

MODELADO Y RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE HORARIOS PARA EL TRANSPORTE FERROVIARIO UTILIZANDO TÉCNICAS DE SATISFACCIÓN DE RESTRICCIONES

Marlene Arangú* - Miguel A. Salido**

*Doctor en Informática. Profesor Asociado del Decanato de Administración y Contaduría de la Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado", Venezuela. Docente PEII. Trabajo producto del proyecto subvencionado 001-AC-2013. E-Mail: alita@ucla.edu.ve.

**Doctor en Informática. Profesor Titular del Departamento de Sistemas Informáticos y Computación de la Universidad Politécnica de Valencia, España. E-Mail: msalido@dsic.upv.es

RESUMEN

El transporte ferroviario tiene un rol importante y creciente en muchos países, lo cual crea la necesidad de optimizar el uso de la infraestructura ferroviaria y los métodos y herramientas para su administración. La construcción de horarios ferroviarios es una tarea difícil que consume mucho tiempo, particularmente en el caso de redes ferroviarias reales. El objetivo del trabajo que se presenta, es realizar un modelado del problema de asignación de horarios para el transporte ferroviario que permita aplicar las diferentes técnicas de resolución de programación de restricciones existentes en la literatura y evaluar su efectividad. El trabajo es de tipo descriptivo-documental bajo la modalidad de investigación básica. La metodología utilizada es del área de Inteligencia Artificial. Consiste en desarrollar una herramienta automática que permita modelar instancias reales del problema como un Problema de Satisfacción de Restricciones (CSP); aplicar técnicas de solución y posteriormente evaluar los resultados. Se propone un modelado binario de CSP no-normalizado que contempla reglas de tráfico, requerimientos del usuario y reglas topológicas de una infraestructura real. Los resultados de las pruebas indican que en la búsqueda el algoritmo BLS tuvo un desempeño superior al 80% que los algoritmos MAC3, FC y BT, en diferentes instancias evaluadas.

Palabras clave: Problemas de satisfacción de restricciones, scheduling, transporte ferroviario.

JEL: C6

Recibido: 02/10/2013 - Aceptado: 07/03/2014

MODELING AND PROBLEM SOLVING ASSIGNMENT SCHEDULES FOR RAILWAY TRANSPORT USING CONSTRAINT SATISFACTION TECHNIQUES

Marlene Arangú* - Miguel A. Salido**

*PhD in Informatics. Professor at the Faculty of Management and Accountancy of the Universidad
Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela. Email: alita@ucla.edu.ve.

**PhD in Informatics. Professor at Department of Information Systems and Computation of the Universidad
Politécnica de Valencia, España. Email: msalido@dsic.upv.es

ABSTRACT

Rail transportation has an important and growing role in many countries, which creates the need to optimize the use of railway infrastructure and the methods and tools for its administration. Railway timetables construction is a difficult and time consuming task, particularly in the case of real railway networks. The aim of this work is to model the railway scheduling problem; that allows applying the different techniques in constraint programming resolution in the literature and evaluating its effectiveness. The work is descriptive and documentary in the form of basic research. The methodology is from Artificial intelligence area, it consists in developing an automated tool which allow modeling PLC real instances of the problem as a Constraint Satisfaction Problem (CSP) applied solution techniques and then evaluate the results. We propose a binary CSP modeling non – normalized (the same variables can share more than one constraint) that provides traffic rules, user requirements and topology rules from a real infrastructure. The test results indicate that in finding the BLS algorithm outperformed the 80% that the algorithms MAC3, FC and BT, in different instances evaluated.

Key words: Constraint satisfaction problem, railway, scheduling.

R
E
S
E
A
R
C
H

JEL: C6

MODELAGEM E RESOLUÇÃO DE PROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO DE HORÁRIOS PARA TRANSPORTE FERROVIÁRIO USANDO TÉCNICAS DE SATISFAÇÃO DE RESTRIÇÕES

Marlene Arangú* - Miguel A. Salido**

*Doutor em Computação. Professor da Faculdade de Administração e Contabilidade da Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela. Email: alita@ucla.edu.ve.

**Doutor em Computação. Professor do Departamento de Sistemas de Informação e Computação da Universidad Politécnica de Valencia, Espanha. Email: msalido@dsic.upv.es.

RESUMO

O transporte ferroviário tem um papel importante e crescente em muitos países, o que cria a necessidade de otimizar o uso da infra-estrutura ferroviária e os métodos e ferramentas para a administração. A construção de horários ferroviários é uma tarefa difícil e demorada, especialmente no caso das redes ferroviárias reais. O objetivo do trabalho apresentado é a realização de um problema de atribuição de modelagem para os horários de transporte ferroviário que permitam a aplicação de diferentes técnicas para resolver as restrições de agendamento que existem na literatura e avaliar a sua eficácia. O trabalho é descritivo e documental, na forma de pesquisa básica. A metodologia utilizada é da área da Inteligência Artificial. PLC consiste em desenvolver uma ferramenta para modelar casos reais do problema como um problema Satisfação de Restrições (CSP), aplicar técnicas de resolução e posteriormente avaliar os resultados. Propõe-se uma modelagem binária de CSP não normalizada que inclui as regras de trânsito, requerimento do usuário e as regras de topológicas de uma infra-estrutura real. Os resultados do teste indicam que o algoritmo de busca BLS teve um desempenho 80 % superior aos algoritmos MAC3, FC e BT, em diferentes situações avaliadas.

Palavras chave: Agendamento, problema satisfação de restrições, transporte ferroviário.

JEL: C6

Introducción

En los últimos años, el transporte ferroviario ha tenido un rol importante en muchos países. El tráfico y la infraestructura ferroviaria se han incrementado considerablemente (Eurostat, 2011; INE, 2011 y IFE, 2013), lo cual crea la necesidad de optimizar el uso de la infraestructura ferroviaria y los métodos y herramientas para su administración. En este sentido, uno de los objetivos en Europa para el 2020, es lograr un incremento del 20% en el transporte de pasajeros y del 70% en mercancías y, para Venezuela en el 2026 se prevé su alcance alrededor de los 13.600 km en rieles, uniendo los cuatro puntos cardinales del país, por medio de diez sistemas ferroviarios organizados en 21 tramos (Venezuela en Datos, 2007).

Un horario de trenes flexible debe especificar los tiempos de salida y llegada a cada estación del trayecto, teniendo en cuenta la capacidad de la línea y otras restricciones operacionales. La construcción de horarios ferroviarios es una tarea difícil que consume mucho tiempo, particularmente en el caso de redes ferroviarias reales, donde el número de restricciones y la complejidad de las mismas crece drásticamente. Motivado por lo anteriormente planteado, se han desarrollado numerosas aproximaciones y herramientas para planificar los horarios ferroviarios. A este tipo de problemas se les conoce como el problema de asignación de horarios ferroviarios (Barber et al., 2007).

El escenario del problema de asignación de horarios ferroviarios consiste en un conjunto ordenado de dependencias (estaciones, apeaderos, cargaderos, bifurcaciones, etc.), un conjunto de trenes en cada sentido (ida, vuelta) y un recorrido (es el orden en el que el tren visita cada dependencia) para cada tren. El problema trata de asignar los instantes de entrada/salida de los k trenes en las i dependencias minimizando el tiempo promedio de recorrido y satisfaciendo las restricciones del usuario (hora de salida inicial, frecuencia de salida, paradas comerciales, etc.), las restricciones de tráfico (cruce, tiempo de recepción, tiempo de expedición, precedencia, etc.) y las restricciones topológicas (número de vías entre las dependencias, capacidad de cada estación, tiempos de cierre de las estaciones, etc.).

El problema de asignación de horarios ferroviarios se caracteriza por poseer un gran número de variables y restricciones, lo cual lo hace favorable para ser

resuelto utilizando Técnicas de Satisfacción de Restricciones, o CSP (por sus siglas en inglés Constraint Satisfaction Problem), ya que estas técnicas trabajan con problemas combinatorios donde existen un número finito de variables, dominios y restricciones. Un CSP consiste en un conjunto finito de variables, cada una de las cuales posee un dominio de valores y existen un conjunto de restricciones que acotan la combinación de valores que las variables pueden tomar.

El trabajo está organizado de la siguiente forma, un Marco Teórico, donde se explican en detalle los Problemas de Satisfacción de Restricciones, el Problema de Asignación de Horarios Ferroviarios y la notación utilizada para dicho problema. Posteriormente se explica la metodología utilizada y los resultados obtenidos en las pruebas. Finalmente son presentadas las conclusiones.

Marco Referencial

Problemas de Satisfacción de Restricciones

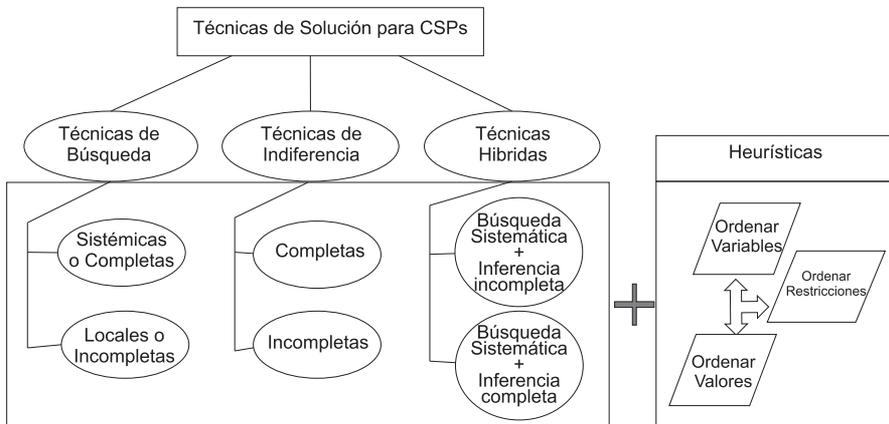
Los Problemas de Satisfacción de Restricciones (CSPs) son unas estructuras útiles para la resolución de diversos tipos de problemas y son ampliamente utilizados en el área de Inteligencia Artificial (IA) (Barták, 1999; Palma y Marín, 2008; Barták, Salido y Rossi, 2010). Formalmente, un CSP está formado por la terna $P = (X, D, R)$ donde X es el conjunto finito de variables $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$; D es el conjunto de dominios $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ tal que, para cada variable $X_i \in X$, existe un conjunto finito de valores $D_i \in D$ que la variable X_i puede tomar; y R es el conjunto finito de restricciones $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, el cual restringe los valores que las variables pueden simultáneamente tomar. Una solución para un CSP es una asignación de un valor del dominio de cada variable de forma que satisfaga todas las restricciones del problema. Un CSP es binario si y sólo si todas sus restricciones en R involucran dos variables X_i y X_j , con $i \neq j$.

Modelar un problema como un CSP confiere ventajas importantes (Russell y Norvig, 2010), como lo son las siguientes: (a) la representación de los estados se ajusta a un modelo estándar (compuesto por variables, dominios y restricciones, donde se pueden asignar valores a las variables); (b) pueden desarrollarse heurísticas genéricas eficaces que no requieran ninguna información dependiente del problema y (c) la estructura del grafo de restricciones puede ser utilizada para simplificar el proceso de solución en

problemas binarios (en un grafo de restricciones los nodos corresponden a las variables y las aristas corresponden a las restricciones). Así por ejemplo, un CSP con 10 variables, y cada variable con 10 posibles valores en su dominio, tendría un total de diez mil millones de posibilidades diferentes.

Dado que por lo general los CSP son problemas NP-completos, diversas técnicas han sido diseñadas para conseguir solución a este tipo de problemas, las cuales son agrupadas como se muestra a continuación: técnicas de búsqueda, técnicas de inferencia y técnicas híbridas. Las técnicas de búsqueda consisten en explorar el espacio de estados hasta encontrar una solución, y pueden ser sistemáticas (ejemplos: genera y prueba, backtracking cronológico) o locales (ejemplos: tabú search, algoritmos genéticos). Las técnicas de inferencia consisten en deducir un CSP* equivalente que sea más fácil de resolver. Estas técnicas pueden ser completas -si se logra extraer la solución del CSP* en forma directa- o incompletas -si se requiere complementarla con un proceso de búsqueda posterior, para encontrar la solución-. Ejemplo de inferencia incompleta son las técnicas de consistencia (ejemplos: AC3, AC4, AC6, 2-C3; 2-C3OPL, etc.). Las técnicas híbridas consisten en combinar las dos técnicas anteriores. La Figura 1 proporciona un esquema global de las técnicas antes mencionadas.

Figura 1. Técnicas de Solución para los CSPs



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, para mejorar el desempeño de los algoritmos de solución en los CSP, se han agregado heurísticas como por ejemplo: heurísticas de ordenación de variables, de ordenación de valores y de ordenación de restricciones, lo cual ha generado algoritmos más eficientes para resolver los problemas.

Los algoritmos de búsqueda completos o sistemáticos buscan a través del árbol de búsqueda las posibles asignaciones de valores a las variables, garantizando encontrar una solución, si es que existe, o demostrando que el problema no tiene solución, en caso contrario. A continuación se presentan brevemente los algoritmos de búsqueda utilizados en este manuscrito:

Backtracking, BT (Bitner y Reingold, 1975) es la base fundamental de los algoritmos de búsqueda sistemática para la resolución de CSPs. Se asume que: (a) el CSP es binario; y (b) la existencia de un orden estático entre las variables y entre los valores de los dominios de dichas variables. BT realiza el trabajo de búsqueda utilizando dos procesos: hacia adelante y hacia atrás. En el proceso hacia adelante, el algoritmo selecciona la siguiente variable de acuerdo al orden de las mismas y le asigna su próximo valor. Esta asignación de la variable se verifica en todas las restricciones formadas por la variable actual y alguna de las variables anteriores. Si todas las restricciones formadas por variables ya asignadas se han satisfecho, el algoritmo selecciona la siguiente variable y trata de encontrar un valor para ella de la misma manera. Si alguna restricción en la que participa esta variable no se satisface, entonces se activa el proceso hacia atrás: la asignación actual se deshace y se prueba con el próximo valor de la variable actual. Si no se encuentra ningún valor consistente, entonces tenemos una situación sin salida (*dead-end*) y el algoritmo retrocede a la variable anteriormente asignada y prueba la asignación de un nuevo valor. Si se asume que se está buscando una sola solución, BT finaliza cuando a todas las variables se les ha asignado un valor, en cuyo caso devuelve una solución, o cuando todas las combinaciones de variable-valor se han probado sin éxito, en cuyo caso no existe solución (Bitner y Reingold, 1975).

Forward Checking, FC (Haralick y Elliot, 1980) es uno de los algoritmos look-ahead más comunes. En cada etapa de la búsqueda, FC chequea hacia adelante la asignación actual, con todos los valores de las futuras variables,

que están restringidas con la variable actual. Los valores de las futuras variables, que son inconsistentes con la asignación actual, son temporalmente eliminados de sus dominios. Si el dominio de una variable futura se queda vacío, la instanciación de la variable actual se deshace y se prueba con un nuevo valor. Si ningún valor es consistente, entonces se lleva a cabo el *backtrack*. FC garantiza que en cada etapa la solución parcial actual sea consistente con cada valor de cada variable futura. Así, cuando se asigna un valor a una variable, chequea la consistencia con las variables futuras con las que está involucrada. Así, mediante el chequeo hacia adelante, FC puede identificar antes las situaciones sin salida y podar el espacio de búsqueda. FC puede ser visto como la aplicación de un simple paso de arco-consistencia sobre cada restricción, que implica a la variable actual con una variable próxima, después de cada asignación de variables (Haralick y Elliot, 1980).

Mantenimiento de la Arco-Consistencia, MAC. Los algoritmos de búsqueda MAC combinan un algoritmo de búsqueda con una técnica de inferencia incompleta: arco-consistencia (Bessiere y Regin, 1996). Estos algoritmos son actualmente los más utilizados en los resolutores de CSP (Ver CPAI08, 2010). Cuando se intenta la asignación de una variable, MAC aplica arco-consistencia al sub-problema formado por todas las futuras variables. Esto significa que además del trabajo que FC realiza, MAC chequea la consistencia también las variables pasadas. Si el dominio de alguna variable futura se queda vacío, la instanciación realizada a la variable actual se deshace, el valor probado se elimina del dominio de la variable actual y se prueba la arco-consistencia de nuevo. Después se prueba con un nuevo valor de la variable actual. Si ya no quedan valores en el dominio de la variable actual, entonces, al igual que en FC, se lleva a cabo el backtracking. El trabajo extra que MAC realiza al aplicar arco-consistencia puede eliminar más valores de las futuras variables y como consecuencia logra podar más el árbol de búsqueda que FC. Dependiendo el algoritmo de consistencia que se utilice dentro del algoritmo MAC se generan diferentes versiones. Así, MAC3 mantiene la arco-consistencia utilizando Ac3.

Look Back-Last Search BLS, (Arangú y Agüero, 2012) es una técnica de búsqueda heurística independiente del dominio, que combina las estructuras del almacenamiento de soportes (matriz *Last*) del algoritmo de consistencia 2-C3OPL (Arangú, Salido y Barber, 2010), con la técnica de búsqueda con enfoque *look-back*. BLS utiliza las restricciones para decidir el orden de

asignación de las variables y crear dependencias entre ellas. BLS utiliza las estructuras generadas por 2-C3OPL para guiar el proceso de búsqueda, ahorrando tiempo de cómputo y retrocesos (*backtracks*).

Problema de Asignación de Horarios para el Transporte Ferroviario

El objetivo principal del problema de asignación de horarios ferroviarios es minimizar el tiempo de recorrido de un conjunto de trenes.

Una red ferroviaria básicamente está compuesta por dependencias y vías únicas o dobles. Los tipos de dependencias que se consideraron son las siguientes:

- *Estación*: es un lugar donde los trenes pueden estacionarse, detenerse o circular. En las estaciones hay dos o más vías donde pueden realizarse cruces y adelantamientos.
- *Apedero*: es un lugar donde los trenes pueden detenerse o circular pero no pueden estacionarse, ni gestionar cruces o adelantamientos.
- *Bifurcación*: es un lugar donde una única vía se divide en dos, o viceversa. No está permitida la parada en la bifurcación.

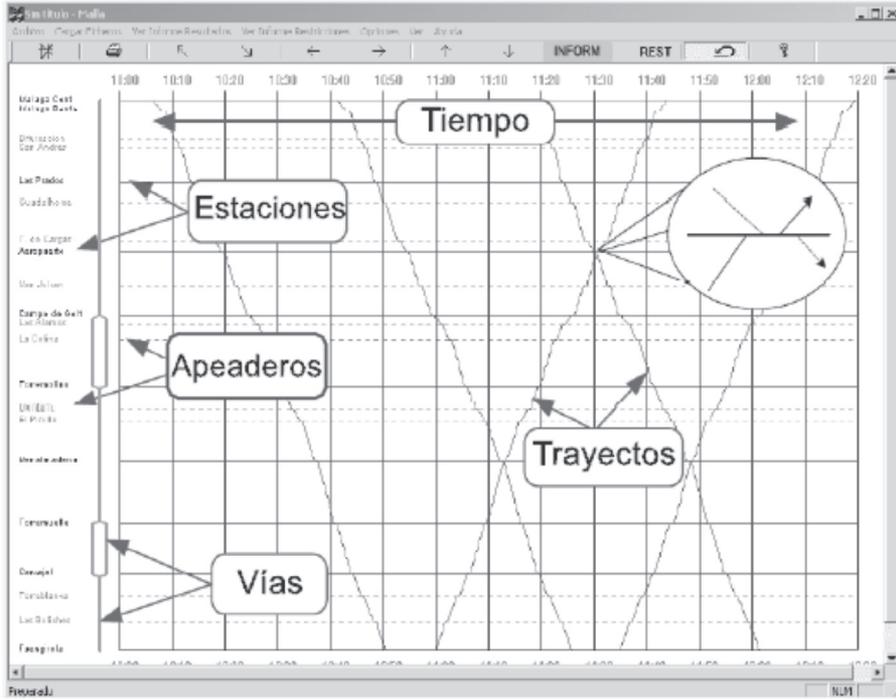
En una red ferroviaria, el operador necesita programar los trayectos de n trenes que van en un sentido (ida) y de m trenes que van en dirección opuesta (vuelta). Los trenes pueden ser de diferentes tipos (cercanías, mercancías, regionales, larga distancia, etc.) y cada uno de ellos puede requerir una frecuencia de salida particular. El tipo de tren determina el tiempo necesario para recorrer dos dependencias del trayecto.

El trayecto seleccionado por el operador para el recorrido del tren, determina por cuáles estaciones se ha de pasar y los tiempos de parada requeridos en cada estación para propósitos comerciales. Para poder realizar cruces en una sección de vía única, uno de los trenes debe esperar en una estación previa. A esta espera se le denomina parada técnica, donde uno de los trenes es desviado de la vía principal de forma que el otro tren pueda detenerse o continuar.

Los planificadores utilizan los mapas de recorridos (ver Figura 2) como herramientas gráficas que les ayudan en el proceso de planificación. Un mapa de recorridos contiene información concerniente a la topología ferroviaria

(dependencias, vías, distancia entre dependencias, características de control de tráfico, etc.) y los horarios de los trenes que utilizan la topología ferroviaria (tiempos de llegada y salida de los trenes en cada dependencia, frecuencias, paradas, cruces, adelantamientos, etc.).

Figura 2. Mapa de Recorridos



Fuente: Arangú, Salido y Barber(2010).

La Figura 2 muestra un mapa de recorridos donde los nombres de las dependencias son presentados a la izquierda, las líneas verticales representan el número de vías entre dependencias (vía única o vía doble), las líneas punteadas horizontales representan apeaderos o bifurcaciones y las líneas sólidas horizontales representan las estaciones. El objetivo es obtener un mapa de recorridos válido (que también puede ser optimizado) que tenga en cuenta lo siguiente: (i) las reglas de tráfico, (ii) los requerimientos del usuario y

(iii) la topología de la infraestructura ferroviaria.

Así el problema de asignación de horarios ferroviarios ha sido modelado como un caso especial del problema de asignación de tareas (job-shop scheduling problem) (Ingolotti, 2007; Walker, Snowdon y Ryan, 2005; Silva, 2001), donde los recorridos del tren se consideran los trabajos programados y las vías se consideran los recursos. También ha sido modelado utilizando técnicas distribuidas de Sistemas Multi-Agentes (MAS) (Abril, 2007) y utilizando procedimientos analíticos (Bürker y Seybold, 2012). Así mismo, la asignación de horarios para los nuevos trenes se puede hacer de dos formas: sobre una red 'vacía' (donde no hay trenes previamente planificados) (Walker et al, 2005 y Silva, 2001), o teniendo en cuenta que la línea de ferrocarril puede estar ocupada por otros trenes en circulación, cuyos horarios no se pueden modificar (Ingolotti, 2007).

Notación

La notación utilizada para describir el problema de asignación de horarios ferroviarios, está basada en la propuesta por Ingolotti (2007) y Tormos, Lova, Barber, Ingolotti, Abril y Salido (2008), se detalla a continuación:

- T : conjunto finito de trenes t considerados en el problema. T_D : conjunto de trenes viajando en sentido ida. T_U : conjunto de trenes viajando en sentido vuelta. De esta forma, $T_D \cup T_U = T$ y $T_D \cap T_U = \phi$.

- $L = \{l_0, l_1, \dots, l_m\}$: línea ferroviaria compuesta por un conjunto ordenado de dependencias (estaciones, apeaderos y bifurcaciones) que pueden ser visitadas por los trenes t . Las dependencias contiguas l_i y l_{i+1} están enlazadas por una sección de vía única o doble.

- J_t : recorrido del tren t . El recorrido se describe como una secuencia ordenada de dependencias a ser visitas por el tren de forma tal $\forall t \in T, \exists J_t : J_t \subseteq L$. El recorrido J_t muestra el orden utilizado por el tren t para visitar un conjunto de dependencias. De esta forma l_0^t y $l_{n_t}^t$ representan, respectivamente, la primera y última dependencia visitada por el tren t .

- C_i^t : tiempo mínimo requerido por el tren t para operaciones comerciales (como son embarque y desembarque de pasajeros) en la estación i (parada comercial).

- Δ_i^t : tiempo recorrido por el tren t desde la dependencia l_i^t a la l_{i+1}^t

- F : frecuencia de los trenes considerados en el problema. F_D : frecuencia de los trenes que salen (viajan en sentido ida). F_U : frecuencia de los trenes que regresan (viajan en sentido vuelta).

- λ : tiempo de retraso permitido para el tren t con una frecuencia F .

Metodología

La naturaleza del trabajo es de carácter descriptivo – documental por ser un estudio de problemas de tipo teórico-práctico con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza (Benítez, Sanabria, Arteaga y Nieto, 1991). Hernández, Fernández y Baptista (2006) señalan lo siguiente:

En un estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide o recolecta información sobre cada una de ellas, para así describir lo que se investiga... pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a los que se refieren (p. 71).

Es un trabajo enfocado bajo la modalidad de investigación básica, ya que involucra problemas teóricos cuya finalidad radica en formular nuevas teorías o modificar las existentes, en incrementar los conocimientos científicos o filosóficos (Zorrilla, 2004). Se utilizaron técnicas pertenecientes al área de Inteligencia Artificial, específicamente los CSPs para abordar y solucionar el Problema de Asignación de Horarios para el Transporte Ferroviario. La resolución de un CSP consta de dos fases diferentes (Barták et al, 2010). Estas se describen a continuación:

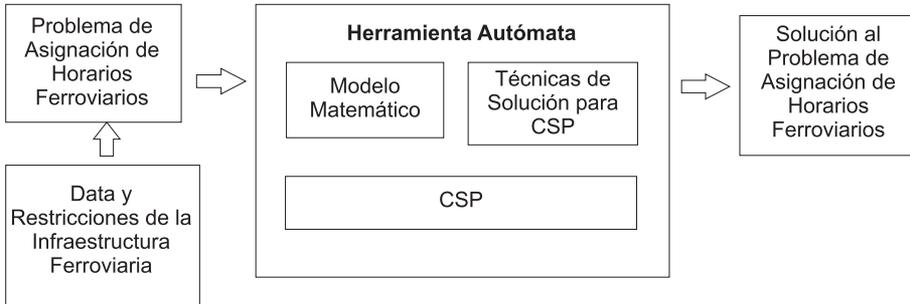
- **Fase de modelado**: consiste en expresar el problema en términos de la sintaxis de los CSP: variables, dominios y restricciones.

- **Fase de solución**: consiste en aplicar técnicas de satisfacción de restricciones para resolver el CSP, las cuales pueden clasificarse en: técnicas completas, técnicas incompletas (o de inferencia) y técnicas híbridas.

Para la resolución del problema (ver Figura 3) se construyó una herramienta automática que permite convertir en un CSP la formulación del modelo de matemático del problema, la data y restricciones proporcionadas por la Administración de Infraestructura Española Ferroviaria Española, ADIF. Esta herramienta automática tiene incorporada técnicas de resolución completas e incompletas, lo cual permite generar una solución al problema. Así mismo,

tiene la capacidad de generar el modelado para ser resuelto por otro resolutor.

Figura 3: Esquema de la Metodología de Resolución del Problema de Asignación de Horarios Ferroviarios.



Fuente: Elaboración propia.

El modelaje propuesto se comparó empíricamente los algoritmos genéricos: BT, FC MAC3 y BLS en la búsqueda de una solución al problema de asignación de horarios ferroviarios. La búsqueda con MAC3 se realizó utilizando el resolutor CON'FLEX (2010). Todos los algoritmos realizaron consistencia en etapa de pre-proceso (previo a realizar la búsqueda). Así, MAC3 y FC se ejecutaron con AC3 (Mackworth, 1977) mientras que BLS y BT se ejecutaron utilizando 2-C3OPL (Arangú et al, 2010). La medida de eficiencia para todos los algoritmos fue el tiempo de cómputo. Se utilizó la gráfica como medio de presentación de los resultados. Todos los algoritmos evaluados fueron escritos en C. Los experimentos fueron realizados en un ordenador con procesador Intel Core 2 Quad (de 2.83 GHz velocidad del procesador y 3 GB RAM).

El número de variables y de restricciones en la formulación CSP presentada estuvo determinado por el número de trenes T y el número de dependencias L . Si L o T se incrementan, entonces tanto el número de variables como el de restricciones se incrementarán también. El número de restricciones no cambia cuando se modifican los valores de frecuencia F_D , F_U o el valor de retraso λ , sin embargo esas variaciones influyen en la restringibilidad de las restricciones. Las combinaciones de trenes T y frecuencias F utilizadas en la evaluación se muestran en las Tabla 1 (a) y (b), respectivamente.

Tabla 1. Problema de Transporte Ferroviario. (a) Combinaciones de Trenes utilizada. (b) Combinaciones de Frecuencia y retraso utilizadas

(a)

Combinación nombre	T		Número de Trenes
	T_D	T_U	
T0	1	1	2
T1	2	2	4
T2	3	2	5
T3	3	3	6
T4	4	4	8
T5	5	4	9
T6	5	5	10
T7	6	5	11
T8	6	6	12
T9	8	7	15
T10	8	8	16

(b)

Combinación nombre	F		Retraso h
	F_D	F_U	
F1	100	120	2
F2	100	120	5
F3	100	120	10
F4	150	170	2
F5	150	170	5
F6	150	170	10
F7	100	150	30

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación se llevó a cabo en una infraestructura ferroviaria real que une a las ciudades españolas de Zaragoza y Casetas, a partir de datos facilitados por operadores de ADIF. El recorrido Zaragoza-Casetas consiste en 7 dependencias. En todos estos casos de prueba se fija el número de dependencias (5 estaciones y 2 apeaderos). Sin embargo el número de trenes, la frecuencia y el retraso, se cambian para cada caso de prueba.

Resultados

Como se indicó anteriormente, la resolución de un CSP consta de dos fases: Modelado y Solución. Así, los resultados de este trabajo se presentan de igual forma.

Fase de Modelado: Formulación CSP para el problema de asignación de horarios ferroviarios

Se propone un modelado binario, no-normalizado con restricciones expresas en forma extensional, el cual, como un CSP contiene:

Variables. Cada tren cuando pasa por una dependencia generará dos variables diferentes (tiempo de llegada y tiempo de salida):

- dep_i^t tiempo de salida del tren $t \in T$ de la dependencia i , donde $i \in J_i \{ l_{nt}^t \}$.

- arr_i^t tiempo de llegada del tren $t \in T$ de la dependencia i , donde $i \in Jt \setminus \{l_0^t\}$.

Dominios. El dominio de cada variable es un intervalo $[\min_v, \max_v]$, donde donde $\min_v \geq 0$ y $\max_v > \min_v$. Este intervalo es obtenido del operador ferroviario, y puede tener una funcionalidad de segundos o decasegundos.

Restricciones. La asignación de horarios ferroviarios debe satisfacer un conjunto de reglas/requerimientos para que sea factible. Dichas reglas/requerimientos se clasificaron en tres grupos, dependiendo si son: (1) reglas de tráfico, (2) requerimientos del usuario y (3) reglas topológicas. Estas reglas se modelaron con las siguientes restricciones:

(1) Reglas de Tráfico. Las restricciones tomadas en cuenta son:

- **Restricción de cruce.** Dos trenes que viajen en direcciones opuestas no deben utilizar al mismo tiempo la misma sección de vía única:

$$dep_{i+1}^t > arr_{i+1}^t > \forall dep_i^t > arr_i^t$$

- **Restricción de tiempo de expedición.** Existe un tiempo dado para colocar un tren desviado de vuelta a la vía principal para que salga de la estación. Así, $dep_i^t - arr_i^t \geq E_i$, donde E_i es el tiempo de expedición especificado para el tren t .

- **Restricción de tiempo de recepción.** Existe un tiempo dado para desviar un tren desde la vía principal de forma tal que puedan realizarse cruces y/o adelantamientos: $arr_i^t \geq arr_i^t \rightarrow arr_i^t - arr_i^t \geq Recep_i$, donde $Recep_i$ es el tiempo de recepción especificado para que el tren llegue al primero.

- **Restricción de tiempo de trayecto.** $arr_{i+1}^t = dep_i^t + \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t$. Para cada tren t y cada sección de vías, el tiempo de trayecto está dado por $\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t$, lo cual representa el tiempo que el tren t debe emplear en ir desde la dependencia l_i^t hasta dependencia l_{i+1}^t .

(2) Requerimientos del usuario. Las principales restricciones son:

- **Número de trenes viajando en cada sentido** n (ida) y m (vuelta). $T = T_D \cup T_U$, donde:

$$t \in T_D \leftrightarrow (\forall l_i^t: 0 \leq i < n_v, \exists l_j \in \{L \setminus \{l_m\}\} : l_i^t = l_j \wedge l_{i+1}^t = l_{j+1})$$

$$t \in T_U \leftrightarrow (\forall l_i^t: 0 \leq i < n_v, \exists l_j \in \{L \setminus \{l_0\}\} : l_i^t = l_j \wedge l_{i+1}^t = l_{j+1})$$

- **Recorrido:** dependencias por las que visitar y tiempo de parada para propósitos comerciales en cada sentido para cada tren $t \in T: j_t = \{l_{o_t}^t, l_{1_t}^t, \dots, l_{nt}^t\}$.

- **Horario de Frecuencias:** Los requerimientos de frecuencia F de la salida de trenes en ambas direcciones: $dep_i^{t+1} - dep_i^t = F + \lambda_i$. Esta restricción es muy restrictiva debido a que cuando son realizados los cruces, los trenes deben esperar en las estaciones un cierto intervalo de tiempo. Este intervalo debe ser propagado a todos los trenes que van en el mismo sentido para mantener el horario de frecuencia establecido. El usuario puede requerir una frecuencia fija, una frecuencia entre un intervalo mínimo y máximo, o múltiples frecuencias. Una frecuencia entre un intervalo mínimo y máximo fue la seleccionada en esta investigación, lo que convierte al problema en no-normalizado:

$$\text{Para } t \in T_D : dep_i^t + F_D < dep_i^{t+1} \wedge dep_i^t + F_D + \lambda_i > dep_i^{t+1}$$

$$\text{Para } t \in T_U : dep_i^t + F_U < dep_i^{t+1} \wedge dep_i^t + F_U + \lambda_i > dep_i^{t+1}$$

(3) Topología de la infraestructura ferroviaria. Algunas de estas restricciones son:

- **Número de vías en las estaciones y el número de vías entre dos dependencias (vía única o vía doble).** No está permitido ni los cruces ni los adelantamientos en los tramos de vía única.

- **Restricciones de tiempo adicional en la estación con propósitos comerciales y/o técnicos.** Cada tren $t \in T$ está obligado a permanecer en una estación I_i^t por lo menos Com_i^t unidades de tiempo (parada comercial). El resto del tiempo que el tren permanezca en la estación se considerará parada técnica (necesaria para gestionar cruces o adelantamientos): $dep_i^t \geq arr_i^t + Com_i^t$.

De conformidad con los requerimientos de ADIF, el sistema debe obtener una solución para que todas las restricciones antes mencionadas (tráfico, necesidades de los usuarios y topológicas) se cumplan.

La fuente de las dificultades subyacente en la asignación de horarios ferroviarios son las siguientes: (a) cada dependencia genera dos variables cuyas tallas de dominio son grandes (un problema combinatorio); (b) El aumento de los trenes aumenta las restricciones disyuntivas (que genera las ramas del árbol de búsqueda); (c) El aumento de la frecuencia de los trenes, hace que el problema sea más restrictivo (a menudo no hay solución); (d) Encontrar una solución mediante un algoritmo de búsqueda estándar como FC

para las instancias propuestas en esta investigación puede tardar más de doce horas.

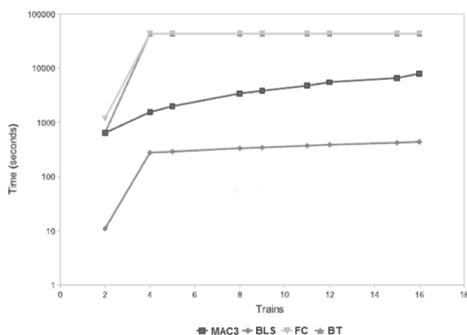
Fase de solución

El modelado propuesto se le aplican las siguientes técnicas de búsqueda existentes en la literatura: BT, FC, MAC3 y BLS.

El CSP generado para cada problema de asignación de horarios ferroviarios contiene todas las variables y restricciones anteriormente mencionadas. Las restricciones de cruce fueron generadas restringiendo el número de cruces con la heurística 1.0 propuesta por Salido (2008) para generar problemas con solución. Todas las restricciones están presentadas en forma intencional y cada problema posee restricciones no-normalizadas.

La Figura 4 muestra los resultados de la búsqueda en el tramo Zaragoza-Casetas utilizando los algoritmos BT, FC, MAC3 y BLS. El número de trenes T se incrementó de 2 a 16 utilizando las combinaciones de la Tabla 1 (a). Para todas las instancias el número de dependencias se fijó a 7; la talla del dominio se fijó a $d=2500$; las frecuencias de salida y llegada se fijaron a $F_o=100$ y $F_l=120$, respectivamente; el retraso se fijó a 5 y el tiempo máximo de finalización se fijó en 43200 segundos. Cada problema genera diferentes instancias de CSP. Así por ejemplo, con la combinación de trenes $T1$, el CSP generado es $\langle 58, 2500, 77, 2 \rangle$ y con la combinación de trenes $T10$, el CSP generado es $\langle 226, 2500, 434, 2 \rangle$.

Figura 4. Tiempo de cómputo (seg.) empleado por los algoritmos de búsqueda BT, FC, MAC3 y BLS para el problema de asignación de horarios ferroviarios en el recorrido Zaragoza-Casetas, fijando $L = 7$ y $F = F2$ e incrementando T .



Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 4, en la búsqueda de una solución el algoritmo BLS tuvo mejor desempeño, en todas las instancias, que los algoritmos MAC3, FC y BT. Ello se debe a que BLS utiliza la información almacenada en el último soporte encontrado para guiar la búsqueda y no requiere rehacer el proceso de consistencia que si es hecho por FC y MAC3 (en dominios grandes, rehacer la consistencia varias veces es muy costoso en lo que se refiere a tiempo de cómputo). También, en instancias superiores a 4 trenes, los algoritmos FC y BT alcanzaron el tiempo máximo de finalización sin generar la solución.

Conclusiones

El problema de asignación de horarios ferroviarios es un problema real que puede ser modelado como un CSP. En este trabajo se ha presentado una herramienta automática que permite el modelaje binario no-normalizado de dicho problema y su resolución utilizando técnicas de solución existentes en la literatura, lo que permite optimizar el uso de la infraestructura ferroviaria y facilitar el trabajo que realizan los planificadores encargados de realizar los mapas de recorridos. La formulación CSP genera problemas grandes y de amplios dominios en los que las técnicas de consistencia son importantes para reducir el espacio de búsqueda y mejorar el proceso de búsqueda de soluciones.

En la búsqueda el algoritmo BLS tuvo mejor desempeño que los algoritmos MAC3, FC y BT, en varias instancias del problema de asignación de horarios ferroviarios, donde el tiempo de cómputo fue reducido en un 80% con respecto a MAC3 y fue reducido en un 99% con respecto a FC y BT en instancias con solución.

Referencias bibliográficas

- Abril Montserrat (2007). *Particionamiento y resolución distribuida multivariable de problemas de satisfacción de restricciones*. Tesis de doctorado no publicada, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Arangú Marlene, Salido Miguel and Barber Federico (2010). A filtering technique for the railway scheduling problem. In *COPLAS 2010: ICAPS 2010 Workshop on Constraint Satisfaction Techniques for Planning and Scheduling Problems*, pages 68–78.

- Arangú Marlene y Jorge Agüero (2012). Algoritmo de Resolución del problema de asignación de horarios para el transporte. En *1er Congreso Venezolano de Ciencia, Tecnología e Innovación en el marco de la LOCTI y del PEII*. Tomo 2. p. 219.
- Barber, Federico; Abril, Montserrat; Salido, Miguel Ángel; Ingolotti, Laura; Tormos, Pilar and Lova, Antonio (2007). *Survey of automated systems for railway management. Technical Report, DSIC-II/01/07*. UPV.
- Barták, Roman (1999). Constraint programming: In pursuit of the holy grail. In MatFyzPress, editor, *Proceedings of the Week of Doctoral Students (WDS99)*, Part IV, pages 555–564.
- Barták, Roman; Salido, Miguel and Rossi Francesca (2010). New trends in constraint satisfaction, planning, and scheduling: a survey. *The Knowledge Engineering Review*, 25 (Special Issue 03):249–279.
- Benítez, José; Sanabria, Alicia; Arteaga, Lis y Nieto, Corina (1991). *Normas para la Realización de Trabajos de Ascenso del Personal Docente y de Investigación de la UCLA*.
- Bessiere, Christian y Régin, Jean-Charles (1996). MAC and combined heuristics: Two reasons to forsake fc (and cbj?) on hard problems. In *Proceedings of the Second International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pages 61–75.
- Bitner, James R. and Reingold, Edward M. (1975). Backtrack programming techniques. *Commun. ACM*, 18(11), 651–656.
- Buker, T. and Seybold, B. (2012). Stochastic modelling of delay propagation in large networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2(12), 34–50.
- CPAI08 (2010). [Página web]. Disponible en <http://www.cril.univ-artois.fr/CPAI08/Competition-08.pdf>. [Consulta: 2010, Marzo 03].
- Eurostat: Estadísticas Europeas. (2011). [Página web]. Disponible en <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>. [Consulta: 2011, Enero 15].
- Haralick, R. and Elliot, G (1980). Increasing tree efficiency for constraint satisfaction problems. *Artificial Intelligence*, 14, 263–314.
- Hernandez R.; Fernandez C. y Baptista P (2006). *Metodología de la Investigación*. 4ta Edic. Editorial McGrawHill. México.
- IFE: Instituto de Ferrocarriles del Estado, Venezuela (2013). [Página web]. Disponible en <http://www.ife.gob.ve/>. [Consulta: 2013, Abril 2].

- INE: Instituto Nacional de Estadística de España (2011). [Página web]. Disponible en <http://www.ine.es>. [Consulta: 2011, Enero 15].
- Ingolotti, Laura (2007). *Modelos y métodos para la optimización y eficiencia de la programación de horarios ferroviarios*. Tesis de doctorado no publicada, Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Mackworth, Alan K. (1977). Consistency in networks of relations. *Artificial Intelligence*, 8:99-118.
- Palma Méndez, José Tomás and Marín Morales, Roque (2008). *Inteligencia Artificial: Métodos, técnicas y aplicaciones*. Editorial McGraw-Hill. España.
- Salido, Miguel A. (2008). A non-binary constraint ordering heuristic for constraint satisfaction problems. *Applied Mathematics and Computation*, 198(1), 280–295.
- Silva de Oliveira, Elias (2001). *Solving Single-Track Railway Scheduling Problem Using Constraint Programming*. Tesis doctoral no publicada, Universidad de Leeds, School of Computing. Yorkshire, Inglaterra.
- Stuart, Russell y Peter, Norvig (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* 3rd Edition. Editorial Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Tormos, Pilar; Lova, Antonio; Barber, Federico; Ingolotti, Laura; Abril, Montserrat and Salido, Miguel Ángel (2008). A genetic algorithm for railway scheduling problems. *Metaheuristics for Scheduling In Industrial and Manufacturing Applications*, ISBN: 978-3-540-78984-0, pages 255–276.
- Venezuela en Datos (2007). *Transporte*. Editorial El Nacional. Caracas
- Walker, Cameron; Snowdon, Jody y Ryan, David (2005). Simultaneous disruption recovery of a train timetable and crew roster in real time. *Comput. Oper. Res.*, pages 2077–2094.
- Zorrilla Arena, Santiago (2004). *Introducción a la Metodología de la Investigación*. Editorial Aguilar León. México.