Optimización de infraestructuras de transporte combinado mediante simulación iterativa. Estudio de una terminal tren-carretera

Alicia García-Hernández — Ingeniero Industrial
Isabel García-Gutiérrez — Doctor Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD CARLOS III. Escuela Politécnica Superior. Dpto. de Ingeniería Mecánica.
Avda. de la Universidad, 30 - 28911 Leganés (Madrid). Tfno: +34 916 249479.
agarci1@ing.uc3m.es

Recibido: 26/07/2011 • Aceptado: 15/05/2012
DOI: http://dx.doi.org/10.6036/4339

OPTIMIZATION OF COMBINED TRANSPORTATION INFRASTRUCTURES USING ITERATIVE SIMULATION. Railroad terminal study

ABSTRACT

• Simulation is frequently used to evaluate new scenarios to improve the present operation of a combined transportation terminal. This project illustrates how simulation may be used to generate new alternative configurations in the redesign process of a terminal (changing the number of cranes, working shifts…). This is an iterative process, where the results obtained for a certain configuration are used as an input for the generation of new promising configuration alternatives. A simulation model, developed in Witness® commercial software, is presented to illustrate the alternative generation process. The model represents the initial configuration of a rail-road terminal. Terminal performance is assessed and based on this information and the knowledge of the system internal causality, new promising configuration alternatives are defined and implemented. The results of these new configurations may as well lead to new changes, reproducing once again the process.

• Keywords: combined transport, terminal simulation, process improvement.

RESUMEN

La simulación es frecuentemente utilizada para valorar nuevos escenarios de mejora sobre el funcionamiento actual de una terminal de transporte combinado. El presente trabajo ilustra cómo la simulación puede actuar como mecanismo para generar nuevas alternativas de mejora para una terminal (cambios en el número de grúas, turnos de trabajo, etc.), extendiendo su uso más allá de la valoración de alternativas definidas en las primeras fases de un proyecto de rediseño. Este mecanismo se reproduce iterativamente, de forma que los resultados de una configuración dirigen y alimentan el proceso de generación de nuevas configuraciones. Para ilustrar este uso de la simulación, se presenta un modelo, implementado en el software comercial *Witness®*, que representa la configuración inicial de una terminal tren-carretera específica. Este modelo se emplea para analizar el rendimiento inicial de la terminal y posteriormente, para identificar y valorar alternativas de mejora basadas en los resultados de la simulación inicial y en el funcionamiento interno del sistema. A su vez, la evaluación de estas alternativas de mejora puede dar lugar a nuevos cambios no identificados inicialmente, lo que llevaría a repetir este proceso de identificación y valoración de alternativas.

Palabras clave: transporte combinado, simulación de terminales, mejora de procesos.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el transporte por carretera ha atraído la gran mayoría de los flujos de mercancías a pesar de las externalidades que presenta: problemas ambientales, saturación de las carreteras, accidentes... [1].

La *Comisión Europea* está promoviendo, a través de

acciones específicas, como el programa *Marco Polo*, la transferencia de flujos transportados por carretera a otros modos (ferrocarril, marítimo o fluvial), con el objetivo de desarrollar un nuevo sistema de transporte sostenible a largo plazo [2]. En cuanto al transporte por ferrocarril, que se utiliza para medias y largas distancias, las acciones están orientadas hacia el desarrollo de una relación bimodal con el transporte por carretera, para garantizar el servicio puerta a puerta.

Los objetivos de este trabajo se establecen dentro de una línea de investigación de más diez años de duración dedicada a la aplicación de la simulación para el estudio y la mejora del transporte combinado tren-carretera.

En este campo, la simulación es frecuentemente utilizada para valorar nuevos escenarios que ayuden a mejorar el funcionamiento de las terminales que componen una red de transporte combinado. El trabajo que aquí se presenta explora el uso de la simulación como instrumento para generar alternativas de mejora sobre estas infraestructuras (cambios en el número de grúas, turnos de trabajo del personal, layout de la terminal, uso de sus recursos, etc.), extendiendo su uso más allá de la valoración de alternativas predefinidas en las primeras fases de un proyecto de rediseño. Este uso de la simulación, no referido en la literatura para el estudio y mejora de terminales de transporte combinado, queda ejemplificado a lo largo del documento con un caso práctico.

Los detalles de este trabajo se estructuran como sigue. En primer lugar, se exponen los objetivos y la metodología seguida (sección 2). A continuación, se revisan otros trabajos que emplean simulación para estudiar terminales de transporte combinado (sección 3). Seguidamente (sección 4), se describe la terminal considerada como objeto de estudio y se presenta el modelo construido para simular su funcionamiento, junto a los indicadores utilizados para medir su rendimiento. Después (secciones 5 y 6), se aplica el proceso iterativo de generación y valoración de alternativas de mejora mediante simulación. Finalmente (sección 7), se exponen las conclusiones de este trabajo.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

En el marco de un proyecto de rediseño de una terminal de transporte combinado, un uso típico de la simulación es la cuantificación de los resultados asociados a nuevas configuraciones. Las ventajas de la simulación en este sentido son evidentes, puesto que permite prever los efectos de modificar la terminal, sin necesidad de incurrir en el coste de implementarlos sobre el sistema real.

El procedimiento habitual al realizar un estudio de simulación para el rediseño de una terminal implica: establecer los objetivos del estudio, recabar la información necesaria sobre la terminal, formalizar el modelo conceptual (o especificaciones del modelo), programarlo, verificar y validar el modelo (comparándolo con la terminal en su estado actual), establecer e implementar informáticamente las nuevas configuraciones que se quieren estudiar y, por último, obtener resultados y documentar el modelo y las conclusiones del estudio.

Los objetivos del trabajo que aquí se presenta tienen su origen en la apreciación del enorme valor que tiene la etapa de análisis y búsqueda de información sobre la terminal, más allá de su contribución a la construcción del modelo. Con un adecuado enfoque y coordinación entre el analista (encargado de implementar el modelo) y sus clientes (el gestor o gestores que encargan el estudio), el estudio de simulación de la configuración inicial puede utilizarse para generar nuevas alternativas de mejora. En efecto, la construcción del modelo de la configuración inicial exige la explicitación exhaustiva de los mecanismos causales que relacionan las variables de entrada y parámetros de diseño de la terminal con las variables de salida, indicadoras de su rendimiento. El análisis de estos mecanismos causales, posiblemente no tan explícitos antes de emprender este estudio, al menos en su totalidad, puede ser una fuente de nuevas mejoras para la terminal, especialmente si se complementan con el análisis cuantitativo de su impacto en los resultados.

La experiencia de las autoras en este sentido refuerza esta idea, de tal forma que, en este trabajo, se ha recabado información sobre una terminal tren-carretera específica para desarrollar un modelo que simule sus recursos, infraestructuras y funcionamiento. Una vez creado el modelo, se pretende ilustrar cómo los resultados de la simulación y la comprensión de las relaciones causales que existen entre sus entradas y salidas pueden actuar como mecanismo de generación de nuevas alternativas de mejora para la terminal. Este mecanismo se reproduce iterativamente, de forma que los resultados de una configuración dirigen y alimentan el proceso de generación de nuevas configuraciones.

3. LITERATURA REVISADA

Caris et al. [3] y Angeloudis y Bell [4] revisan numerosos artículos donde se emplean modelos de simulación para estudiar terminales de transporte combinado.

En parte de los trabajos revisados, la simulación se utiliza para evaluar los resultados aportados por otros modelos de optimización o heurísticos (véase, por ejemplo, [5] y [6]).

En otros casos, la simulación se usa directamente como instrumento de comparación de alternativas de configuración para algún subsistema de la terminal. Éste es el caso de los trabajos realizados por Bugaric y Petrovic [7], que aplican un estudio de simulación para analizar dos procedimientos alternativos para descargar barcos que transportan granel en un puerto interior, o Vis y van Anhot [8], que emplean simulación para estudiar dos estrategias alternativas para cargar/descargar barcos en una terminal portuaria de contenedores. En ambos casos, se simulan varios escenarios alternativos, expuestos por los autores al inicio del estudio, donde una o varias características de la terminal varían, pero no se utilizan los resultados de la simulación inicial ni el

funcionamiento interno del sistema para buscar nuevas alternativas de operación o de mejora, como se propone en el presente artículo.

La simulación también se utiliza para evaluar cambios de carácter estratégico, que afectan a las infraestructuras y/o recursos de la terminal. Éste es el caso de Lee et al. [9], que emplean un modelo de simulación para estudiar el diseño de dos nuevas terminales ferroviarias que darán servicio a un parque industrial y a varios puertos, o de Ambrosino y Tànfani [10], que emplean un modelo de simulación para evaluar una ampliación de capacidad en una terminal portuaria. Al igual que en el caso anterior, cada autor analiza los escenarios fijados al inicio del estudio, sin utilizar los resultados de la simulación ni el funcionamiento interno del sistema para buscar nuevas alternativas de diseño o de mejora.

4. MODELO DE LA TERMINAL

El presente trabajo se centra en una terminal tren-carretera específica para estudiar, mediante simulación, su situación actual y mejorar iterativamente su funcionamiento.

Esta terminal presta dos servicios: almacenamiento de contenedores e intercambio de contenedores entre trenes y camiones. Los trenes llegan y salen de la terminal siguiendo un plan de periodicidad semanal.

Para llevar a cabo estos servicios, la terminal dispone de las siguientes infraestructuras y recursos:

- Una vía de entrada/salida de trenes, que está operativa las 24 horas del día y que conecta el exterior de la terminal con las vías de recepción/expedición.
- Tres vías de recepción/expedición. Sus cabeceras están electrificadas y se utilizan para retirar/colocar las locomotoras eléctricas de los trenes entrantes/salientes.
- Seis vías de carga/descarga. Sus cabeceras no están electrificadas.
- Dos áreas de almacenamiento de contenedores:
  - Una playa de almacenamiento, que está a 40 metros de las vías y que dispone de capacidad para albergar un máximo de 400 TEUs.
  - Dos líneas de almacenamiento, una a cada lado de las vías de carga/descarga. Una línea alberga contenedores que van a salir de la terminal en camión, mientras que la otra almacena contenedores que van a salir en tren. Su capacidad total de almacenamiento es de 300 TEUs.

Esta terminal prioriza la colocación de contenedores en las líneas de almacenamiento que están a ambos lados de las vías para reducir dobles manipulaciones. La playa se utiliza cuando las líneas están saturadas.

- Una puerta para la entrada/salida de camiones, que está operativa de lunes a viernes de 7:30 a 19:30 y que es atendida por un único trabajador por turno.
- Un área de aparcamiento de camiones (con capacidad para 4 camiones) donde esperan si la puerta de entrada/salida o las áreas de carga/descarga de camiones están saturadas.
- Dos áreas de carga/descarga de camiones. Una situada en las proximidades de la playa de almacenamiento (con capacidad para 6 camiones) y otra cerca de las vías de carga/descarga (con capacidad para 10 camiones).
- Dos grúas móviles. Una trabaja de lunes a viernes de 7:00 a 21:00, mientras que la otra trabaja de lunes a viernes de 7:00 a 14:00. Ambas grúas pueden moverse entre las distintas áreas de la terminal, y por tanto, gestionar las dos áreas de carga/descarga de camiones, la playa de almacenamiento de contenedores y la línea de almacenamiento que alberga contenedores que van a salir en camión.
- Dos grúas pórtico que trabajan de lunes a viernes de 7:00 a 21:00. Ambas grúas se desplazan a lo largo de las vías de carga/descarga, pudiendo mover contenedores entre las infraestructuras que están bajo pórtico: vías de carga/descarga, líneas de almacenamiento y área de carga/descarga de camiones que está cerca de las vías. Principalmente, se dedican a cargar y descargar trenes. Sólo atienden camiones si esto supone un intercambio directo entre modos o bien, si las grúas móviles no pueden acceder a la línea de almacenamiento donde está el contenedor a cargar o donde debe ser colocado el contenedor a descargar.
- Un tractor de maniobras que trabaja las 24 horas del día y que se encarga de mover las plataformas de los trenes entre las vías electrificadas y no electrificadas de la terminal.

El modelo creado para simular el comportamiento de esta terminal ha sido implementado en el software comercial *Witness®*.

Para dotar de mayor credibilidad al modelo y facilitar su comprensión, los elementos y procesos de la terminal han sido representados gráficamente, pudiendo seguir el flujo de contenedores, trenes y camiones que circulan por la terminal, así como las operaciones realizadas sobre cada uno de ellos. En la Fig. 1, se muestra el estado del modelo de simulación

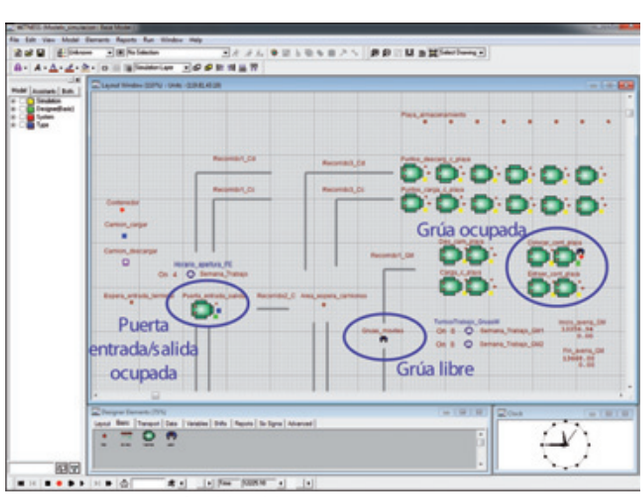

Fig. 1: Representación gráfica del modelo

en t=12225.10. En este instante, se observa que la puerta de entrada/salida está ocupada por un camión a descargar, mientras que una grúa móvil está libre y otra grúa móvil está colocando un contenedor en la playa de almacenamiento.

La hora de llegada/salida de los trenes, la tasa de llegadas de los camiones, el tiempo asociado a cada operación de la terminal y la tasa de avería de sus equipos (grúas y tractor de maniobras) pueden variar de forma aleatoria en el modelo.

Los resultados que proporciona la simulación pueden clasificarse en tres grupos: nivel de servicio, productividad y uso de recursos e infraestructuras. Los resultados sobre el nivel de servicio hacen referencia al número de trenes por semana que no salen a tiempo, el retraso medio asociado, el tiempo medio destinado a la carga/descarga de los trenes, el tiempo medio de estancia para los camiones a cargar/descargar, el número medio y máximo de camiones que esperan fuera/dentro de la terminal y el tiempo medio de espera asociado. El número medio de camiones, trenes y contenedores por tren que son atendidos al día y el número de trasbordos directos tren-carretera se utilizan para medir la productividad de la terminal. Finalmente, el modelo cuantifica el uso de las infraestructuras y recursos de la terminal: vías, áreas de almacenamiento, puerta de entrada/salida, área de aparcamiento, grúas móviles, grúas pórtico y tractor de maniobras.

El rendimiento de la terminal será adecuado si las infraestructuras y recursos disponibles se ajustan a la carga de trabajo existente, si todos los trenes salen con la carga prevista y según la hora fijada en el plan de trenes y si al menos el 95% de los camiones atendidos permanecen en la terminal menos de 20 minutos. Estos criterios han sido utilizados en varios proyectos europeos y han sido confirmados por varios gestores de terminales [11].

Las entrevistas realizadas con directivos de RENFE (principal operador nacional de transporte combinado) y de ADIF (administrador de las infraestructuras ferroviarias nacionales) han sido de gran ayuda para conceptualizar y validar el modelo de simulación.

5. ESCENARIO 1: SITUACIÓN INICIAL

En esta sección, se emplea el modelo de simulación para evaluar el rendimiento inicial que presenta la terminal. Los resultados de esta sección serán considerados como punto de partida para comenzar el proceso iterativo de generación y valoración de nuevas alternativas de mejora que se describe en la sección 6.

5.1 ESCENARIO DE DEMANDA

La terminal estudiada intercambia trenes directos con otras seis terminales, que han sido designadas con los índices 1 a 6. Los trenes hacen itinerarios de ida y vuelta entre la terminal estudiada y cualquiera de las otras seis. Los 18 trenes entrantes (E) y los 18 trenes salientes (S) que son atendidos semanalmente aparecen en la Tabla I. Este plan de trenes permanece inalterado durante meses y recoge la hora prevista para la llegada/salida de cada tren y el índice de la terminal origen/destino con la que intercambia contenedores (T=i, i=1,...,6). La longitud de los trenes es fija (24 plataformas de 60 pies) y el número medio de contenedores por tren es 17, siendo el 65% de 40 pies y el 35% restante de 20 pies.

	L	M	X	J	V
6:10	E-2	E-2	E-2	E-2	E-2
6:45	E-3	E-3	E-3	E-3	E-3
7:20	E-6		E-6		E-6
9:19		E-5	E-4	E-5	
15:02		S-1		S-1	
17:44	S-2	S-2	S-2	S-2	S-2
19:05	E-1		E-1		
20:45	S-3	S-3	S-3	S-3	S-3
21:20		S-5	S-4	S-5	
21:45	S-6		S-6		S-6

Tabla I: Plan de trenes

La llegada de camiones es aleatoria. Los camiones a cargar comienzan a llegar durante la descarga del tren, mientras que los camiones a descargar llegan, como máximo, con dos días de antelación respecto a la salida del tren.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se ha simulado la operación de la terminal durante cuatro semanas, con un periodo previo de calentamiento de dos semanas, que permite analizar los resultados en régimen permanente. Como varios de los datos de entrada y parámetros de diseño son variables aleatorias (llegadas de los camiones, tiempo de operación...), se han realizado diez repeticiones. Este número de repeticiones permite alcanzar un error relativo medio inferior al 10% para el conjunto de variables de salida analizadas.

Una vez alcanzado el régimen permanente, la terminal atiende, en media, 1247,90 camiones a cargar, 1197,70 camiones a descargar, 72 trenes entrantes que transportan 17,13 contenedores y 72 trenes salientes que transportan 16,86 contenedores.

La primera columna de la Tabla II muestra un resumen de los principales indicadores de rendimiento de la terminal para este escenario. Cada variable de salida aparece representada por el valor medio de las 10 repeticiones y el ancho del intervalo de confianza al 99.5% (I.C.α=0.005). Este nivel de confianza individual permite alcanzar una confianza global superior al 85% para el conjunto de variables de salida analizadas. En general, los intervalos de confianza son estrechos, lo que permite basar las conclusiones sobre el funcionamiento de la terminal en los valores medios observados.

Los resultados de la primera columna de la Tabla II indican que el tiempo medio de descarga de un tren es 94.87 minutos, lo que deja una ventana temporal media de 643.96

minutos para volver a cargarlo. Esta ventana de carga es suficiente para que todos los trenes salgan de la terminal sin retrasos. La primera columna de la Tabla II también indica que, en media, el 97,33% de los camiones son atendidos en menos de 20 minutos, siendo 17,41 minutos el tiempo medio de estancia para los camiones a cargar y 11,22 minutos el tiempo medio para los camiones a descargar.

Este buen nivel de servicio se debe principalmente a la existencia de recursos ociosos. La primera columna de la Tabla II muestra que el porcentaje de utilización de la grúa móvil que trabaja a dos turnos (grúa móvil1) está en torno al 34% de su tiempo disponible, mientras que el porcentaje de utilización de la grúa móvil que trabaja a un turno (grúa móvil2) es aproximadamente del 38%. El uso de ambas grúas pórtico y del tractor de maniobras es incluso menor, representando el 20,13%, el 20,19% y el 1,75% de su tiempo disponible.

La primera columna de la Tabla II muestra resultados similares para las infraestructuras de la terminal. El uso de las vías de entrada/salida y de recepción/expedición está, en media, en torno al 3%, las vías de carga/descarga se utilizan el 23,86% y la playa de almacenamiento de contenedores llega a ocuparse hasta el 12,24% de su capacidad máxima. Únicamente el 4,38% de los contenedores manipulados esperan en la playa de almacenamiento. El resto lo hacen cerca de las vías, de tal forma que las líneas de almacenamiento llegan a ocuparse hasta el 89,38% de su capacidad máxima. Este nivel de ocupación superior al resto de elementos se debe fundamentalmente a su uso prioritario para desacoplar los procesos de carga/descarga y a que el intercambio directo de contenedores entre modos sólo representa el 1,27% del total. Al igual que ocurre con las líneas de almacenamiento, la puerta de entada/salida de camiones también alcanza una ocupación muy superior al resto de elementos (83,16%).

Aunque la imagen general de la terminal muestra una clara disponibilidad de recursos en valores medios, la simulación revela la aparición de cuellos de botella puntuales que colapsan la puerta entrada/salida. Por ejemplo, el flujo de camiones es tan elevado a primera hora de la mañana y a última hora de la tarde que una media de 8,10 camiones llegan a esperar fuera de la terminal. La primera columna de la Tabla II muestra que, en media, un 30,12% de los camiones atendidos esperan 2,79 minutos antes de entrar en la terminal, mientras que un 22,70% esperan 3,76 minutos en el área de aparcamiento, antes de salir.

5.3 CONCLUSIONES DEL ESCENARIO

En general, los indicadores utilizados para medir el rendimiento de la terminal revelan un alto nivel de adherencia respecto al plan de trenes, así como tiempos aceptables de estancia para los camiones a cargar/descargar. Este buen nivel de servicio se debe principalmente a la gran cantidad de recursos e infraestructuras disponibles en relación a la carga de trabajo real. Sin embargo, a pesar de existir recursos

Indicador de rendimiento	Esc1. I.C.99.5%	Esc2 – Esc1. I.C.t-p.99.5%	Esc3 – Esc1. I.C.t-p.99.5%
T. medio descarga tren	94.87 ± 4.38	42.83 ± 9.97	42.88 ± 9.95
T. medio carga tren	643.96 ± 4.62	-42.83 ± 9.97	-42.88 ± 9.95
Retraso medio en salida de trenes	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
%camiones servidos en menos de 20min	97.33 ± 2.22	-1.75 ± 1.19	2.16 ± 2.05
T. medio estancia camiones cargar	17.41± 0.73	1.65 ± 0.48	-2.43 ± 0.67
T. medio estancia camiones descargar	11.22 ± 0.47	0.33 ± 0.24	-1.82 ± 0.43
Uso grúa móvil1	34.48 ± 0.88	12.94 ± 0.44	12.92 ± 0.45
Uso grúa móvil2	37.61 ± 1.60	-----	-----
Uso grúa pórtico1	20.13 ± 0.84	6.89 ± 0.42	6.86 ± 0.43
Uso grúa pórtico2	20.19 ± 0.68	6.45 ± 1.23	6.51 ± 1.19
Uso tractor maniobras	1.75 ± 0.05	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
Uso vía entrada/salida	2.81 ± 0.06	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
Uso vías recepción/expedición	3.05 ± 0.05	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
Uso vías carga/descargar	23.86 ± 0.24	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
Uso playa almacenamiento	12.24 ± 2.28	-0.60 ± 1.13	-0.60 ± 1.13
Uso líneas almacenamiento	89.38 ± 1.65	0.95 ± 1.74	0.95 ± 1.74
Uso puerta entrada/salida	83.16 ± 0.47	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
%camiones que espera antes de entrar	30.12 ± 1.52	0.29 ± 0.68	-8.35 ± 0.90
T. medio espera antes de entrar	2.79 ± 0.21	0.04 ± 0.11	-0.89 ±0.12
%camiones que espera antes de salir	22.70 ± 0.81	-0.25 ± 1.12	-18.86 ± 1.25
T. medio espera antes de salir	3.76 ± 0.09	-0.07 ± 0.13	-2.92 ± 0.11

Tabla II: Indicadores de rendimiento (tiempos en minutos y uso de recursos e infraestructuras en porcentaje)

e infraestructuras ociosas, aparecen momentos puntuales donde la puerta de entrada/salida se satura. Estos cuellos de botella afectan principalmente al nivel de servicio de los camiones.

6. PROCESO ITERATIVO DE AJUSTE DE RECURSOS

A la vista de los resultados de la simulación inicial y teniendo en cuenta el conocimiento ganado sobre el funcionamiento del sistema en la etapa de formalización del modelo, se han propuesto dos alternativas de mejora para ajustar los recursos de la terminal a la carga de trabajo existente. Estas alternativas se implementarán y valorarán de forma incremental. En primer lugar, se reducirán los recursos ociosos, ajustando los turnos de trabajo de las grúas móviles y pórtico a la demanda (escenario2). A continuación, se reducirán los cuellos de botella, asignando los operarios de grúa sobrantes a la puerta de entrada/salida de camiones (escenario3).

En esta sección, se han empleado intervalos de confianza t-pareados al 99,5% (I.C.t-p.99.5%) para comparar los valores medios de la situación inicial (escenario1) con los resultados de los escenarios 2 y 3 [12].

6.1 ESCENARIO 2: REDUCCIÓN DE TURNOS DE TRABAJO DE LAS GRUAS

Para ajustar la disponibilidad de los recursos a la demanda y, con ello, ahorrar costes, se ha eliminado el turno de 7:00 a 14:00 para una de las grúas móviles y el turno de 14:00 a 21:00 para una de las grúas pórtico. De esta forma, la terminal posee una grúa móvil y una grúa pórtico que trabajan de 7:00 a 21:00 y una grúa pórtico que trabaja de 7:00 a 14:00.

La simulación del escenario2 y su comparación con el escenario1 muestran que:

- Al eliminar un turno de trabajo para una grúa pórtico, el tiempo medio destinado a la descarga de un tren aumenta, en media, 42,83 minutos, acortando la ventana temporal destinada a su carga en la misma cantidad (véase la segunda columna de la Tabla II). Este hecho no afecta a la salida de los trenes, al no producirse retrasos.
- El nivel de servicio de los camiones empeora ligeramente. Según la segunda columna de la Tabla II, el número de camiones atendidos en menos de 20 minutos disminuye, en media, un 1,75%; mientras que el tiempo medio de estancia aumenta en 1,65 minutos para los camiones a cargar y 0,33 minutos para los camiones a descargar.
- Este empeoramiento en el nivel de servicio de los camiones se debe a que el uso medio de las grúas es algo superior a lo observado en el escenario1. En el escenario2, la grúa móvil se usa un 12,94% más, mientras que las grúas pórtico que trabajan a uno y dos turnos se utilizan, respectivamente, un 6,89% y un 6,45% más (véase la segunda columna de la Tabla II).
- El uso del tractor de maniobras y del resto de infraestructuras no presenta variaciones significativas, en media, respecto a lo observado en el escenario1, al estar el cero presente en los intervalos de confianza t-pareados recogidos en la segunda columna de la Tabla II.
- La segunda columna de la Tabla II muestra que el cero también está presente en todos los intervalos de confianza utilizados para comparar los cuellos de botella que afectan a la entrada/salida de camiones. Este hecho impide determinar qué escenario proporciona mejores resultados, al existir ambigüedad en las comparaciones.

En resumen, el escenario2 presenta resultados similares al escenario1: buen nivel de servicio medio con exceso de recursos e infraestructuras y cuellos de botella puntuales en la puerta de entrada/salida que afectan a la atención de los camiones. La principal diferencia entre ambos escenarios radica en que, en el escenario2, el tiempo medio de estancia de los camiones empeora en 1,65 minutos para los camiones a cargar y 0,33 minutos para los camiones a descargar, al haber reducido la disponibilidad de las grúas móviles y pórtico.

6.2 ESCENARIO 3: REDUCCIÓN DE TURNOS DE TRABAJO DE LAS GRUAS Y AMPLIACIÓN DE PERSONAL EN LA PUERTA DE ENTRADA/SALIDA DE CAMIONES

Esta alternativa de mejora evalúa la asignación de los dos operarios de grúa que quedaron ociosos en el escenario2 a la puerta de la entrada/salida de camiones, con el objetivo de reducir su saturación. De esta forma, la puerta trabaja de lunes a viernes de 7:30 a 19:30 con dos operarios por turno. Un operario se ocupa de la entrada de camiones, mientras que el otro se encarga de su salida.

La simulación del escenario3 y su comparación con el escenario1 muestran que:

- No existen retrasos en la salida de los trenes, a pesar de que la ventana temporal destinada a su carga disminuye, en media, 42.88 minutos respecto a lo observado en el escenario1 (véase la tercera columna de la Tabla II).
- Al haber reducido la saturación de la puerta de entrada/salida, el número de camiones atendidos en menos de 20 minutos aumenta, en media, un 2,16% respecto a lo observado en el escenario1; mientras que los tiempos medios de estancia para los camiones mejoran en 2,43 minutos para los camiones a cargar y 1,82 minutos para los camiones a descargar (véase la tercera columna de la Tabla II).
- El porcentaje medio de utilización de la puerta de entrada/salida sigue siendo del 83,16%. La principal diferencia entre escenarios radica en que la puerta atiende simultáneamente a un camión que entra y a otro que sale en 2208.00 ocasiones en el escenario3.
- El uso medio de los restantes recursos e infraestructuras no presenta variaciones significativas respecto a lo expuesto en el escenario2.

- La tercera columna de la Tabla II muestra mejoras relativas a los cuellos de botella identificados en el escenario1. En el escenario3, el porcentaje medio de camiones que esperan antes de entrar en la terminal disminuye, en media, un 8,35% y su tiempo medio de espera desciende en 0,89 minutos. La tercera columna de la Tabla II también indica una reducción media del 18,86% para el porcentaje de camiones que esperan dentro de la terminal antes de salir y de 2,92 minutos para su tiempo medio de espera.

En resumen, el escenario3 muestra una disponibilidad de las grúas y de la puerta de entrada/salida más ajustada a la demanda real, habiendo reducido parte de los cuellos de botella que aparecían en el escenario1. La disminución de estas ineficiencias mejora el nivel de servicio proporcionado a los camiones.

La simulación también revela que la operación de la terminal todavía puede mejorar. En el escenario3, siguen existiendo momentos puntuales donde la puerta de entrada/salida se satura. Para mejorar este aspecto, podría crearse un sistema de citas para los camiones, de tal forma que los camiones puedan reservar una franja horaria para ser atendidos y los gestores de la terminal puedan consultar la carga de trabajo existente para planificar, por ejemplo, el número de grúas y de turnos de trabajo a utilizar.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La simulación es una potente herramienta de análisis para la mejora de sistemas logísticos complejos, como son las terminales de transporte combinando. En estos estudios normalmente el foco se dirige a los resultados, sin tener en cuenta la enorme cantidad de información que contiene el modelo de simulación sobre las relaciones causales internas del sistema. En este trabajo, se propone redirigir la atención hacia esta faceta del modelo para explotarla en el diseño de nuevas configuraciones, que mejoren el funcionamiento del sistema.

Para ejemplificar esta teoría, no referida con anterioridad en la literatura para el estudio y mejora de terminales de transporte combinado, hemos creado un modelo de simulación de una terminal concreta.

Una vez implementado el escenario inicial de funcionamiento de la terminal, se han obtenido y analizado los resultados de funcionamiento. Estos resultados muestran un buen nivel de servicio medio, con recursos e infraestructuras ociosas y cuellos de botella puntuales donde la puerta de entrada/salida de camiones se satura. A la vista de estos resultados y teniendo en cuenta el conocimiento ganado del funcionamiento del sistema en la etapa de formalización del modelo, se han propuestos dos alternativas de mejora. En primer lugar, ajustar los turnos de trabajo de las grúas móviles y pórtico a la demanda real, para reducir costes, y después, asignar los operarios de grúa sobrantes a la puerta de entrada/salida de camiones, para reducir su saturación. Los resultados de la simulación revelan que los cambios implementados mejoran la operación de la terminal, aunque ésta todavía puede mejorar más.

Los trabajos futuros seguirán centrados en la simulación con un doble objetivo. Por un lado, seguir analizando nuevas propuestas de mejora para la terminal considerada como objeto de estudio y por otro lado, aplicar este proceso iterativo de mejora a otros sistemas, ya sean terminales individuales o redes de transporte combinado.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es fruto de la participación de los autores en un proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional de Investigación español, referencia DPI2008-04872.

Las autoras desean agradecer a los directivos de Servicios Logísticos de ADIF (administrador de infraestructuras ferroviarias españolas) la inestimable colaboración y asesoramiento que han prestado para este trabajo.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] European Commission. White paper - 'European transport policy for 2010: time to decide'. Luxemburg: 2001. 119p. ISBN: 92-894-0341-1.
[2] Marco Polo Programme. <http://ec.europa.eu/transport/marcopolo/> [23 April 2012].
[3] Caris A, Macharis C, Janssens G. "Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects". Transportation Planning and Technology. June 2008. Vol.31-3 p.277-302. DOI:10.1080/03081060802086397.
[4] Angeloudis P, Bell MGH. "A review of container terminal simulation models". Maritime Policy and Management. September 2011. Vol.38-5 p.523-540. DOI:10.1080/03088839.2011.597448.
[5] Corry P, Kozan E. "An assignment model for dynamic load planning of intermodal trains". Computers and Operations Research. January 2006. Vol.33-1 p.1-17. DOI:10.1016/j.cor.2004.05.013.
[6] Grunow M, Günther HO, Lehmann M. "Strategies for dispatching AGVs at automated seaport container terminals". OR Spectrum. October 2006. Vol.28-4 p.587-610. DOI: 10.1007/s00291-006-0054-3.
[7] Bugaric U, Petrovic D. "Increasing the capacity of terminal for bulk cargo unloading". Simulation Modelling Practice and Theory. November 2007. Vol.15-10 p.1366-1381. DOI:10.1016/j.simpat.2007.09.006.
[8] Vis IFA, van Anholt RG. "Performance analysis of berth configurations at container terminals". OR Spectrum. July 2010. Vol.32-3 p.453-476. DOI:10.1007/s00291-010-0201-8.
[9] Lee BK, Jung BJ, Kim KH, et al. "A simulation study for designing a rail terminal in a container port". Proceedings of the Winter Simulation Conference WSC 2006, (Monterey, CA, USA, 3-6 December 2006), 2006. p.1388-1397. ISBN 1-4244-0501-7.
[10] Ambrosino D, Tànfani E. "A discrete event simulation model for the analysis of critical factors in the expansion plan of a marine container terminal". Proceedings of the 23rd European Conference on Modelling and Simulation (Madrid, España, 9-12 July 2009), 2009. p.288-294. ISBN 978- 0-9553018-8-9.
[11] Ballis A, Golias J. "Comparative evaluation of existing and innovative rail–road freight transport terminals". Transportation Research, Part A (Police and Practice). August 2002. Vol.36-7 p.593-611. DOI:10.1016/S0965-8564(01)00024-6.
[12] Law AM, Kelton WD. Simulation modeling and analysis. 3rd edition. Nueva York: McGraw-Hill, 2000. 760p. ISBN: 0070592926.