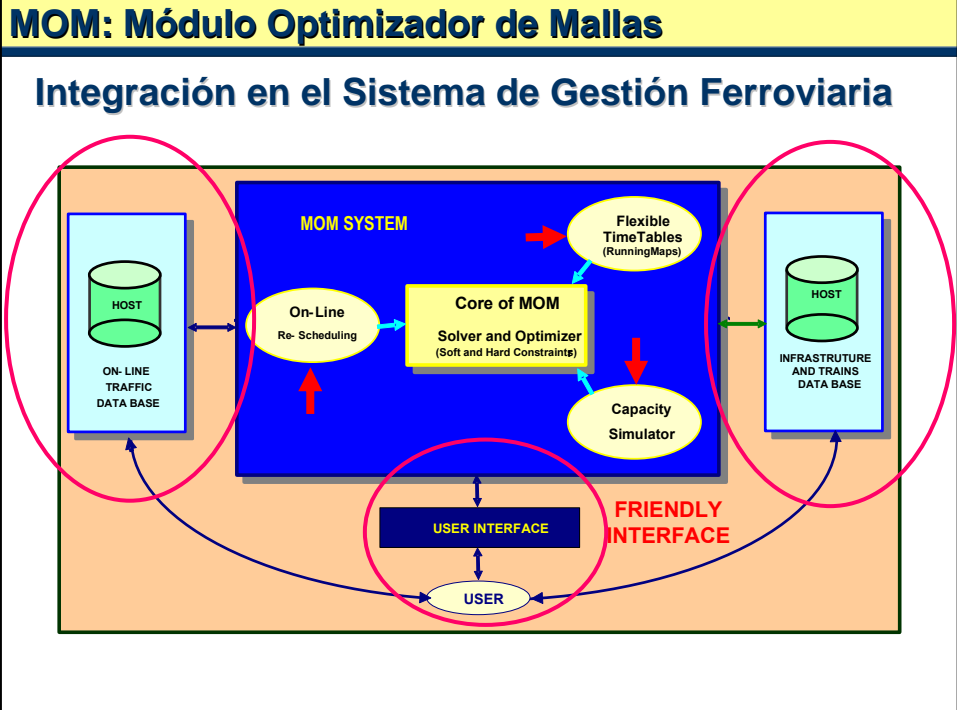
## MOM: Módulo Optimizador de Mallas

### El problema:

Scheduling de trenes periódicos (o no),  
Generalmente sobre una red con un conjunto de trenes  
secuenciados previamente

### El Objetivo:

Diseñar e implementar un *Decision Support System* para la  
secuenciación de trenes (Railway Timetabling)  
De modo que se optimice el uso de la infraestructura existente.



## Interfaz de MOM

1. Selección de trenes, líneas & secciones, intervalo temporal, etc.
2. Visualización del horario actual: Modificable por el usuario
3. MOM inserta nuevos trenes, re-planifica, optimiza,...

Módulo Optimizador de Mallas - MOM

Módulo Optimizador de Mallas Código Malla: 30200

Todos  Ida  Vuelta

TREN	O	S	G	ORIG.	DEST.	H	SAL	Tolerancia	LLEG	Tolerancia	%	RT	EST	C
<input type="checkbox"/> 00076	L	I	K	SANTANDE	ALACANT-	K	14:20:00	A Tiempo	15:27:30	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00078	L	I	K	GIJON-CE	ALACANT-	K	16:20:00	A Tiempo	17:27:00	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00140	L	I	K	MADRID-C	MALASA	K	16:45:00	A Tiempo	19:59:00	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00190	L	I	K	PTA. DE	BADATOZ	K	07:21:30	A Tiempo	07:23:30	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00194	L	I	K	PTA. DE	BADATOZ	K	16:46:30	A Tiempo	16:48:00	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00220	L	I	K	MADRID-C	CARTAGEN	K	07:15:00	A Tiempo	08:27:00	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00222	L	I	K	MADRID-C	CARTAGEN	K	09:50:00	A Tiempo	11:03:30	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00224	L	I	K	MADRID-C	CARTAGEN	K	16:30:00	A Tiempo	17:46:00	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00226	L	I	K	MADRID-C	CARTAGEN	K	19:20:00	A Tiempo	20:28:00	Indefinido	-1	S	N	
<input type="checkbox"/> 00228	L	I	K	MADRID-C	CARTAGEN	K	12:55:00	A Tiempo	14:00:30	Indefinido	-1	S	N	

Parametrice los trenes y el proceso y pulse Optimizar

Verificar Días Circulación  
 Ignorar T. Acel./Frenado  
 Bandas de Mantenimiento

Días Excluidos

Avanzada Acotar T. Opt.

Equil. I/V - Tiempo

Flexibilizar

TIEMPOS	V	M
Min.Recep.	60	180
Min.Exped.	30	60
Min.Suc.Alt.	180	180
Min.T.Distancia	120	120
Min.Dif.Sal.Simult.	60	60

Configurar Estaciones Tramos

TIEMPOS	Total	Dif	%T.Tipo
Previo	-	-	-
MOM-Opt	-	-	-
MOM-Opt-Flex	-	-	-

Número de Trenes IDA: 121 Número de Trenes VUELTA: 116

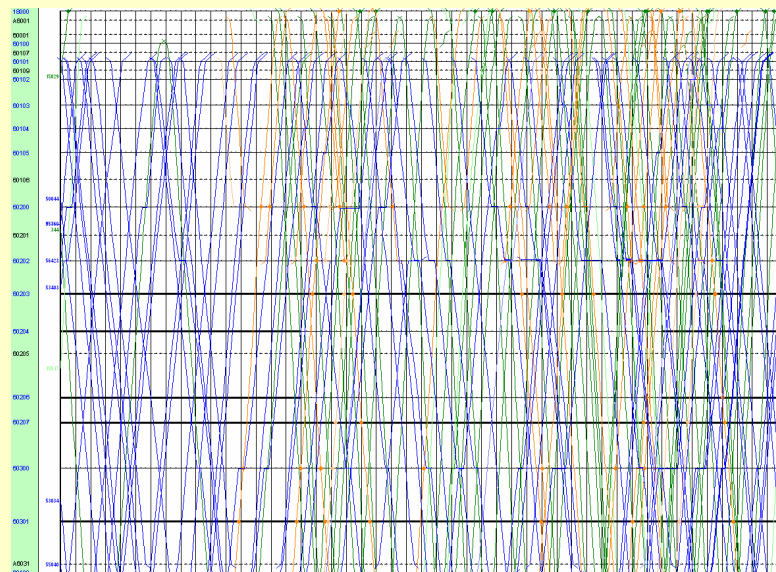
Mallas Válidas: 0 T.Tipo Total:

Iteración: 0 (Mejor It: 0) Est.Opt. Total: 00:00:00

T. Ejecución: 00:00:00 % Exc.Optimo: 0

## MOM: Módulo Optimizador de Mallas

Dado un conjunto de trenes ya planificados... y los nuevos trenes a planificar  
**MOM obtiene un horario optimizado incluyendo los nuevos trenes**



# MOM: Módulo de Optimización

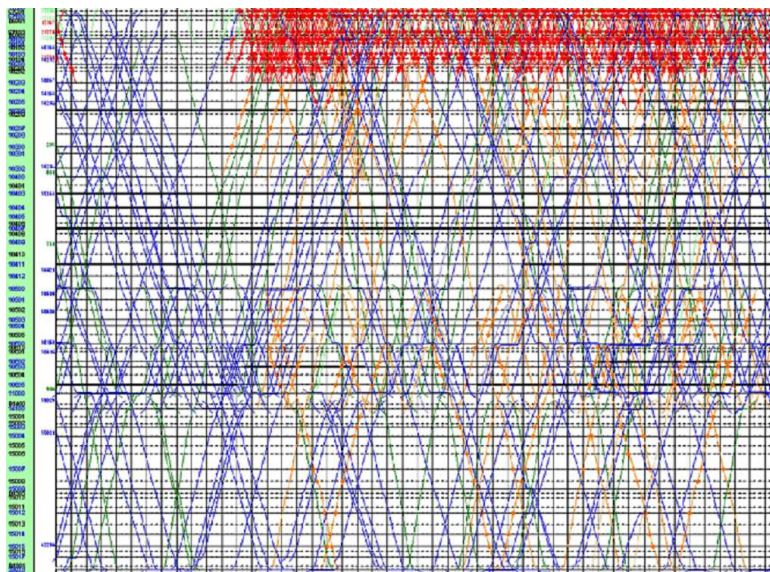
MOM permite especificar numerosos parámetros de los trenes a optimizar:

- Tiempo de Salida y Llegada,
- Estaciones,
- Tiempos de Trayecto,
- Parámetros de Optimización
- Tramos,
- Cadencias, etc.

The screenshot displays the MOM software interface. At the top, there is a main window titled 'Módulo Optimizador de Hojas - MOM' with a 'Código Malla: 10310'. Below this is a table of train schedules with columns for 'TREN', 'O', 'S', 'I', 'G', 'ORDEN', 'DEST', 'SAL', 'Tolerancia', 'LLES', 'Tolerancia', '%', 'EST', 'CAD', and 'SEAS'. A red box highlights the 'SAL' and 'LLES' columns. Below the table are several configuration windows. One window titled 'Parametrice los trenes y el proceso y pulse Optimizar' contains sub-sections for 'TIEMPOS' (with 'V' and 'M' columns) and 'Estaciones'. Another window titled 'Cadenas' shows a list of train paths. At the bottom, there are buttons for 'Optimizar', 'Interrumpir', 'Informe Estación', 'Informe Flexión', 'Actualizar Hojas', and 'Inf. Estaciones'. Red arrows point from the text above to these specific elements in the interface.

# MOM: Módulo de Optimización

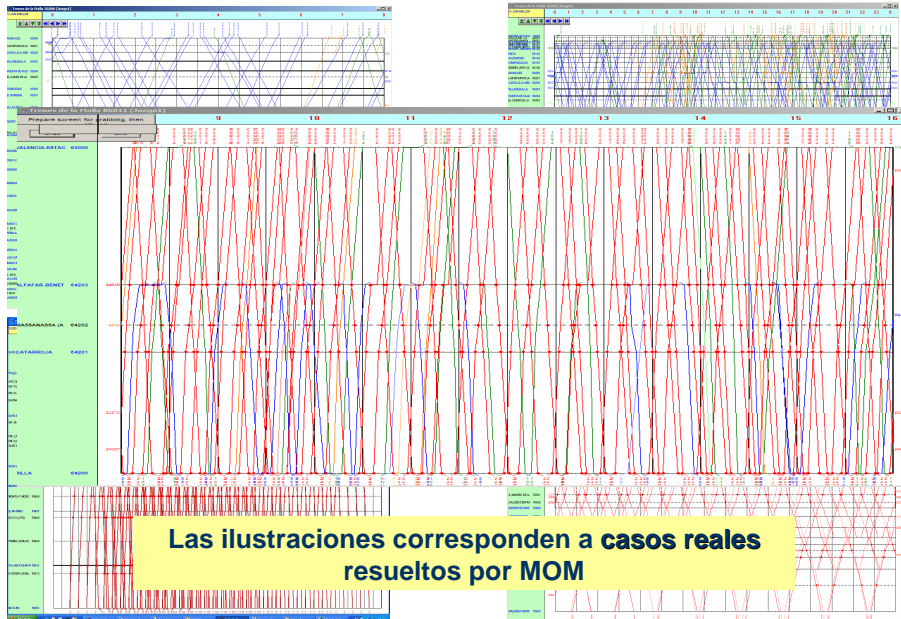
Algunos ejemplos de horarios optimizados automáticamente





# MOM: Módulo de Optimización

Algunos ejemplos de horarios optimizados automáticamente



# MOM: Módulo de Optimización Flexible

MOM es un Decision Support System para Railway Scheduling

Permite considerar restricciones de tráfico flexibles (*criterios aplicados por el usuario*),

Algunas restricciones puede relajarse (dependiendo del criterio del horarista) si con ello se obtienen mejores soluciones:

*i.e: Tiempo de Sucesión 180" ⇒ 120" en una sección dada*

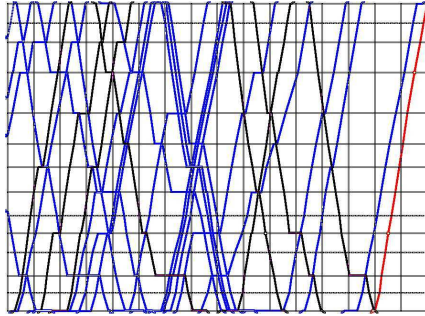
**Flexibilizar**

PARAMETROS	V	M
Min. Recep.	60	180
Min. Expel.	30	60
Min. Suc. Act.	180	180
Min. T. Distancia	180	120
Min. Dif. Sol. Simult.	60	60

**Restricciones Relajadas: Requiere validación por el usuario**

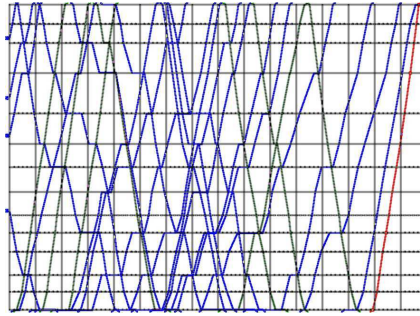
## MOM: Módulo de Optimización Flexible

Solución con  
Modulo de Optimización



Suma de los tiempos totales  
de trayecto: 46:41:30

Solución con  
Modulo de Optimización Flexible



Suma de los tiempos totales  
de trayecto: 41:05:00  
**!!! 5:36:30 menos !!!**

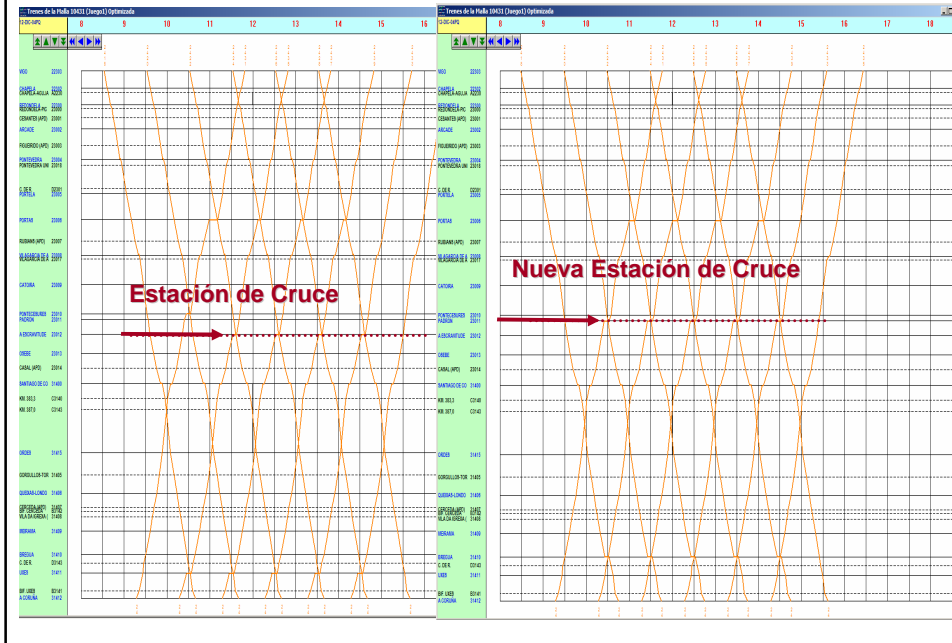
## MOM: Módulo de Optimización Flexible

### MOM es un Decision Support System para Railway Scheduling

- Permite flexibilizar algunas restricciones (*criterios aplicados por el usuario*),
- Permite que los cruces y adelantamientos se realicen en ciertas estaciones,

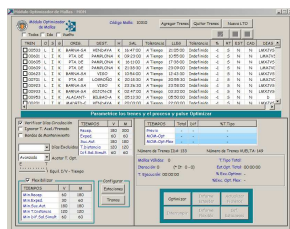
The screenshot displays the 'Módulo Optimizador de Huellas - FICHA' window. The main table lists train schedules with columns for 'TREN', 'ORIG', 'DEST', 'V', 'SAL', 'Tolerancia', 'LLEG', 'Tolerancia', '% RT', 'EST', 'CAD', and 'SSAS'. A red circle highlights the 'EST' column. Below the table, there are sections for 'Paramétricas los trenes y el proceso y pulsa Optimizar', 'Avanzada', and 'Flexibilizar'. A dialog box titled 'Estaciones - Parámetros' is open, showing a table with columns 'EST', '+C/P', and '-C/P'. The table lists stations: CABAÑAS DE EBRO, PEDROLA (APD), LUCENI, SALLUR (APD), CORTES DE NAVARRA, and BUÑUEL (APD). The 'SI' checkbox is checked for CABAÑAS DE EBRO, LUCENI, and BUÑUEL. Buttons for 'Aceptar' and 'Cancelar' are at the bottom.

# MOM: Módulo de Optimización Flexible

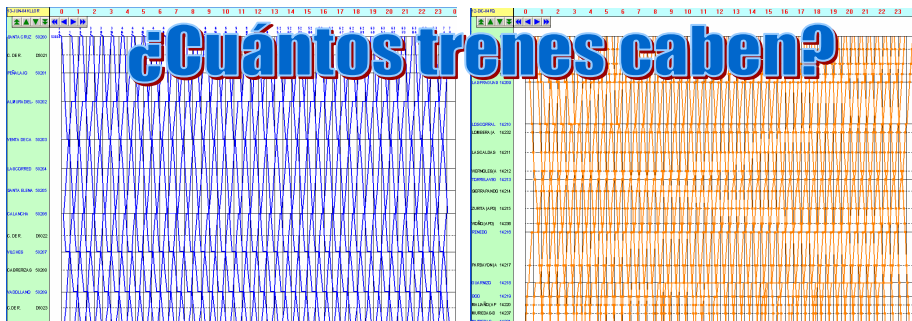


# MOM: Módulo de Estudio de Capacidades

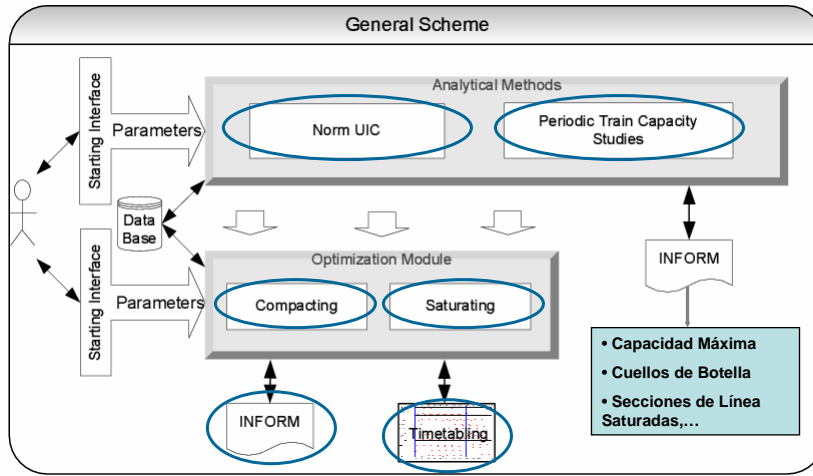
MOM permite obtener conclusiones sobre la **Capacidad de la Red**



**CAPACIDAD PRÁCTICA**



## MOM: Módulo de Estudio de Capacidades



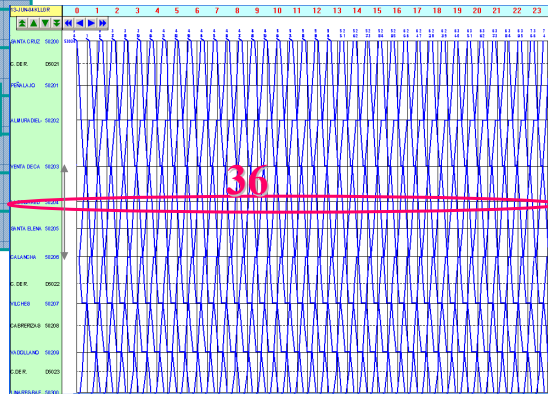
- Línea en estudio
- Parámetros físicos de los trenes que utilizan la línea
- Parámetros de Capacidad vs Robustez

## MOM: Módulo de Estudio de Capacidades

Ejemplo: Obtener un horario saturado de trenes periódicos

Línea: *Santa Cruz - Linares*

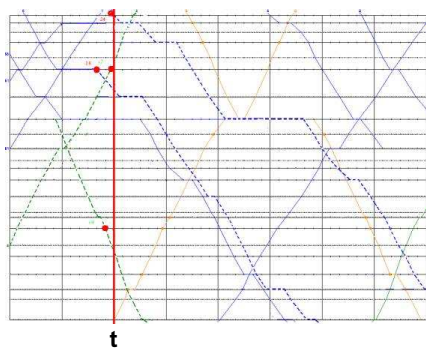
Sección de Línea	Capacidad
Santa Cruz - Pealajo	70
Pealajo - Viso del Marques	78
Viso del Marques - Venta de Cardenas	59
Venta de Cardenas - Calancha	<b>36</b>
Calancha - Vilches	61
Vilches - Vadollano	53
Vadollano - Linares	55



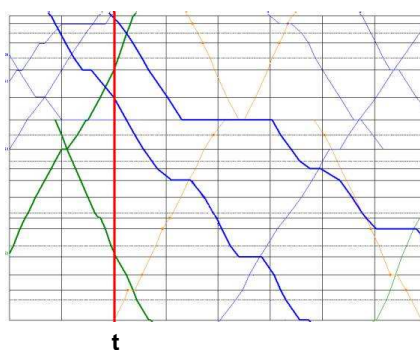
## MOM: Módulo On-Line (aplicación Robustez / Capacidad práctica)

### On-line Timetabling

#### Incidencias

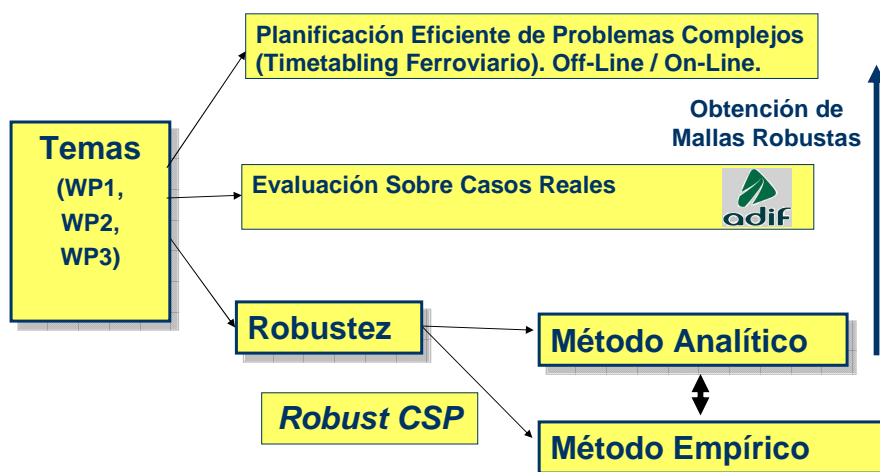


#### Replanificación

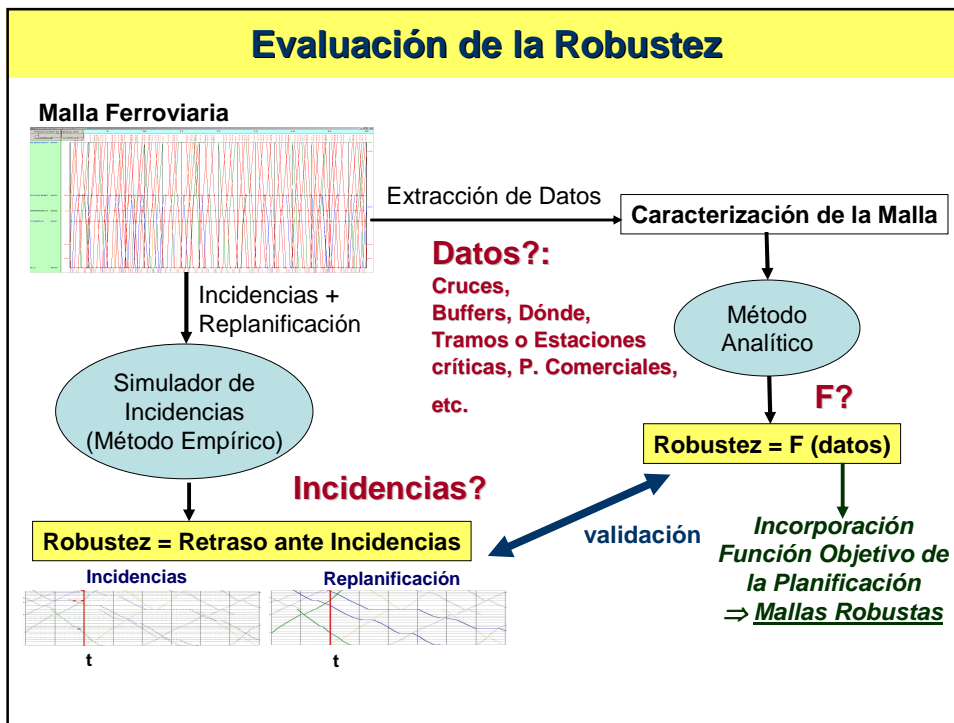
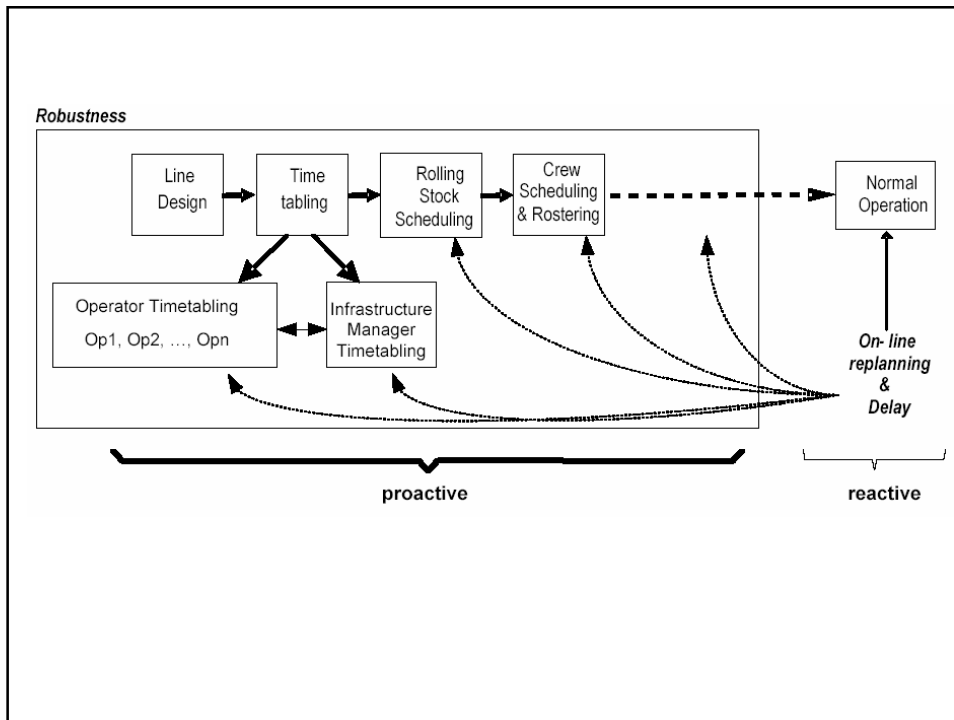


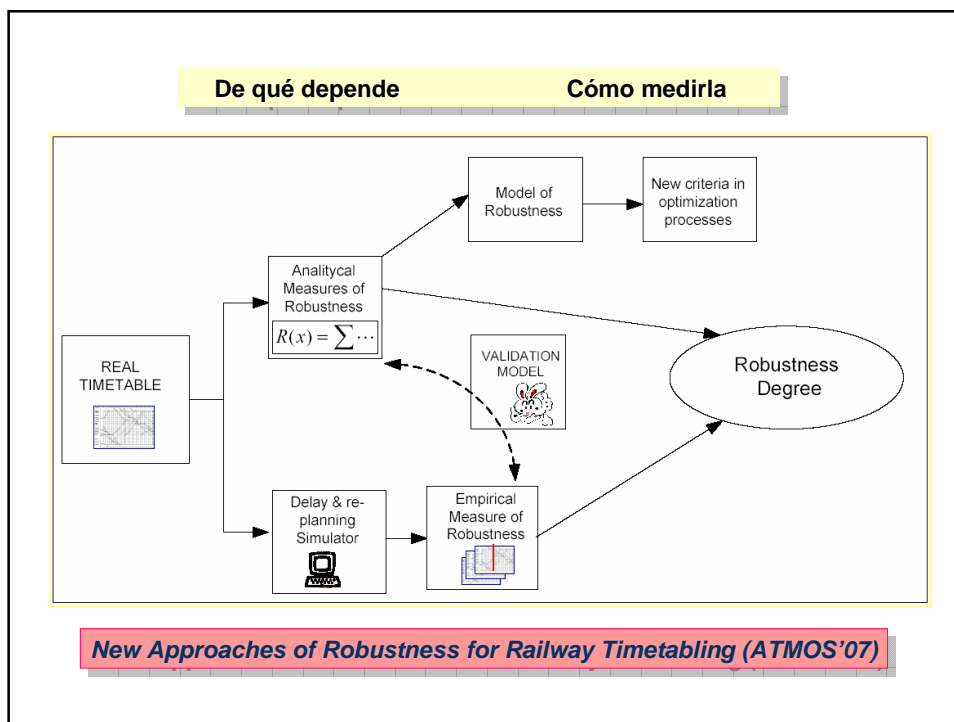
Nuevos criterios de optimización: Minimización de Retraso

## Temas de Trabajo



Timetabling Robusto: Capaz de absorber incidencias / minimizar replanificación





## Cómo obtener Robustez? De qué depende?

### a) Decrementar la Optimalidad (introduciendo slacks)

Si tenemos un problema, en el que queremos optimizar una función (tiempo de recorrido total):

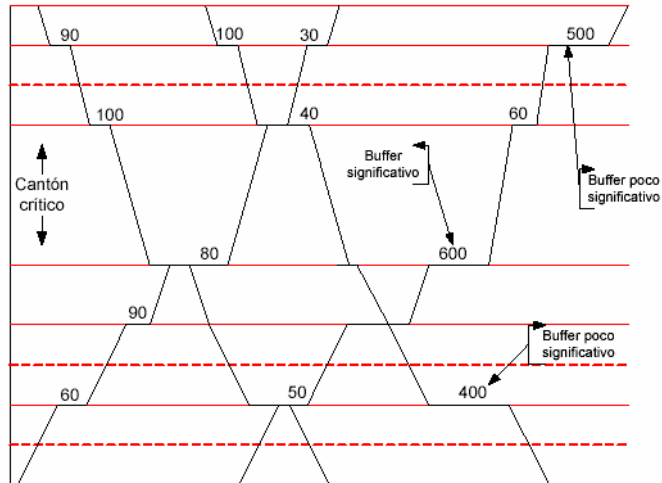
Min  $\{f(x) : x \in F\}$ , donde  $x^*$  es la solución óptima,

para una solución ' $x$ ', tenemos:

- Pérdida de optimalidad:  $f(x^*) - f(x)$
- Ganamos una robustez  $R(x) - R(x^*)$

	Estación	Dis	T <sub>min</sub>	T <sub>trip</sub>	Toc	Tco	H lle	Tpa	F	P	t	H sal	l
A5030	ESPELUY-AGUJA K											08000	
b5031	C. DE R.	0.2	0005	0006		020						08020	
50303	MENGBAR-LAS PA	2.9	0143	0210		040						08060	
50302	JABALQUINTO	6.9	0410	0437	003	070						08130	
50301	LAS MADRIGUERA	6.8	0404	0419	010	070						08200	
50300	LINARES-BAEZA	7.3	0423	0457	010	070						08270	
b5023	C. DE R.	4.5	0242	0557		070						08340	
50209	VADOLLANO	4.1	0228	0249		040						08380	
50208	CABRERIZAS (APD)	5.8	0330	0456		060						08440	
50207	VILCHES	4.7	0257	0418		060						08500	
b5022	C. DE R.	4.3	0235	0335		050						08550	
50206	CALANCHA	5.8	0340	0347		050						09000	
50205	SANTA ELENA	6.2	0421	0447		060						09060	
50204	LAS CORREDERAS	5.7	0403	0450		060						09120	
50203	VENTA DE CARDEN	7.6	0448	0628		080						09200	
50202	ALMURADIEL-VIS	10.0	0600	0817	010	110						09310	

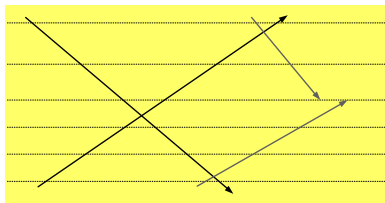
## Dónde incluir buffers?



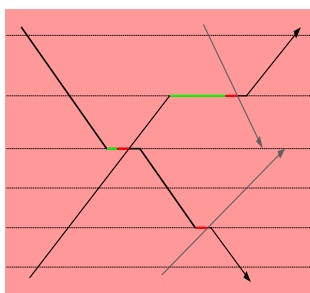
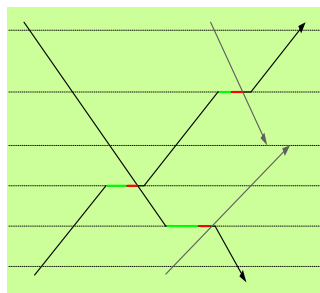
## Cómo obtener Robustez? De qué depende?

### b) Obtención de mallas inherentemente más robustas

Minimizando operaciones de trafico, balanceando slacks, etc.....



...experiencia del gestor....





## Cómo obtener Robustez? De qué depende?

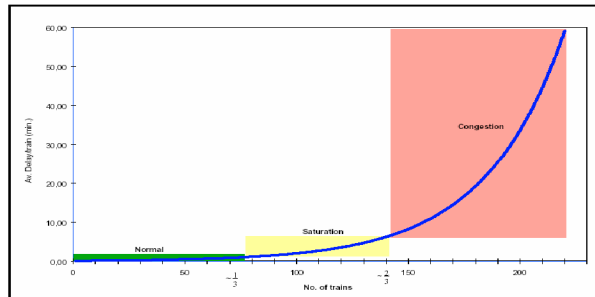
### c) Disminuir la Capacidad

**“no utilizar la infraestructura al máximo de su capacidad teórica, sino con una capacidad práctica límite”**

Si tenemos un problema, en el que podemos obtener una solución optimizada 'x' con una capacidad:  $Cap(x) = C$

Siendo  $C^*$  la capacidad máxima del sistema, ante una solución 'x', tenemos:

- Pérdida de Capacidad:  $C^* - C(x)$ .
- Ganamos una robustez  $R(x) - R(x^*)$



## Simulador: Incidencias ⇒ Replanificación ⇒ Medida del Retraso ⇒ Robustez

**MODULO DE CAPACIDADES**

UIC DATOS T. SUC/CAP MAX CAPACIDADES ROBUSTEZ

Datos Malla:  Crear Malla

Capacidad Incremental: Desde 1 Hasta 100

Capacidad: 3 Trenes/Sentido

Proportiones: Cercanías: 100, Regionales: , Grandes Líneas: , Mercancías:

Malla Original:

Datos Incidencias: Frecuencia Barido: 180

% Trenes Afectados:

1 Tren Afectado

Inc. Fija: 2

Inc. Aleatoria: 1 - 5

Aleatoriedad:

SIMULAR PARAR

Trenes Tipo Seleccionados:

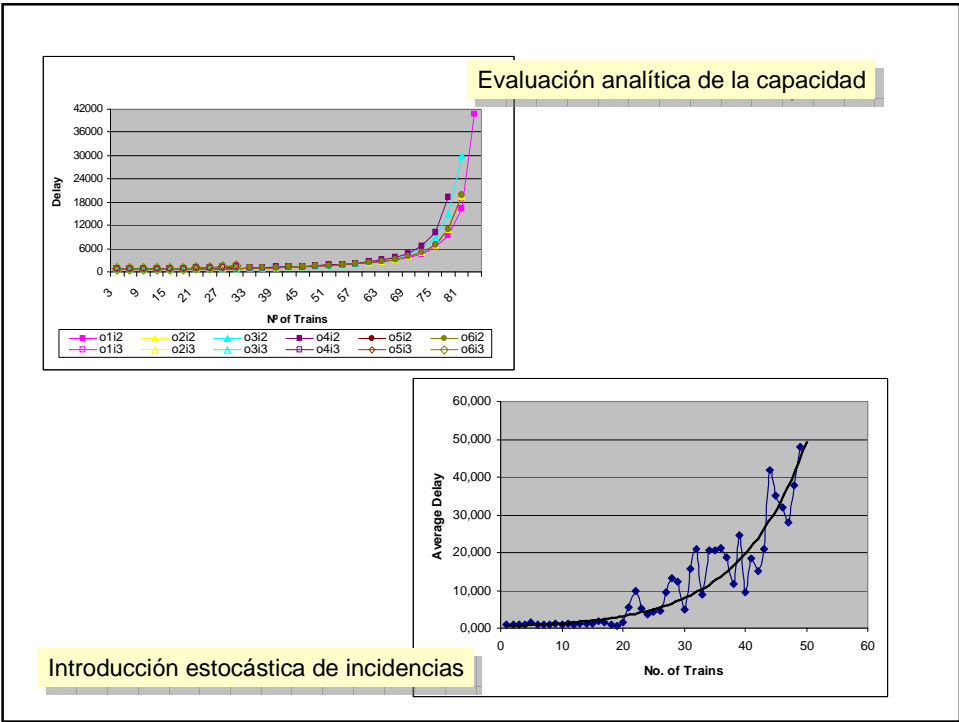
Ida: Cercanías: 24093, Regionales: , Grandes Líneas: , Mercancías:

Vuelta: Cercanías: 24056, Regionales: , Grandes Líneas: , Mercancías:

**CAPACIDAD REAL: 128 trenes/sentido → REPLANIFICANDO INSTANTE 00:00:00**

PROCESO		RESULTADOS						
		N.T.	I.M.	T.A.	R.M.	%R.M.	R.P.	T.T.
Comienzo Replanificación: 58 trenes/sentido	Instante: 00:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 180.517	55	120	2.00	4	0.117	4	180.00
Instante: 03:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 60.00	Comienzo Replanificación: 59 trenes/sentido	56	120	2.00	4	0.1147	4	180.00
Instante: 00:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 184.068	Instante: 03:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 60.00	57	120	80.00	176	20.602	176	20160.00
Comienzo Replanificación: 60 trenes/sentido	Instante: 00:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 187.5	58	120	41.5	120	21.478	120	10530.00
Instante: 03:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 40.00	Comienzo Replanificación: 61 trenes/sentido	59	120	43.00	122	10.478	122	10880.00
Instante: 00:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 190.82	Instante: 03:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 30.00	60	120	44.00	113	10.555	113	11370.00
Comienzo Replanificación: 62 trenes/sentido	Instante: 00:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 194.516	61	120	45.00	110	10.651	110	11760.00
Instante: 03:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 42.00	Comienzo Replanificación: 63 trenes/sentido	62	120	47.00	118	11.118	118	12270.00
Instante: 00:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 198.095	Instante: 03:00:00 Incidencia: 120 Retraso Medio: 50.00	63	120	49.00	124	11.512	124	12780.00
Comienzo Replanificación: 64 trenes/sentido	Instante: 00:00:00 Incidencia: 120							

N.T.: Número de Trenes Planificados por Sentido.  
 I.M.: Incidencia Media Introducida (seg).  
 T.A.: Número Medio de Trenes Afectados en Estación Final.  
 R.M.: Retraso Medio Ocasionado por las Incidencias Introducidas (seg).  
 %R.M.: Porc. Retraso Medio Respecto Tiempo Trayecto en Margen Estaciones.  
 R.P.: Retraso Medio Ponderado por Valor Medio del Rango de Incidencias (seg).  
 T.T.: Tiempo Total de Retraso Medio ante una incidencia (seg).



**Cómo obtener Robustez? De qué depende?**

**Y otros factores.....**

- Buffers, Donde?, Cuantos?,
- Número de trenes,
- Número de estaciones,
- Número de paradas,
- Flujo de pasajeros,
- Heterogeneidad servicios,
- Condiciones vía,
- Etc....

**Robussness = Función muy compleja (DATOS)**

## Cómo medir la Robustez.....

Un problema aun no bien caracterizado:

- Como conseguirla?,
- Cómo medirla?
  - A timetable is  $t$ -robust if it is able to tolerate unexpected disruptions lower than  $t$  time units without any modifications in traffic operations (crossing, overtaken, etc).
  - A timetable is  $(k,t)$ -robust if upon an disruption lower than  $k$  time units, it is able to return to the initial stage after  $t$  time units.
- Incidencias?
- Medidas: Métodos estocásticos, analíticos, empíricos?
- Relación con “Robust solutions in CSP”

## Trabajo Futuro

**Railway timetabling es un problema NP-Hard.**

**Nuestra aproximación:**

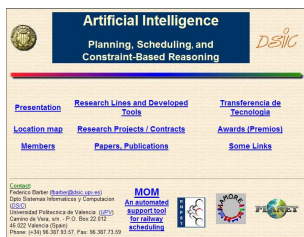
- Heurísticas Basadas en una aproximación Constructiva.
- Desarrollo de MOM (ADIF)

**Líneas de trabajo (actual y futuro) :**

- **Robustez:** Medidas (empíricas, analíticas) y Obtención de mallas Robustas.
- **Capacidad:** Nuevas medidas prácticas.

Algorithms for Robust and online Railway  
optimization: Improving the Validity and  
reliAbility of Large-scale systems  
**(ARRIVAL)**  
FP6-021235-2, EU-IST-STREP

Federico Barber  
Grupo de Planificación, Scheduling y Restricciones  
DSIC, DEIOAC Universidad Politécnica de Valencia



The screenshot shows a website header with the text "Artificial Intelligence" and "Planning, Scheduling and Constraint-Based Reasoning". Below this is a navigation menu with links for "Presentation", "Research Lines and Developed Tools", "Transparencia de Tecnología", "Location map", "Research Projects / Contracts", "Awards (Premios)", "Members", "Papers, Publications", and "Some Links". At the bottom, there is contact information for Federico Barber and logos for MOM, An automated support tool, and PI-FACT.



<http://www.dsic.upv.es/users/ia/gps/index.html>