

PRODUCTIVIDADES DE MUELLE MARGINAL V/S MUELLE DE PENETRACIÓN. GENERACIÓN DE ELEMENTOS DE JUICIO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

JAIME SERRANO CARVAJAL¹

JAVIER ITRIAGO²

RICARDO GHIORZI CARCEY³

RESUMEN

De manera de comparar en términos operativos alternativas de muelle marginal v/s muelle de penetración, en un caso particular de estudio, se efectuó una serie de simulaciones de la operación portuaria para verificar los niveles de productividad de la transferencia de contenedores en ambos tipos de instalación, mediante la utilización de grúas móviles de muelle.

El modelo de simulación utilizado es del tipo eventos discretos, con el cual se modeló el ciclo de carga/descarga de los camiones movilizandolos contenedores desde el patio de almacenamiento hasta el costado de la nave en muelle, en una operación de embarque, retornando al patio de almacenamiento. Las alternativas estudiadas son las de un muelle marginal, ubicado aproximadamente a unos 60 [m] del centroide del área de acopio de contenedores, y la de un muelle de penetración, ubicado a unos 280 [m] (incluyendo el puente de acceso) del centroide de la referida área de acopio.

El objetivo de las simulaciones es comprobar las diferencias en las productividades del ciclo de embarque de contenedores, utilizando grúas móviles y camiones que sirven a estas grúas durante la transferencia de carga, al optar por una opción o la otra. Adicionalmente a la comparación de productividades, se hizo un análisis de sensibilidad a los siguientes parámetros:

- Número de camiones que sirven a una grúa individual
- Tiempos de servicio de los camiones en el patio de contenedores
- Velocidades de traslación
- Tiempos de giro de camiones en el muelle de penetración
- Distancias al centroide del acopio de contenedores

Se analizó además el efecto de llevar a cabo la operación con 1 o 2 grúas móviles por nave, con una mano de trabajo por grúa.

Se concluye que las diferencias entre productividades promedio de la opción de Muelle Marginal v/s Muelle de Penetración, para las condiciones de simulación modeladas, no son relevantes, trabajando ya sea con una o dos grúas móviles.

¹ Ingeniero Civil, IPS Ingenieros Ltda./GSI Ingeniería Ltda.

² Ingeniero Civil MSc – Ports of America

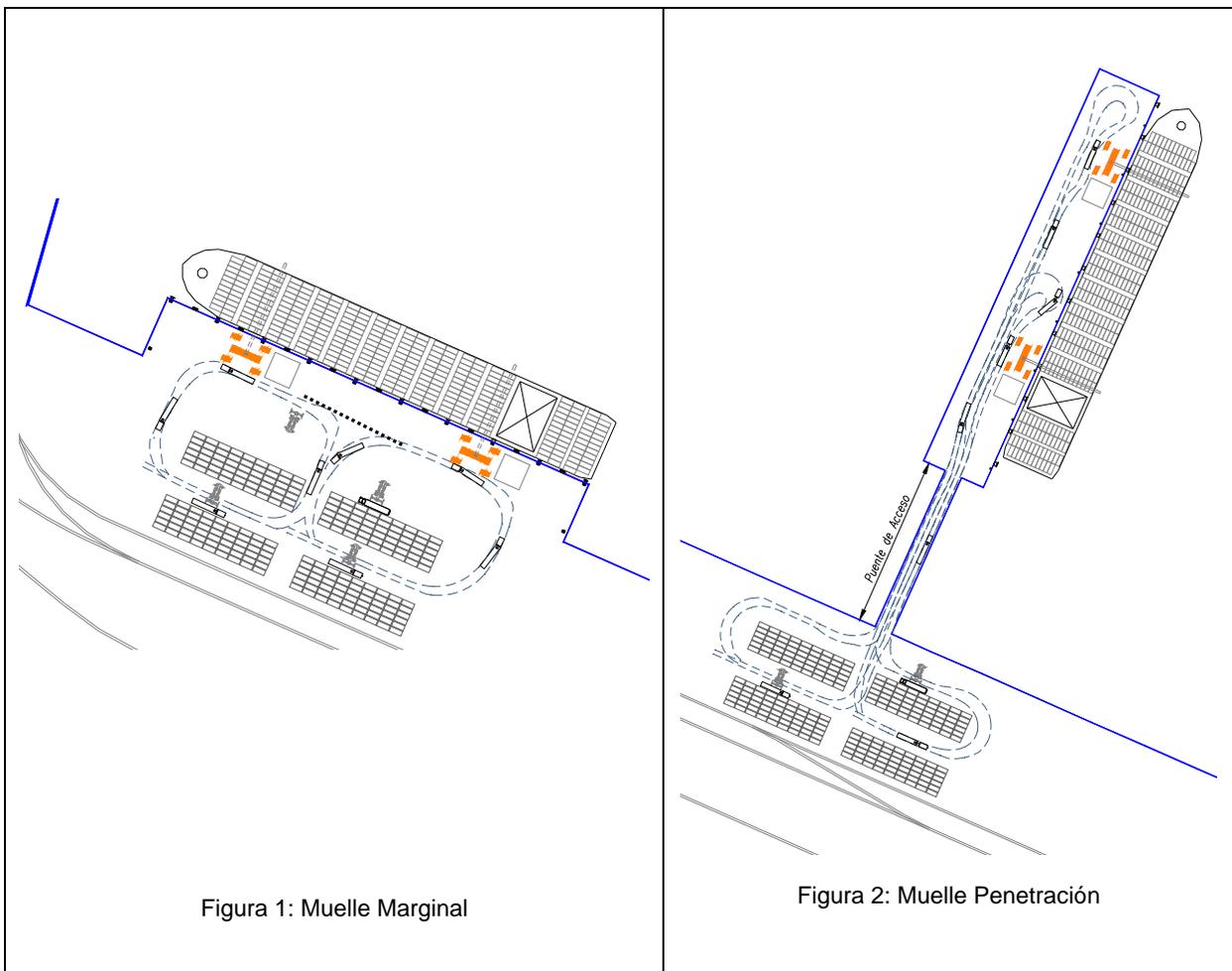
³ Ingeniero en Transporte, IPS Ingenieros Ltda.

INTRODUCCIÓN

De manera de comparar en términos operativos alternativas de muelle marginal v/s muelle de penetración, en un caso particular de estudio, se efectuó una serie de simulaciones de la operación portuaria para verificar los niveles de productividad de la transferencia de contenedores en ambos tipos de instalación, mediante la utilización de grúas móviles de muelle.

El modelo de simulación utilizado es del tipo eventos discretos, con el cual se modeló el ciclo de carga/descarga de los camiones movilizandolos contenedores desde el patio de almacenamiento hasta el costado de la nave en muelle, en una operación de embarque, retornando al patio de almacenamiento. Las alternativas estudiadas son las de un muelle marginal, ubicado aproximadamente a unos 60 [m] del centroide del área de acopio de contenedores, y la de un muelle de penetración, ubicado a unos 280 [m] (incluyendo el puente de acceso, de aproximadamente 100 metros de longitud) del centroide de la referida área de acopio, atendiendo nave por sólo uno de sus costados, sin restricciones para el giro de los camiones. Ver Figuras 1 y 2.

El objetivo de las simulaciones es comprobar las diferencias en las productividades del ciclo de embarque de contenedores, utilizando grúas móviles y camiones que sirven a estas grúas durante la transferencia de carga, asociadas principalmente con las diferentes distancias entre el muelle y el patio de almacenamiento, al optar por una opción o la otra. Adicionalmente se realizaron análisis de sensibilidad para comprobar el efecto de reducir/aumentar el número de camiones que sirven a una grúa individual, el efecto de variar los tiempos de servicio de los camiones en el patio de contenedores, sus velocidades de traslación, los tiempos de giro de camiones en el muelle, y las distancias al centroide del acopio de contenedores.



SIMULACIÓN DE OPERACIONES

El modelo de simulación fue construido mediante la utilización del paquete de simulación ExtendSim, haciendo uso de las herramientas y bloques de eventos discretos provistos en el mismo, simulando el proceso cíclico de embarque de contenedores mediante las tareas que se indican en la siguiente tabla, para cada uno de los tipos de muelles analizados:

Tabla 1: Procesos Simulados

Muelle Marginal	Muelle Penetración
Carguío Contenedor a Camión	Carguío Contenedor a Camión
Asignación Contenedor a Mano de Trabajo	Asignación Contenedor a Mano de Trabajo
Porteo Contenedor a Costado de Nave	Porteo Contenedor a Costado de Nave
Carguío a Nave Mediante Grúa	Carguío a Nave Mediante Grúa
Retorno Camión a Acopio Contenedores	Giro Camión en Muelle
	Retorno Camión a Acopio Contenedores

Los modelos incorporaron las siguientes variables aleatorias:

- Tiempos de servicio para el carguío de los camiones en el patio de almacenamiento
- Tiempos de servicio para la descarga de los camiones bajo la grúa móvil

Los mismos fueron obtenidos de registros estadísticos disponibles para el efecto, ajustando las distribuciones correspondientes. El Gráfico 1 muestra, a modo de ejemplo, la distribución utilizada para representar el tiempo de servicio bajo la grúa, correspondiente a una Pearson tipo 5 de parámetros (0; 13,2; 0,496).

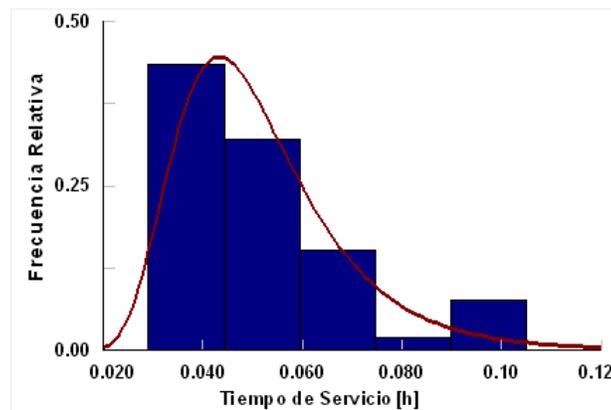


Gráfico 1: Ajuste Distribución Tiempos de Servicio Bajo Grúa

Los parámetros de velocidad de los camiones, sus tiempos de giro y las distancias recorridas fueron consideradas en base a valores medios, pero sensibilizados en cuanto a su efecto en los resultados.

El escenario base de simulación consideró el uso de cuatro camiones para el servicio de una grúa, un tiempo de servicio promedio para la carga a camión en el patio de contenedores de 3 minutos (distribuidos exponencialmente), una velocidad promedio de los camiones circulando entre el muelle y el patio de carga de 20 y 30 [km/h], dependiendo si está cargado o descargado, respectivamente, y una velocidad de giro de 10 [km/h]. El tiempo medio de servicio asociado a las grúas, correspondiente a la distribución mostrada en el Gráfico 1, es del orden de 2,8 minutos por ciclo.

Este escenario base se utilizó para comparar la productividad de una grúa móvil individual tanto para el muelle marginal como para el muelle de penetración. Para obtener resultados relevantes, se hicieron más de cien simulaciones variando la semilla aleatoria, para cada una de las opciones estudiadas, de modo de obtener las estadísticas significativas de los resultados. Se analizó además el efecto de efectuar la operación con 1 o 2 grúas móviles, mostrándose en la Figura 3 la estructura del modelo desarrollado.

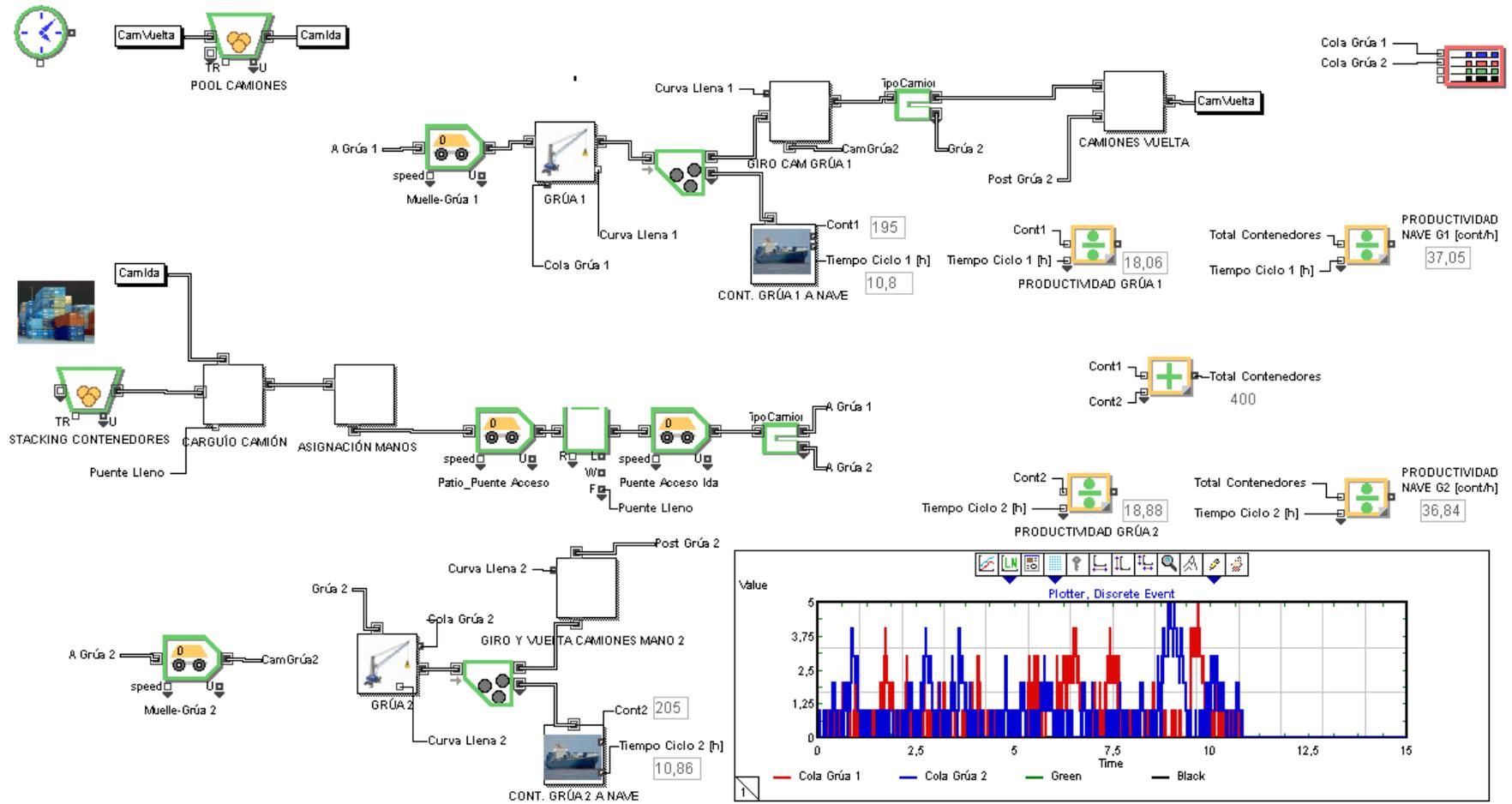


Figura 3: Estructura del Modelo de Simulación Utilizado

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En el caso del muelle marginal, operando con una mano de trabajo, los resultados son los siguientes:

- La productividad promedio de embarque⁴ fue de 18,2 contenedores por hora
- Las productividades mínimas y máximas fueron del orden de 16,5 y 19,9 [cont/h], respectivamente, con la distribución de frecuencias que se presenta en el gráfico siguiente:

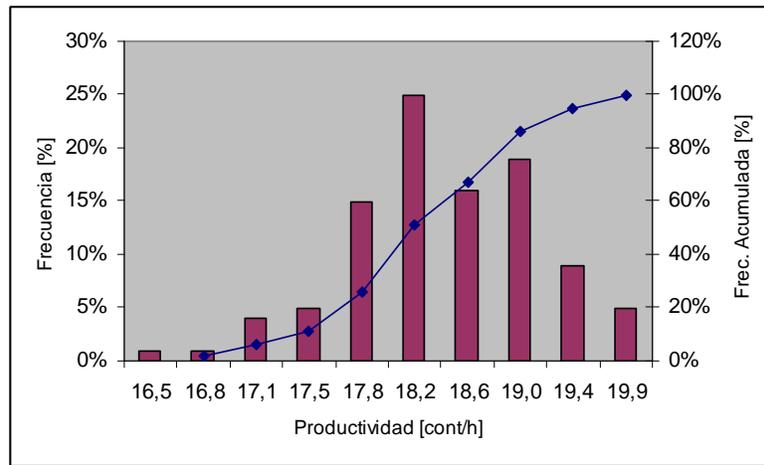


Gráfico 2: Productividad Muelle Marginal

Siendo ambos tipos de muelle en estudio muelles no existentes, no fue posible contar con mediciones de terreno que permitiesen calibrar en forma específica las situaciones modeladas, por lo que para efectos de validación de los resultados obtenidos se recurrió a registros disponibles de cartas de atraque para condiciones similares de muelle marginal, operando con una grúa, en faena mayoritaria de embarque. Los registros disponibles, correspondientes a 13 naves, se entregan en la Tabla 2 siguiente, mostrándose en el Gráfico 3 las distribuciones de frecuencia acumulada correspondientes a la información registrada y a los resultados del modelo, apreciándose una concordancia adecuada para efectos de trabajo, considerando la escasez de información estadística disponible. El valor medio de productividad obtenido de los registros es de 18,3 [cont/hora], también comparable a lo obtenido con la modelación.

Tabla 2: Registros de Naves Disponibles

Productividad Media de Naves[cont/hora]												
16,4	16,9	17,2	17,7	17,8	18,0	18,2	18,5	18,5	18,9	19,0	19,8	20,4

⁴ Calculada en base al tiempo transcurrido entre el carguío a camión en patio del primer contenedor embarcado y el carguío a la nave del último contenedor embarcado.

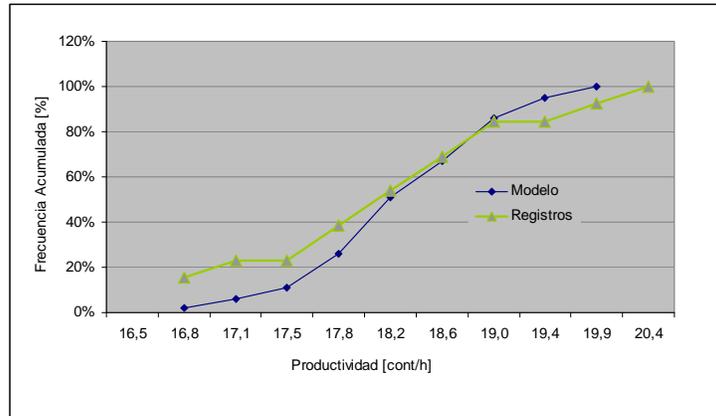


Gráfico 3: Validación de Resultados

En el caso del muelle de penetración, también operando con una mano de trabajo, los resultados son los siguientes:

- La productividad promedio de embarque es de 17,8 contenedores por hora
- Las productividades mínimas y máximas fueron del orden de 16,4 y 19,3 [cont/h], respectivamente, con la distribución de frecuencias que se presenta en el gráfico siguiente:

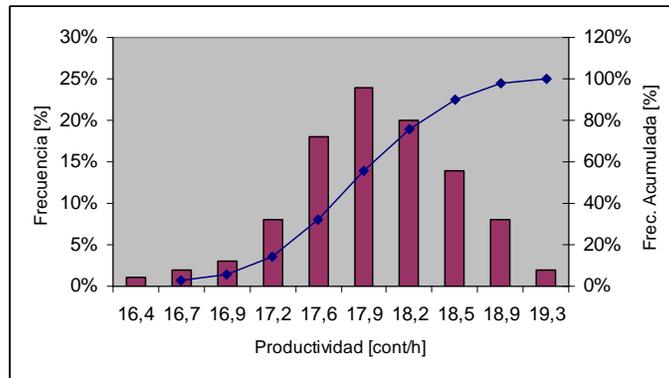


Gráfico 4: Productividad Muelle de Penetración

La diferencia entre las productividades promedio es de solamente un 2,2% a favor del muelle marginal. Comparando los histogramas de frecuencia, se observa que los rangos de productividades más altas tienen mayor frecuencia en la alternativa de muelle marginal (mayor sesgo hacia las altas productividades) que en la alternativa de muelle de penetración, pero siempre dentro de rangos de diferencias poco significativas.

SENSIBILIZACIONES

Adicionalmente a la comparación de alternativas entre muelle marginal y muelle de penetración, se hizo un análisis de sensibilidad a los siguientes parámetros, cuyos resultados se exponen en lo que sigue, operando siempre con una grúa:

- Número de camiones que sirven a una grúa individual
- Tiempos de servicio de los camiones en el patio de contenedores
- Velocidades de traslación
- Velocidad de giro de camiones en el muelle
- Distancias al centroide del acopio de contenedores

Número de Camiones

La Tabla 3 y el Gráfico 5 siguientes resumen los resultados del efecto de variar el número de camiones que sirve a la grúa móvil:

Tabla 3: Resultados Sensibilización N° Camiones por Grúa

Número Camiones	Productividad Media [cont/h]		Tiempo Medio Espera Camiones Bajo Grúa [min]		Long. Cola Máxima [N° Cam]	
	Marginal	Penetración	Marginal	Penetración	Marginal	Penetración
2	15,1	13,3	0,8	0,4	1	1
4	18,2	17,8	2,3	1,9	3	3
6	19,2	19,0	4,1	4,5	5	5
8	19,5	19,3	6,0	5,7	7	7
10	19,5	19,5	6,7	6,5	9	9

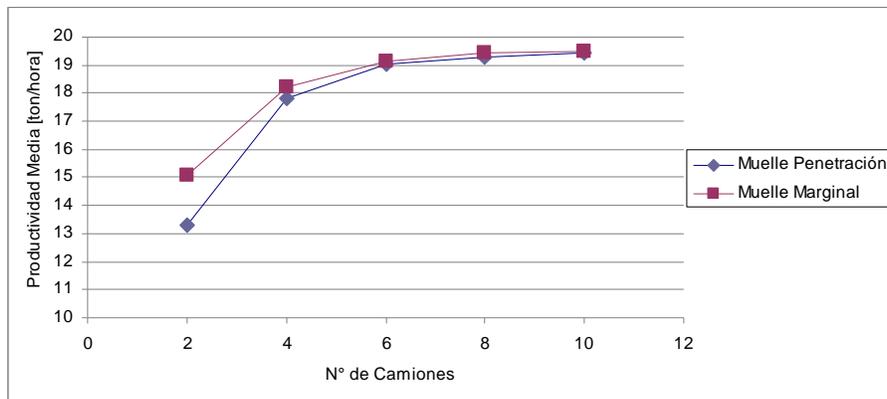


Gráfico 5: Sensibilización N° Camiones por Grúa

Se observa en general que al aumentar el número de camiones dedicados, se produce un incremento efectivo en la productividad media del sistema, pero a una tasa decreciente, mientras que los tiempos promedios de espera de los camiones, y la longitud de la cola, aumentan. Se nota en este caso, como actúa la ley de los rendimientos decrecientes.

Comparativamente, se observa que las productividades entre el Muelle Marginal y el de Penetración tienden a igualarse a medida que aumenta el número de camiones y que los tiempos medios de espera, aún cuando muy similares entre sí, son un poco mayores en el caso del Muelle Marginal, debido a la menor distancia que en promedio recorren los camiones en esta situación. No se aprecia efecto sobre las longitudes máximas de cola esperables, mostrándose en Gráficos 6 y 7, las variaciones de las mismas en el tiempo de embarque, para los dos tipos de muelle analizados, en el caso base simulado (4 camiones por grúa). En estos gráficos, el eje de Abcisas corresponde al tiempo de simulación, en horas, en tanto que el de Ordenadas al número de camiones bajo la grúa en cada instante, en una escala de 0 a 4.

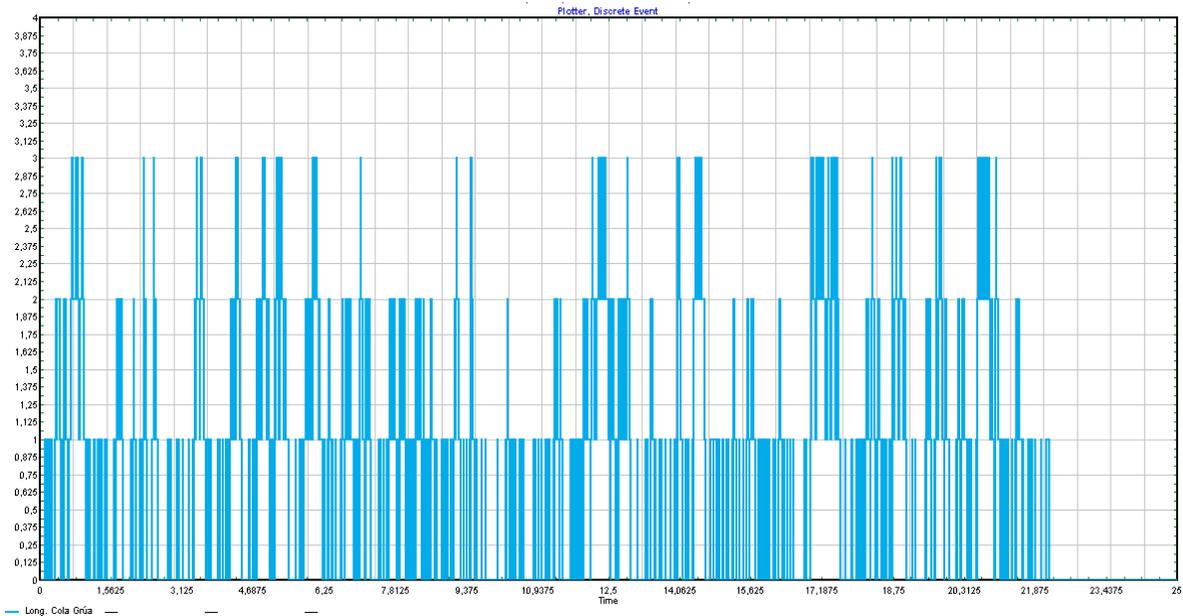


Gráfico 6: Evolución Cola Camiones Bajo Grúa – Muelle Marginal

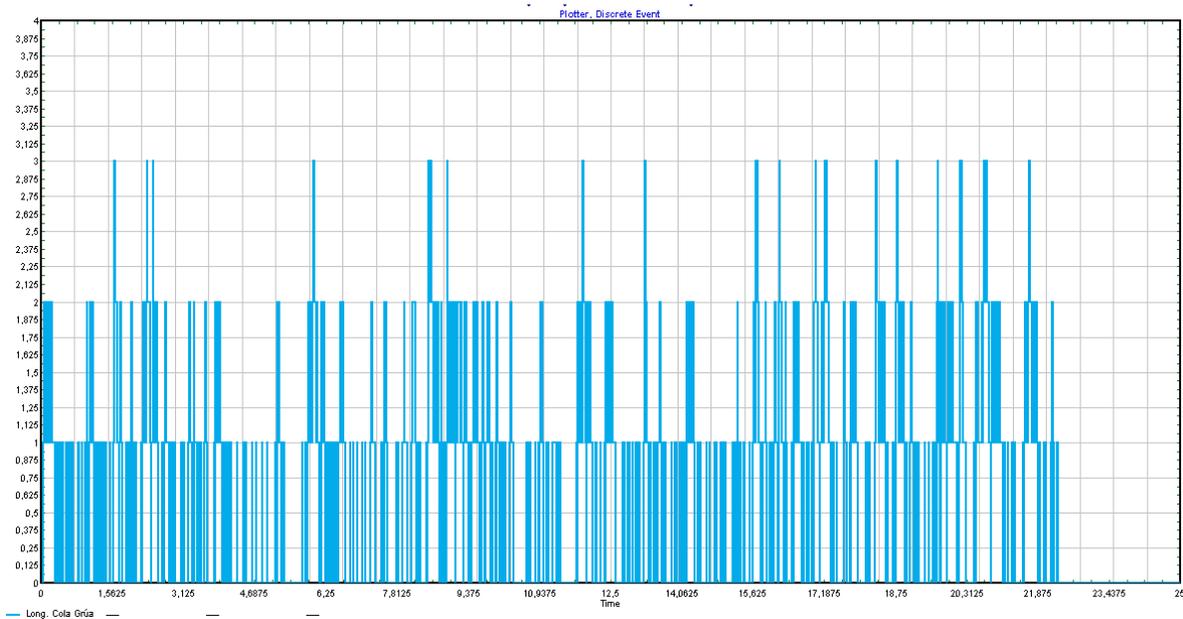


Gráfico 7: Evolución Cola Camiones Bajo Grúa – Muelle Penetración

Tiempo de Servicio en Patio de Contenedores

En el caso de variar el tiempo de servicio (distribuido exponencialmente) de los camiones en el patio de contenedores (carguío de contenedores a camión), los resultados se muestran en la Tabla 4 y Gráfico 8, observándose obviamente una relación inversa entre ambas variables, pero que prácticamente no tiene incidencia en la distinción entre las productividades de Muelle Marginal y de Penetración. Para valores inferiores a 1 minuto, las mismas tienden a ser asintóticas a un valor en torno a 24 [cont/h].

Tabla 4: Resultados Sensibilización Tiempo Carguío Camiones en Patio

Tiempo Medio Carguío Camiones [min]	Productividad Media [cont/h]	
	Muelle Marginal	Muelle Penetración
0,5	23,8	23,8
1	23,7	23,7
2	22,4	21,7
3	18,2	17,8
4	14,5	14,1
5	11,9	11,8

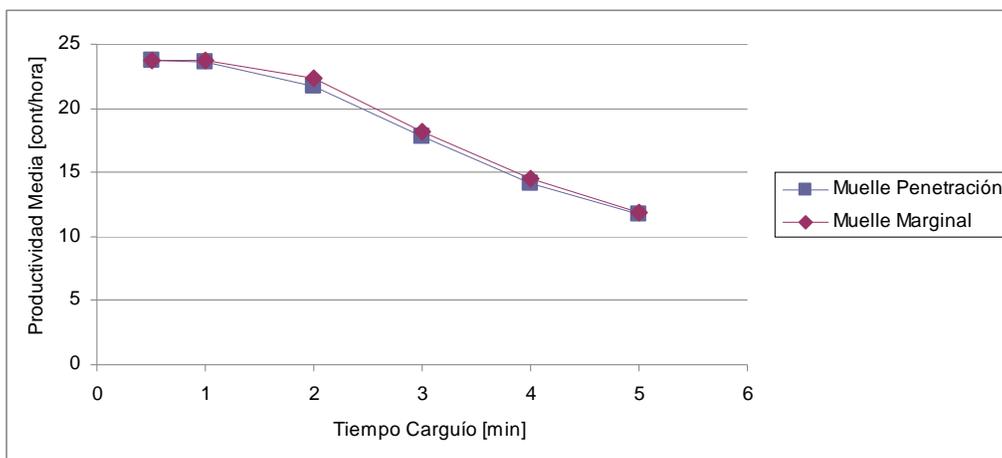


Gráfico 8: Sensibilización Tiempo Carguío en Patio

Velocidades de Traslación de Camiones

La incidencia de esta variable se muestra en la Tabla 5 y Gráfico 9 siguientes, observándose que en la medida que la velocidad es menor, el efecto negativo sobre la productividad de la configuración de Muelle de Penetración es mayor que en el caso de Muelle Marginal, obviamente debido a la mayor distancia que debe recorrerse en el primer caso. Para las menores velocidades simuladas, la diferencia de productividades es en torno a un 6% a favor del Muelle Marginal, en tanto que para las velocidades usuales en puerto, entre 20 y 40 [km/h], esta diferencia se reduce al ya indicado valor del orden de 2%.

Velocidad de Giro de Camiones en el Muelle

Este parámetro se ha considerado pertinente sólo para el caso del Muelle de Penetración, pues en caso de no contarse con espacios suficientes o de extrema congestión, es más probable que puedan enfrentarse escenarios de reducida velocidad de circulación en ciertos tramos, que incidan en una menor velocidad media general. Luego, la incidencia de este factor se muestra en la Tabla 6 y Gráfico 10, observándose una alta sensibilidad a valores inferiores a 5 [km/h], lo que da cuenta de la necesidad de planificar las dimensiones de este tipo de muelles con los espacios suficientes, para evitar congestiones o interferencias que vayan en desmedro de una expedita circulación de los camiones.

Tabla 5: Resultados Sensibilización Velocidad Traslación Camiones

Vel. Media Circulación Camiones [km/h]	Productividad Media [cont/h]	
	Muelle Marginal	Muelle Penetración
10	18,1	17,1
15	18,2	17,5
20	18,3	17,8
30	18,3	17,9
40	18,3	18,0

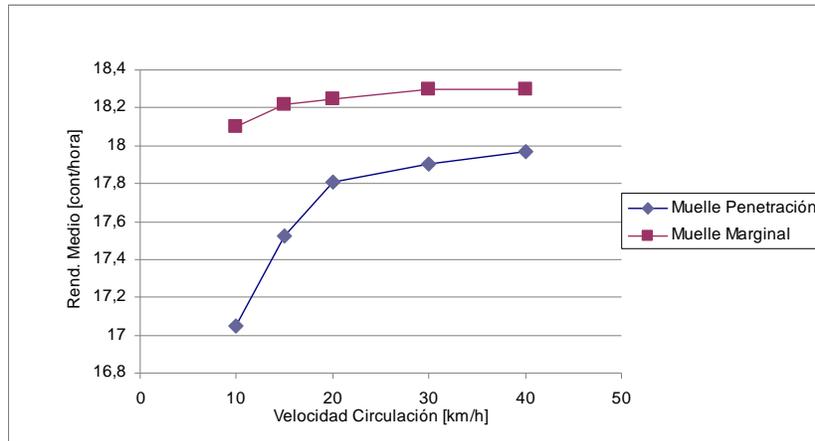


Gráfico 9: Sensibilización a Velocidad de Circulación en Patio

Tabla 6: Sensibilización a Velocidad de Giro de Camiones en Muelle de Penetración

Vel. Media Giro Camiones [km/h]	Productividad Media [cont/h] Muelle Penetración
1	12,7
1,5	15,9
3	17,3
6	17,6
10	17,8
20	17,9
30	17,9

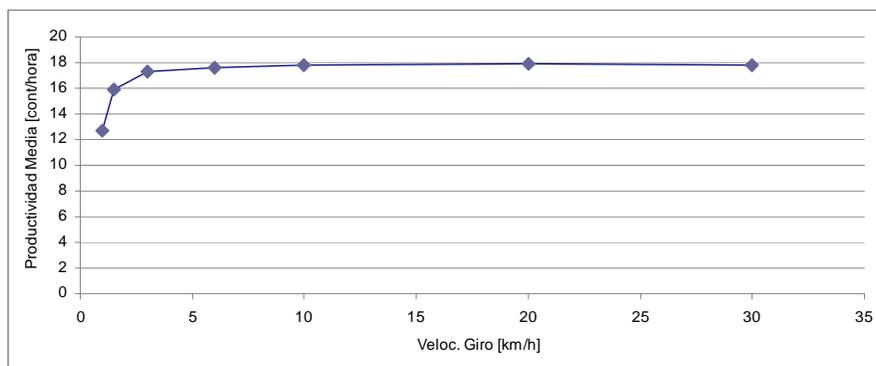


Gráfico 10: Sensibilización a Velocidad de Giro de Camiones en Muelle de Penetración

Distancia Media a Centroide de Centro de Acopio

Los datos de la Tabla 7 y el Gráfico 11 permiten apreciar la incidencia de esta variable en las productividades para ambos tipos de muelle. La sensibilización se efectuó aumentando la distancia desde su valor base a valores entre el doble y el cuádruple de éste (en el caso del Muelle Penetración, la distancia pertinente es la existente entre el centro de acopio y la entrada al Puente de Acceso).

Se observa que en ambos casos, tanto Muelle Marginal como de Penetración, la distancia cuadruplicada se traduce en un decremento de las productividades medias en valores inferiores a 2%, en tanto que la diferencia de productividades entre el Muelle Marginal y el de Penetración para las distancias más alejadas, se mantiene en un valor en torno a 2,5 %.

Tabla 7: Sensibilización a Distancia a Centro de Acopio

Muelle Marginal		Muelle Penetración	
Distancia Media	Productividad Media	Distancia Media	Productividad Media
[m]	[cont/h]	[m]	[cont/h]
90	18,2	55	17,8
180	18,1	110	17,6
270	18,0	165	17,6
360	17,9	220	17,5

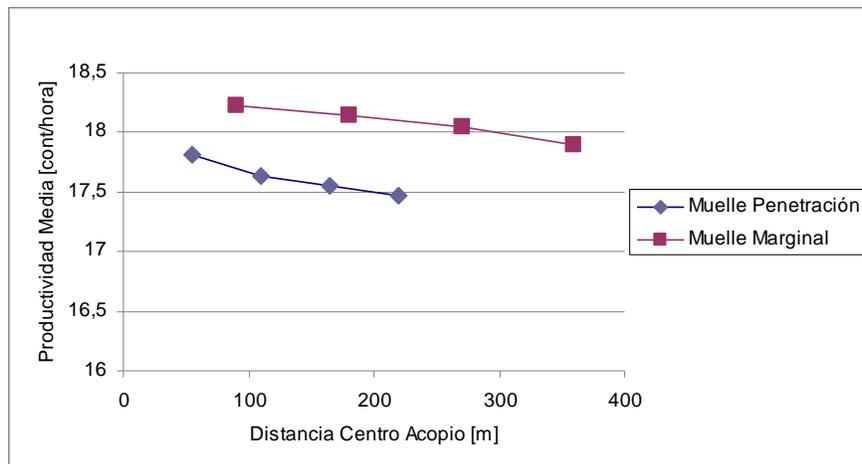


Gráfico 11: Sensibilización a Distancia a Centro de Acopio

Caso Dos Grúas Móviles

Con el fin de apreciar el efecto que un incremento en el número de camiones pudiese tener en el Muelle de Penetración, al trabajar con dos grúas de embarque en forma simultánea, se efectuó una simulación de esta condición, variando asimismo el número de camiones por mano, obteniéndose los resultados mostrados en Tabla 8 y Gráfico 12.

Se observa que, al igual que en el caso de una mano de trabajo, las productividades de ambos tipos de muelle son muy semejantes, con una leve tendencia a mayores colas en el caso del Muelle Marginal, a medida que se incrementa el número de camiones, producto de las menores distancias medias a recorrer.

Tabla 8: Productividades Operación con 2 Manos de Trabajo

Número Camiones	Productividad Media [cont/h]		Tiempo Medio Espera Camiones Bajo Grúa [min]		Long. Cola Máxima [Nº Camiones]	
	Marginal	Penetración	Marginal	Penetración	Marginal	Penetración
4	28,3	26,6	0,9	0,8	3	3
8	36,6	36,0	3,0	3,1	5	5
12	38,9	38,5	3,4	4,0	8	7
16	39,4	39,2	4,1	4,7	9	8
20	39,6	39,6	7,8	7,7	11	10

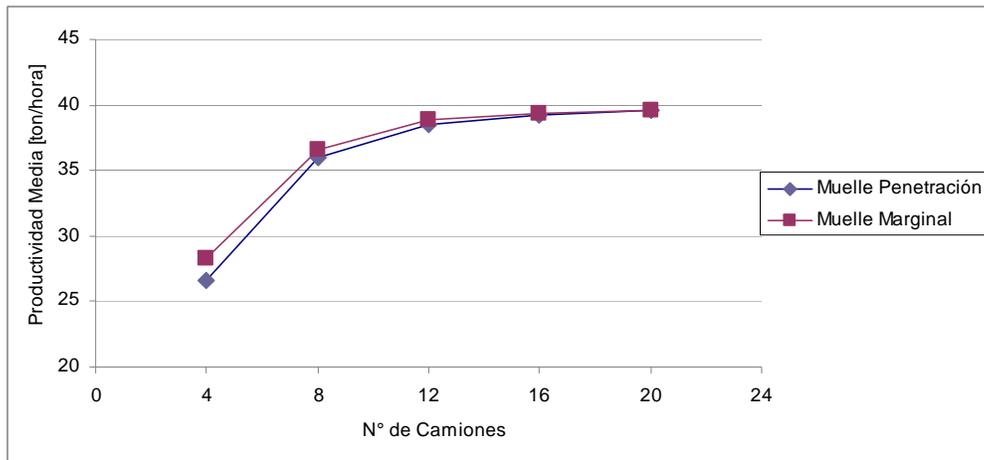


Gráfico 12: Productividades con 2 Manos de Trabajo

CONCLUSIONES

El trabajo efectuado permite establecer las siguientes conclusiones principales:

- Las diferencias entre productividades promedio de la opción de Muelle Marginal v/s Muelle de Penetración, para las condiciones analizadas, no son relevantes, trabajando ya sea con una o dos grúas móviles de muelle.
- La simulación demuestra que con niveles adecuados de número de camiones y con las distancias estudiadas, se pueden obtener productividades en las grúas móviles que se encuentran dentro del rango normal que se obtiene típicamente con estos equipos.
- El aumento del número de camiones sirviendo a cada grúa móvil en un número más allá de 6, no ofrece un aumento significativo de la productividad del muelle, mientras que los tiempos y colas de espera de los camiones para ser servidos por las grúas móviles aumentan de manera importante, lo que se traduce en aumentos de costo de capital, mantenimiento, combustible, etc., así como en emisiones innecesarias de los camiones en el terminal.
- El modelo de simulación asume que la circulación entre el muelle y el patio de carga no posee ninguna restricción de flujo en el tránsito de los camiones, salvo las asociadas a las longitudes de colas máximas posibles de aceptar en el Muelle de Penetración. De esta forma, se ha supuesto que la geometría del muelle, en particular en el caso del de Penetración, garantiza el movimiento fluido de los camiones, independiente de la posición de las grúas móviles en el muelle. Las conclusiones del presente trabajo, son aplicables por tanto a situaciones de muelles con dimensiones que posibiliten esta fluidez.
- En el caso del Muelle de Penetración, la mayor sensibilidad a los parámetros analizados se presenta para los tiempos de giros de los camiones, reforzando el comentario anterior en el sentido que una adecuada operación del mismo, supone que se garantiza la inexistencia de restricciones que vayan en desmedro de estas velocidades o tiempos de giro.
- El análisis efectuado corresponde a un caso particular de operación de un muelle de este tipo por una banda, y con grúas de tipo móviles. No deben extenderse por tanto estas conclusiones para otros casos, como pueden ser la operación a dos bandas del muelle o la utilización de grúas de pórtico (gantry cranes) para la transferencia de contenedores, debiendo analizarse estas situaciones como casos particulares. La metodología y herramienta utilizadas, podrían dar cuenta de dichas situaciones sin mayores problemas, contando con información de calibración adecuada.

Los elementos de juicio generados con una aplicación similar a la aquí mostrada, fueron utilizados como uno de los factores de decisión en un caso real de aplicación, para un puerto de la zona norte de nuestro país.