

Estudio del Modo de Operación de un Puente Grúa para el Intercambio de Contenedores entre Trenes Mediante una Herramienta de Simulación

Fernando Marín¹, Alberto Ortiz², Isabel García³

¹ Doctor Ingeniero Industrial, ETSI Industriales de Madrid (UPM), fmarin@ingor.upm.es

² Ingeniero Industrial, ETSI Industriales de Madrid (UPM), aooliveira@yahoo.es

³ Doctora Ingeniera Industrial EPS (UCIII de Madrid), igarcia@ing.uc3m.es

RESUMEN

El intercambio de contenedores entre trenes resulta una operación que puede incidir, de forma determinante, en el funcionamiento de algunos nodos de las redes de transporte combinado. Por ejemplo, cuando dicho intercambio es ineludible debido a la diferencia del ancho de vía entre dos redes de transporte combinado contiguas. Esta situación es aún más crítica en aquellos casos en que las posibles ampliaciones de infraestructura son inviables debido a la localización de la estación. Así ocurre en el caso de Port Bou, situada en la frontera franco española, donde además del problema de la diferencia de ancho de vía entre la red española y la europea, que obliga a la transferencia de la carga entre trenes, existe una limitación de la capacidad de la terminal debido al túnel que une las dos redes y a la falta de espacio por condicionantes orográficos. Tales aspectos, unidos a la demanda creciente de transporte de mercancías, hacen que el modo de operación de la grúa que intercambia contenedores sea un factor decisivo para el buen funcionamiento de la estación. En este artículo se analizan distintos modos de operación de un puente grúa que intercambia contenedores entre trenes situados en vías paralelas. Para ello, se utiliza un modelo de simulación con la intención de evaluar los modos de operación en distintos escenarios. De esta forma, se pretenden establecer tanto los elementos críticos de estos sistemas de intercambio, como los procedimientos de operación más adecuados en cada caso.

1. Introducción.

El transporte de mercancías ha alcanzado un importante crecimiento en las últimas décadas. Es indudable la relación existente entre el desarrollo económico y el incremento de los flujos de mercancías, de cuyas perspectivas de crecimiento para la década actual se deriva la necesidad de casi triplicar el volumen de transporte de mercancías en un futuro próximo. Este hecho obliga a buscar alternativas al transporte por carretera, de modo que se disminuyan los efectos de la congestión del tráfico, la agresión medioambiental y la siniestralidad.

Entre las distintas alternativas propuestas debe considerarse el mayor uso del ferrocarril y, más concretamente, del transporte combinado, que consiste en el traslado de contenedores por diversos medios como el ferrocarril, el barco o el camión, aprovechando las ventajas de cada uno de ellos. Así, la combinación del transporte ferroviario y carretera ofrece la economía del ferrocarril en la larga distancia y la flexibilidad de la carretera en las entregas.

Como señalan diversos autores (véanse [1] y [2]), un aspecto clave de la operación del transporte combinado son los intercambios de carga que se producen en los distintos nodos de la red. Para que el transporte combinado se consolide como una alternativa al transporte realizado únicamente por carretera, es necesario prestar atención especial a la forma en que se realizan dichos intercambios, sobre todo cuando suponen una actividad diaria e inevitable, como ocurre en el caso de estaciones que unen redes ferroviarias con anchos de vía distintos y,

por tanto, los contenedores de un tren deben pasarse a otro con el ancho de vía adecuado para poder pasar la mercancía de una red a otra.

En el caso del transporte combinado, cuya característica principal es el uso de contenedores que viajan en distintos medios de transporte, las lentas y complejas manipulaciones de cargas se sustituyen por movimientos de contenedores mediante grúas instaladas en pórticos. Esta complejidad ha dado lugar al desarrollo de modelos de simulación como vía de análisis y mejora de las operaciones. Los modelos que se pueden encontrar en la literatura tratan diversos aspectos, por ejemplo, [3] y [4] realizan análisis de la capacidad de terminales de transporte combinado desde un punto de vista general, mientras que [5] se centra en la mejora de la eficiencia del personal que opera la terminal.

El estudio que se resume en este artículo se ha enfocado en el análisis de los distintos modos de operación de un puente grúa durante el intercambio de contenedores entre dos trenes. Para realizar la investigación se ha desarrollado un modelo de simulación que permite valorar la bondad de varios procedimientos para el intercambio de contenedores, así como la influencia de diversos factores críticos sobre cada uno de ellos. El modelo construido está basado en datos obtenidos de la estación de Port Bou, representativo de la problemática que se pretende analizar, ya que en dicha estación, además de darse el problema de la diferencia de ancho de vía entre la red española y la del resto de Europa, existen limitaciones orográficas que no permiten ampliar la capacidad de las infraestructuras.

2. Recopilación de datos para la construcción del modelo de simulación.

A partir de los datos obtenidos para la estación de Port Bou en el proyecto SIMET (Smart Intermodal European Transfer) de la DG VII de la Unión Europea, se observa que dicha estación es un claro ejemplo de la problemática que trata este estudio. “La plataforma terminal de Port Bou está situada entre las montañas, la ciudad y el mar. El área de intercambio, que fue establecida de manera ambiciosa cuando se creó la terminal, resulta ahora insuficiente. Las soluciones de mejora requerirían importantes inversiones, equipamiento y obra civil que no parecen posibles a medio plazo” [6]. Debido a ello, en la actualidad las mejoras deben centrarse en los modos de operación.

Según se ha mencionado, el principal problema de la estación es la falta de espacio, pero hay otros factores que asimismo limitan la falta de capacidad, como son: la escasez de vías de intercambio, la longitud del túnel ciego de maniobras (que es insuficiente, por lo que muchas maniobras se realizan en el túnel de transporte), la coexistencia del tráfico de mercancías y el de pasajeros, etc.

La diferencia entre el ancho de vía español (1,674 m) y el de gran parte del resto de Europa (1,435 m) obliga a realizar operaciones de transferencia de carga en la frontera franco-española. En la actualidad se salva esta dificultad de dos maneras: bien se cambia el ancho de los ejes de los vehículos, o bien se transfiere la carga entre dos trenes de ancho de eje diferente. Este estudio se centra en esta segunda opción.

2.1 Disposición de las instalaciones para el intercambio de contenedores.

Un aspecto a tener en cuenta en Port Bou es que, debido a la falta de espacio, no dispone de un área de almacenamiento de contenedores, por lo que los intercambios de carga deben realizarse entre dos trenes, en la *zona de intercambio* de contenedores.

La zona de intercambio dispone de dos puentes grúa, colocados cada uno de ellos sobre un grupo de cuatro vías, dos de cada ancho, que se denominan sector B y sector C, respectivamente. En el sector B la capacidad de las vías bajo el puente es de 14 vagones (280 m); en el sector C es de 17 (340 m). Esta disposición es la que se representa en el modelo de simulación: ocho vías de intercambio, divididas en dos grupos de cuatro, a los que se asigna un puente grúa.

2.2 Llegada y composición de trenes. Clases de vagones y contenedores.

Los trenes que llegan a Port Bou, ya sea desde España o desde la red europea, pueden ser: multicliente (que transportan contenedores de clientes diferentes con distintos destinos) o de cliente único (con precios y horarios convenidos, como ocurre en el caso del transporte entre distintas plantas de la industria de automoción). En cualquiera de los dos casos, la actividad que se lleva a cabo en Port Bou es el transbordo de contenedores entre trenes de distinto ancho de ejes, no realizándose otras operaciones de clasificación de cargas o de consolidación para salidas por carretera.

Los trenes que llegan a la terminal llevan diferente número de vagones y de contenedores. A su vez, los contenedores se agrupan de distintas formas en cada vagón. Las distintas clases de contenedores están en función de las necesidades de las empresas propietarias de las mercancías, así como de los operadores logísticos. Los contenedores están normalizados según sus medidas exteriores. En este estudio sólo se consideran los de 20, 30 y 40 pies de largo, que son los más usuales. Asimismo, los vagones pueden tener distinta longitud de plataforma, siendo las más usadas de 60 y 40 pies. Como hipótesis simplificadora, en este estudio sólo se consideran vagones con plataforma de 60 pies, que es la que permite mayor número de combinaciones entre los contenedores elegidos. También se contempla la posibilidad de que algún vagón esté vacío o parcialmente lleno.

2.3 Proceso de intercambio de contenedores.

Los vagones llevan en la periferia de la plataforma una serie de pivotes colocados en distintas posiciones para que los contenedores queden ajustados. Los pivotes pueden desplazarse, o son retráctiles, de modo que se adapten a los distintos tamaños de contenedor. El ajuste de los pivotes es una operación manual muy sencilla de la que se encarga un equipo de trabajadores, y cuya influencia en el modo de operación de la grúa se puede considerar despreciable para el propósito de este estudio.

El elemento principal que interviene en el intercambio es el puente grúa. Su movimiento, tanto longitudinal a lo largo de las vías, como transversal, le permiten un rápido desplazamiento y una gran flexibilidad. A su vez, el mecanismo de enganche le permite coger contenedores de todos los tamaños.

Cuando dos trenes cargados de diferente ancho de vía se sitúan en un sector de intercambio (B o C), se procede a pasar los contenedores de un tren a otro mediante diversos modos de operación que se detallarán posteriormente. Una vez que el intercambio se ha completado, se lleva a cabo la composición de trenes y se acoplan a la locomotora que los ha de transportar a su destino.

3. Modos propuestos para la operación del puente grúa.

Para el análisis de la actividad del puente grúa en el intercambio de carga de un tren a otro se proponen cuatro modos de operación: 1) Paralelo; 2) Zigzag; 3) Paralelo modificado; 4) Con tren descargado.

3.1 Modo paralelo.

En este caso, el intercambio de carga entre dos trenes (X e Y) de diferente ancho de vía comienza en un extremo de los trenes y avanza hacia el otro extremo. El primer paso es el movimiento de la carga de un vagón de X a una posición próxima en el suelo. Se crea así un hueco en dicho vagón que se ocupa con la carga del vagón de Y que está enfrente. Finalmente, la carga que estaba en el suelo se coloca en el hueco que ha quedado en Y. Este proceso se repite en cada par de vagones enfrentados.

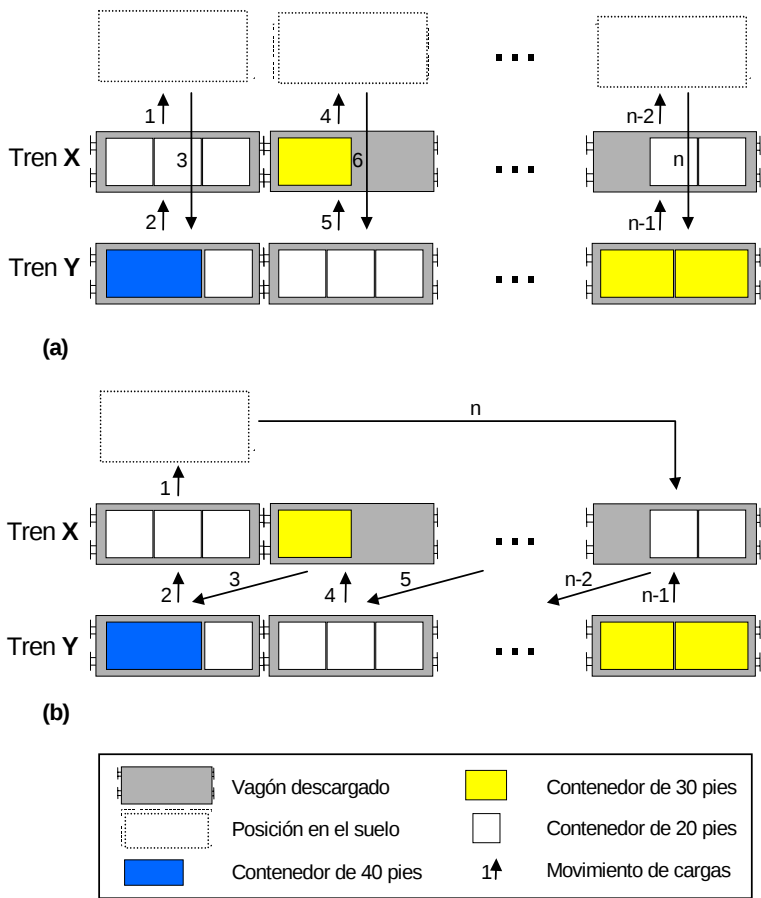


Figura 1: (a) Movimientos en modo paralelo; (b) Movimientos en modo zigzag

3.2 Modo en zigzag.

Como en el caso anterior, la carga de un vagón extremo de X se sitúa en el suelo. A continuación, el espacio vacío dejado en el vagón de X se ocupa por los contenedores de Y. Después, el espacio que ha quedado vacío en Y se llena con los contenedores del siguiente vagón de X directamente, sin haberlos depositado previamente en el suelo. Según se aprecia en la figura, con este procedimiento sólo se baja al suelo la carga del vagón inicial, que está situado en un extremo. De esta manera, desaparecen casi todos los movimientos de contenedores al suelo. Sin embargo, el movimiento longitudinal de la grúa para llevar los contenedores que se dejaron en el suelo hasta el vagón del otro extremo, que es el que queda libre cuando se ha intercambiado la carga del resto de vagones, puede condicionar significativamente el tiempo empleado en la operación.

3.3 Modo paralelo modificado.

Según se ha visto, la ventaja del modo paralelo es la sencillez de los movimientos, pero como principal desventaja se advierte el hecho de que todos los contenedores de un tren se bajan al suelo como paso intermedio antes de introducirlos en los vagones del otro tren. Esto implica un número importante de movimientos poco eficientes del puente grúa, ya que, en muchas ocasiones, es posible alojar algún contenedor directamente en el otro tren sin pasar por el suelo. El modo *paralelo modificado* se basa en el aprovechamiento de los espacios libres que quedan en los vagones, bien porque los trenes que llegan tienen algún hueco libre, o bien porque se pueden utilizar los huecos que van quedando a medida que se mueven los contenedores.

Al igual que en el modo original, el intercambio se inicia en un extremo de los trenes, comenzando con la comparación de espacios libres en un vagón y el tamaño de contenedores cargados en el vagón del otro tren. Si hay suficiente espacio, se realiza el movimiento de intercambio directamente. Sólo en el caso de que no exista tal espacio, o si el que existe no es de suficiente longitud, se procede a bajar al suelo uno de los contenedores.

3.3 Modo a tren descargado.

Para realizar la transferencia de contenedores siguiendo este método se necesita la introducción en la zona de intercambio de un tren descargado completamente. Dicho tren recibirá los contenedores de otro tren de diferente ancho de vía que se sitúa a su lado. El resultado de este proceso es, por una parte, un tren cargado listo para salir y, por otra, que el tren que entró cargado en la zona de intercambio queda ahora descargado en espera para recibir la carga de un tercer tren. El proceso se va repitiendo sucesivamente, quedando en el estado final siempre un tren descargado.

4. Construcción e hipótesis utilizadas en el modelo de simulación.

Para modelizar la zona de intercambio de contenedores, que es una réplica de la que se utiliza en la estación de Port Bou, se ha utilizado el simulador Witness. Dicho simulador tiene varias características que lo hacen adecuado para representar el sistema objeto de estudio. Entre ellas: la flexibilidad para representar situaciones complejas, la facilidad de programación modular y, sobre todo, la integración entre la programación y la visualización de los elementos del sistema, lo que permite que se comprenda con facilidad el funcionamiento del sistema representado.

Entre las hipótesis que se han utilizado, tanto para simplificar la complejidad del sistema real como para acotar los límites del estudio, se pueden destacar las siguientes: el tiempo de ejecución del modelo es de un día, ya que la cantidad de trenes programados en una jornada tiene el suficiente número de intercambios para establecer la bondad de un modo de operación; el modelo se limita a la zona de intercambio, ya que las relaciones con el resto de la estación, que incluirían operaciones previas de composición, división, clasificación de cargas, etc., no afecta de forma significativa al modo de intercambio de carga entre los trenes. Por último, la principal prioridad que se utiliza en el modelo es que los trenes permanezcan el menor tiempo posible en el sistema. Esta prioridad condiciona los procesos de intercambio y permite elegir entre situaciones en las que se presentan varias alternativas.

En el modelo se consideran contenedores de 40, 30 y 20 pies, transportados en vagones con capacidad útil de 60 pies. Las distintas combinaciones de composiciones que se producen con dichos contenedores son lo suficientemente significativas para representar adecuadamente los modos de operación.

5. Evaluación de los modos de operación del puente grúa

Los modos de operación propuestos para el intercambio de contenedores se han analizado en distintos escenarios. Dichos escenarios se han definido atendiendo a una serie de factores de experimentación identificados como críticos para el funcionamiento del puente grúa.

A continuación se presentan dichos factores de experimentación, los indicadores utilizados para medir la bondad de los resultados, los escenarios de experimentación y la discusión de los resultados obtenidos.

5.1. Factores de experimentación

Las características del puente grúa utilizado constituyen uno de los aspectos más influyentes en la eficiencia de las operaciones de intercambio de contenedores. En particular, se han considerado factores clave los tiempos empleados por el puente grúa en sus movimientos básicos (vertical, longitudinal y transversal), que pueden variar dependiendo de las prestaciones ofrecidas por el puente grúa. Los tres parámetros siguientes recogen los valores de dichos tiempos: T_COGER es el tiempo empleado por el puente grúa en descender para posarse sobre un contenedor, anclarlo y elevarlo para ser trasladado. Este tiempo se considera equivalente al empleado en el proceso inverso (depositar un contenedor sobre una superficie). T_LONGIT es el tiempo empleado por el puente grúa en el avance longitudinal de un metro (teniendo en cuenta que la velocidad del puente grúa en esta dirección no es uniforme a este parámetro se le asigna un valor promedio). T_TRANSV es el tiempo empleado por el carro superior del puente grúa en avanzar transversalmente de una vía a la contigua.

Como se mencionó anteriormente, este estudio no pretende restringirse al caso particular de la terminal de Port Bou, sino que se trata de realizar un análisis para detectar pautas generales en la operación de un puente grúa, que permita tomar decisiones en otras terminales de intercambio de contenedores. Por ello, para facilitar la adaptación de los resultados obtenidos en este estudio a terminales con puentes grúa de distintas características, el tiempo total de intercambio de los contenedores no se mide directamente, sino que se obtiene a partir de la expresión (1).

$$tiempo_intercambio = T_COGER \cdot 2 \cdot C_1 + T_LONGIT \cdot C_2 + T_TRANSV \cdot C_3 \quad (1)$$

De este modo, el tiempo de intercambio se expresa en función de los parámetros de tiempo específicos del puente grúa y de variables registradas por el modelo, que son dependientes del modo de operación utilizado, siendo C_1 el número de movimientos verticales, C_2 la distancia recorrida longitudinalmente y C_3 el número de veces que se pasa de una vía a la contigua.

El otro factor que puede influir sobre los modos de operación es la composición de los vagones, es decir, la combinación de contenedores de diversos tamaños que llevan cargados.

5.2 Escenarios de experimentación

Para medir la bondad de los resultados obtenidos en los distintos escenarios es necesario establecer indicadores de medida. Teniendo en cuenta los objetivos del estudio y las características de calidad exigidas por los clientes al transporte combinado se ha considerado que el indicador más adecuado es el tiempo empleado en realizar el intercambio de contenedores entre dos trenes cargados.

Se han creado dos escenarios de experimentación. El objetivo del primer escenario es identificar el modo de operación que proporcionaría mejores resultados si se tendiera a una cierta estandarización del tamaño de los contenedores. Para ello, se generan seis clases de carga que se corresponden con otras tantas composiciones de vagón (por ejemplo, en la clase 1 la composición de la carga, en cada vagón, es tres contenedores de 20 pies). Esta composición se repite en todos los vagones de los dos trenes que intercambian sus cargas. A continuación, para cada clase se ensayan los cuatro modos de operación. El estudio se acompaña de un análisis de sensibilidad de los tiempos de movimiento del puente grúa.

El segundo escenario se utiliza para evaluar los distintos modos de operación suponiendo una composición aleatoria de carga de los vagones. Por tanto, sus características son análogas a las del primer escenario excepto en la composición de los vagones, que varía según una función de probabilidad.

5.3 Discusión de los resultados

En el escenario 1 se han analizado 24 situaciones, resultantes de la combinación de los cuatro modos de operación (paralelo, paralelo modificado, zig-zag y a tren descargado) con las seis clases de composición de carga de los vagones. En cada una de las situaciones analizadas se ha partido de unos valores concretos de los factores de tiempo de operación del puente grúa (vertical, longitudinal, transversal) y, a continuación, dichos factores se han parametrizado de manera independiente para medir la sensibilidad del resultado en términos de tiempo total de intercambio de carga entre dos trenes. Por ejemplo, en la figura 1 se muestra el análisis de sensibilidad para los factores T_{COGER} , T_{LONGIT} y T_{TRANSV} para la clase 2 (un contenedor de 20 y uno de 40 pies en cada vagón). El eje horizontal de ambos gráficos representa la variación porcentual del factor de tiempo y el eje vertical el tiempo de intercambio.

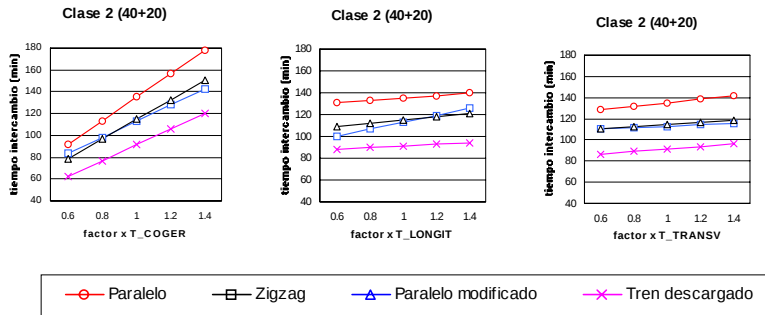


Figura 1: Análisis de sensibilidad para los factores de tiempo del puente grúa (vertical, longitudinal y transversal), en el escenario con clase 2 (contenedores de 40 +20 por vagón)

En primer lugar, es interesante resaltar la importancia relativa del factor de tiempo T_COGER, lo que indica que la mayor parte del tiempo de intercambio se emplea en los movimientos verticales.

En cuanto a los resultados proporcionados por los distintos modos de operación, en general se observa que el modo a tren descargado presenta los mejores resultados, independientemente de los factores de tiempo del puente grúa. Por otra parte, el modo de operación paralelo suele proporcionar los peores resultados. Entre ambos, los modos zigzag y paralelo modificado muestran resultados bastante similares con ligera ventaja de uno u otro según las composiciones y los parámetros de velocidad del puente grúa. Para determinadas composiciones se producen excepciones a esta regla general. Por ejemplo, en la clase 5 (20+20), el modo paralelo modificado supera a todos los demás.

En el segundo escenario, con composición de los trenes aleatoria, se han obtenido unas conclusiones similares a las conclusiones generales del escenario 1. El modo paralelo resulta ser peor que los demás en todas las circunstancias, mientras que el modo a tren descargado es el mejor en todos los casos.

6. Conclusiones

Un aspecto clave para el funcionamiento de las redes transporte combinado es el intercambio de carga en distintos nodos de la red. En muchas ocasiones, dicho intercambio está muy condicionado por el modo de operación del puente grúa que traslada la carga entre los trenes.

En este artículo se han analizado cuatro modos de intercambio de cargas entre dos trenes utilizando una herramienta de simulación. Los experimentos realizados muestran algunos factores críticos en la operación del puente, de forma que este estudio sirva para enfocar otros similares que se efectúen en aquellas estaciones donde existan puentes grúa para el intercambio de carga.

Asimismo, con los datos concretos de la zona de intercambio de carga de la estación de Port Bou se puede observar que, en general, el método que se ha denominado *a tren descargado* es el que presenta los mejores resultados. Sin embargo, las composiciones de los vagones y los parámetros de velocidad del puente grúa determinan, en ocasiones, el método que se debe emplear. En esta investigación se ha efectuado un primer análisis en distintos escenarios de composición de cargas. El estudio de otros factores y escenarios que también puedan influir

en el modo de operación (distintas programaciones de trenes, simulación de varios días de operación, etc.) se propone para futuros desarrollos.

Referencias

- [1] Dong, Y., (1997) “Modeling Rail Freight Operations Under Different Operating Strategies”, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering. Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [2] Ferreira, L. y Sigut, J., (1995) “Modelling intermodal freight terminal operations”, Road and Transportation Research, Vol.4, N°4, pp: 4-16.
- [3] Sarosky, T. y Wilcox, T., (1994) “Simulation of a railroad intermodal terminal”, Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, pp: 1233-1238.
- [4] Weigel, M.L., (1994) “A railroad intermodal capacity model”, Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, pp: 1229-1232.
- [5] Kulick, B.C. y Sawyer, J.T., (2001) “The use of simulation to calculate the labor requirements in an intermodal rail terminal” Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, pp: 9-12.
- [6] SIMET Project, (1994) “Technical and economic study to improve Port Bou terminal and of the possible creation of a new terminal”.