

IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

EFFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE INTERARRIBO DE NAVES EN LA DETERMINACIÓN DE CAPACIDADES DE STOCKPILES

J. Serrano C.¹, L. Burgos G.², A. Miller V.³, R. Langdon F.⁴

RESUMEN

Se efectúa en el presente trabajo un análisis orientado a establecer la incidencia que tiene la disciplina de llegadas de naves a un terminal portuario de embarque de graneles sólidos, representada por su distribución probabilística de tiempos interarribos, sobre la determinación de la capacidad de almacenamiento requerida para un almacén de depósito de dichos graneles (stockpile). Se hace uso de un modelo de simulación de eventos discretos para simular los principales procesos involucrados en la operación del terminal, para distintas distribuciones típicas de tiempos interarribos. Se efectúan además sensibilizaciones complementarias de respuesta del sistema a los parámetros tamaño de embarque de las naves, niveles de transferencia anual de carga del terminal y nivel inicial de almacenamiento del stockpile. Se determinó que la capacidad de stockpile requerida es altamente dependiente del grado de aleatoriedad de las distribuciones interarribo de las naves que hacen uso del terminal, donde un mayor nivel de aleatoriedad se traduce en una mayor capacidad requerida de stockpile. Modificaciones en tamaños de lote y stockpile inicial inciden en la capacidad requerida de stockpile, pero en mucho menor medida que la aleatoriedad de la llegada de naves. El incremento en los niveles de transferencia anual del terminal se traduce en un aumento también de los requerimientos de capacidad del stockpile, pero con un factor no directamente proporcional, siendo menores mientras mayor sea el grado de aleatoriedad de las llegadas de naves. Las relaciones entre capacidad requerida de almacenamiento y nivel de transferencia anual del terminal guardan en general buena correspondencia con las recomendaciones típicas sobre la materia, en particular en el caso de arribos regulares.

¹ Director Técnico. PRDW, jserrano@prdw.com

² Ingeniero Senior. PRDW, lburgos@prdw.com

³ Líder disciplina Mechanical Systems. PRDW, amiller@prdw.com

⁴ Líder disciplina Ports and Harbours. PRDW, rlangdon@prdw.com

1 INTRODUCCIÓN

Se efectúa en el presente trabajo un análisis orientado a establecer la incidencia que tiene la disciplina de llegadas de naves a un terminal portuario de embarque de graneles sólidos, sobre la determinación de la capacidad de almacenamiento requerida para un almacén de depósito de dichos graneles (stockpile). La disciplina de llegadas se representa por la distribución probabilística de tiempos interarribos de naves, en un esquema de determinación de la capacidad del stockpile haciendo uso de un modelo de simulación de eventos discretos.

La literatura técnica disponible para la estimación preliminar de capacidades de stockpile normalmente hace referencia a ella como una proporción del volumen de transferencia anual del terminal, relacionándola con factores tales como número de usuarios y productos transferidos por el terminal; nivel de control sobre los tiempos de llegada de las naves; tamaños de embarque/desembarque; entre otros. Estimada así inicialmente esta capacidad, lo usual es avanzar hacia un análisis más profundo haciendo uso de herramientas de simulación, generalmente de eventos discretos, que permiten modelar explícitamente los efectos de variables como las descritas en la operación del stockpile, considerando asimismo la dinámica de alimentación del stockpile desde la producción.

De entre las variables antes enunciadas, el presente trabajo se centra en analizar los efectos de la aleatoriedad de los tiempos de llegada de las naves en la determinación de capacidad de un stockpile, para un terminal genérico de embarque de graneles sólidos, haciendo uso de la simulación mediante eventos discretos de los principales procesos involucrados.

2 METODOLOGÍA

2.1 Establecimiento del problema

Durante la etapa de diseño de un nuevo terminal marítimo, o de la ampliación de un terminal existente, es común el uso de herramientas de simulación logística, con el objetivo de evaluar que el sistema sea capaz de alcanzar un determinado volumen de transferencia de carga, asociado a la demanda que este experimentará. Uno de los elementos que se evalúan normalmente en este proceso, es la capacidad de las áreas de almacenamiento. Por un lado, se requiere que esta área cuente como subsistema con capacidad suficiente para no limitar la capacidad general del sistema productivo y de operación del terminal, y por otro se busca optimizar su tamaño para reducir el CAPEX. Esto último resulta especialmente relevante en terminales graneleros mineros, donde el área de almacenamiento (o *stockpile*) se traduce en un volumen de material no comercializado, con su consecuente impacto económico.

Uno de los parámetros que influye en el volumen requerido para almacenar material es el esquema de arribo de naves, normalmente representado en modelos de simulación mediante la distribución de tiempos de interarribo. En el caso de ampliaciones de terminales existentes, se cuenta en general con estadísticas de llegadas de naves y, por lo tanto, es posible trabajar en el ajuste de distribuciones de tiempos de interarribo haciendo uso de herramientas estadísticas habituales para esto, no así en el caso de terminales nuevos. Para estos últimos, existen estudios

con recomendaciones generales respecto a la distribución de tiempos de interarribo esperables (UNCTAD, 1985; Rodrigues & Rangel, 2016; Van Asperen, Dekker, Polman, & de Swaan Arons, 2003; Monfort et al, 2011). Sin embargo, el impacto de la elección de distribución de tiempos de interarribo ha sido subestimado en modelos de simulación portuaria en el pasado (Van Asperen, Dekker, Polman, & de Swaan Arons, 2003). Esto podría llevar a un diseño que no satisfaga las condiciones establecidas, con relación a adecuados niveles de capacidad y de inversión.

El objetivo de este trabajo es, por lo tanto, presentar una sensibilización de la capacidad requerida de stockpile, frente a variaciones en la distribución de tiempos de interarribo de naves, para un terminal genérico de embarque de graneles sólidos minerales. Se efectúan además sensibilizaciones complementarias de respuesta del sistema a los parámetros tamaño de embarque de las naves, niveles de transferencia anual de carga del terminal y nivel inicial de almacenamiento del stockpile. El análisis adopta como índice de comparación la relación entre la capacidad necesaria de stockpile y su relación con el nivel anual de transferencia de carga del terminal, contrastándolo además con recomendaciones de valores típicos sobre la materia.

2.2 Esquema metodológico general

Se desarrolló un modelo de simulación que reproduce la operación de un terminal genérico de embarque de graneles sólidos, con un sitio de atraque. Se consideraron corridas de un año de duración, con un número de réplicas según se indica más adelante, y un paso de tiempo de una hora. Se realizaron suficientes repeticiones para alcanzar una precisión mínima de 5%. Se consideró como límite de batería del modelo desde tierra la llegada de material al stockpile, y desde el mar, la llegada de barcos al punto de fondeo.

El modelo representa un stockpile, con una tasa de arribo constante de material de entrada, y una salida según la llegada de naves y tasas de transferencia de carga del terminal marítimo. Se modeló un caso base, representativo de un terminal de embarque de concentrado de cobre en Chile, utilizando parámetros y valores típicos de operación, adoptados de la experiencia del equipo redactor, atendida su participación en múltiples estudios y proyectos sobre la materia.

El caso base fue analizado variando la distribución de tiempos de interarribo, efectuándose además sensibilizaciones sobre los siguientes parámetros:

- Tamaño de lote de embarque de naves
- Nivel inicial del stockpile
- Nivel de transferencia anual del terminal

Como distribuciones típicas representativas de distintos grados de aleatoriedad se adoptaron las siguientes:

- Erlang 2, considerada como típica para la operación de terminales graneleros (UNCTAD (1985); Monfort et al. (2011); Van Vianen (2015)). Implica la existencia de algún grado de control sobre la programación de arribo de las naves
- Triangular, representando la modalidad típica de arribo de naves establecida en las cláusulas de puesta a disposición y cancelación (laycan) de los contratos navieros

- Exponencial, representando una disciplina de arribos totalmente aleatoria, que también es posible de encontrar en este tipo de terminales, según la experiencia recogida en diversos terminales y literatura técnica investigada

Para reproducir las condiciones esperadas de maniobrabilidad y operatividad de naves, se incorporó en el modelo una serie de tiempo de alturas significativas de oleaje y alturas límite para ingreso y operación de naves, así como tasas típicas de fallas de equipos.

2.3 Modelo de simulación

El modelo se desarrolló mediante el software de simulación de eventos discretos Arena®, desarrollado por Rockwell Automation. Dado el carácter estocástico del mismo, se hizo uso del método de Montecarlo para la generación y análisis de resultados.

2.3.1 Variables de entrada

Los siguientes parámetros fueron establecidos como variables de entrada del modelo:

- Volumen anual de carga a transferir por el terminal, toneladas por año [tpa]
- Tamaño medio de lotes de embarque de naves, toneladas por nave [t]
- Velocidad nominal de embarque de carga, toneladas/hora [tph]
- Nivel inicial de carga en el stockpile, [t]
- Clima de oleaje anual, en términos de serie de tiempo de altura de oleaje
- Condiciones límites de altura de ola para el ingreso y operación de naves
- Distribución de fallas y mantenimiento del equipo cargador
- Tiempos de maniobra y tiempos muertos al atraque y desatraque
- Número de réplicas de simulación

2.3.2 Variables de salida

Los siguientes parámetros se establecieron como variables de salida del modelo:

- Serie de tiempo de niveles de carga en el stockpile, resultante del balance de volumen inicial, más la alimentación constante desde tierra, menos el volumen demandado desde las naves atendidas. Como nivel de diseño, se adopta el valor resultante asociado al 95% de no excedencia del análisis de Montecarlo (5% de excedencia).
- Tiempos de espera de naves.
- Tiempos de servicio de naves.
- Tasa de ocupación del terminal.
-

2.3.3 Número de réplicas

Para determinar el número de réplicas Montecarlo, se evaluó el comportamiento de la media del volumen de stockpile por escenario. De acuerdo con el teorema del límite central, el promedio de una serie de muchas observaciones tiende a distribuir normalmente. Para un intervalo de confianza del 95% de la media del volumen de stockpile, se determinó un número de repeticiones

tal que se alcance una precisión objetivo de 5%. Dicha precisión se definió como la mitad del rango del intervalo de confianza.

Como es de esperar, se observó que el número de repeticiones para alcanzar la precisión adoptada varía de manera importante según la distribución de tiempos de interarribo utilizada. Se comprobó que la precisión objetivo se alcanzó para cada distribución adoptada con el siguiente número de réplicas.

Tabla 1: N° de réplicas

Distribución de tiempos de interarribo	Réplicas
Erlang 2	1 000
Triangular	200
Exponencial	1 000

3 EXPLOTACIÓN DEL MODELO

3.1 Valores base y sensibilizaciones

Se definió un caso base adoptando los siguientes valores para las variables que se indican:

- Volumen de transferencia anual: 1.5 Mtpa.
- Tamaño de lote de embarque de naves: 25 000 t.
- Tasa nominal de carga: 1 000 tph.
- Nivel inicial de stockpile equivalente al embarque de dos naves (50 000 t).

Se efectuaron las siguientes sensibilizaciones al caso base, modificando una variable a la vez:

- Tamaños de lote de 10 000 t y 40 000 t.
- Stock inicial equivalentes a 1 y 3 lotes de naves.
- Volúmenes de transferencia anual 3 Mtpa y 15 Mtpa.

El nivel de transferencia anual de 15 Mtpa se incorporó para representar el caso de terminales con mayores niveles de actividad, tales como terminales de embarque de minerales de hierro, modelándose en base a los siguientes parámetros:

- Distribución de tiempos de interarribo Erlang 2.
- Tamaño de lote de 187 500 t.
- Tasa de carga de 6 000 tph.
- Stock inicial de stockpile de 2 lotes, equivalente 375 000 t.

Los tiempos medios de interarribo para las tres distribuciones modeladas corresponden, en todos los casos, al que resulta de considerar el número de días al año de operación (365) dividido por el número de naves promedio necesarias para efectuar el nivel de transferencia anual, de acuerdo con los tamaños de lotes correspondientes. Para la distribución triangular, se consideró una ventana de 11 días en torno al valor promedio.

Como tiempos de maniobra y tiempos muertos al atraque y desatraque se consideró un valor de 2 horas para todos los casos, y operacionalmente se estableció que el atraque se producía en la medida que el stockpile contara al menos con el equivalente del tamaño de lote a embarcar.

Para simular el efecto de las condiciones de oleaje en la operación del terminal, se simuló la operación con una serie de tiempo de alturas significativas de oleaje representativa de un lugar de la costa del norte de Chile. Se adoptó una condición límite de $H_s \geq 1.5m$, para detención de maniobras y de transferencia de carga. Para esta condición, la serie de tiempo utilizada arroja un downtime por oleaje de 10% anual.

En total se modelaron 21 casos. El resumen de casos se presenta en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Resumen de casos

Caso	Volumen [Mtpa]	Tamaño de lote [kt]	Tasa de carga [tph]	Stock inicial	Distribuciones de tiempos de interarribo*			
					Erl-2	Expo.	Tria.	
Caso base	1.5	25	1 000	2 lotes	1	1	1	
Sensibilización	Tamaño de lote de nave	1.5	10	1 000	2 lotes	1	1	1
		1.5	40	1 000	2 lotes	1	1	1
	Stockpile inicial	1.5	25	1 000	1 lote	1	1	1
		1.5	25	1 000	3 lotes	1	1	1
	Volumen de transferencia	3	25	1 000	2 lotes	1	1	1
		15	187.5	6 000	2 lotes	1	1	1
Total casos					21			

*Nota: Erl-2: Erlang-2; Expo: Exponencial; Tria: Triangular

3.2 Resultados

3.2.1 Caso Base

La **Tabla 3** y el **Gráfico 1** presentan los resultados obtenidos para el caso base (transferencia anual 1.5 Mtpa; tamaño lote embarque 25 kt; stock inicial 50 kt).

Se observan los siguientes aspectos:

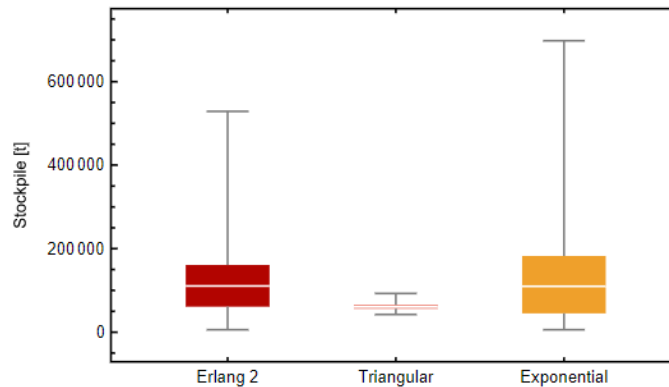
- Los menores requerimientos de capacidad de stockpile se obtienen para el caso de llegadas regulares como las asociadas al caso de la distribución interarribos triangular, seguidos de los correspondientes a interarribos distribuidos según Erlang 2 (+264% respecto de Triangular) y Exponencial (+338% respecto de Triangular).
- Como es de esperar la dispersión observada en el gráfico de caja-bigotes en cuanto a valores máximos registrados es también apreciable, con la mínima asociada a la distribución Triangular y la máxima a la distribución Exponencial
- Las proporciones entre capacidad de stockpile y nivel de transferencia anual de carga se sitúan en valores entre 4.9% (Triangular) hasta 21.6% (Exponencial)

Tabla 3: Resultados Caso Base

Parámetro	Erlang 2	Triangular	Exponencial
Capacidad requerida stockpile [t]	266 000	73 000	320 000
Cap. stockpile/Transferencia anual [%]	17.7%	4.9%	21.6%

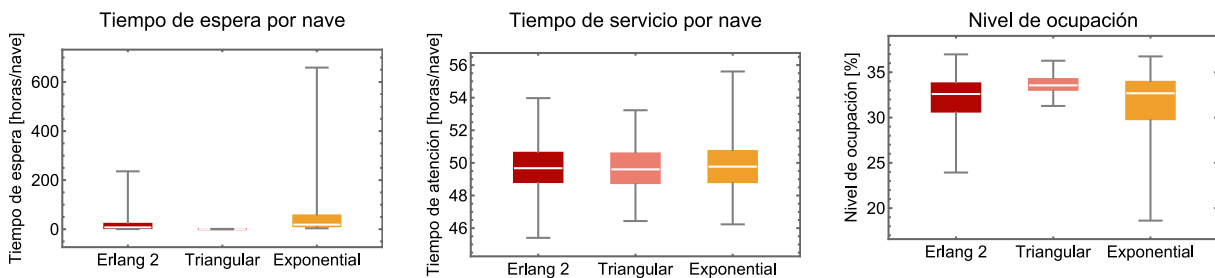
El uso de distribuciones aleatorias de arribo como la Exponencial o Erlang 2 parece contradecir el hecho que las llegadas de las naves son normalmente programadas, más aún existiendo cláusulas en los contratos de chartering que establecen ventanas conocidas de arribo (laycan) como intenta reproducir la distribución triangular. Sin embargo, es un hecho que en el trayecto se producen situaciones que exceden estas condiciones de modo tal que al analizar posteriormente los tiempos interarribos registrados en las estadísticas de los terminales, es usual encontrar en ellas que estos tiempos se distribuyen con una aleatoriedad mayor, como la dada por los otros dos tipos de distribuciones analizadas.

Gráfico 1: Distribución niveles de stockpile - Caso Base



El **Gráfico 2** muestra por otra parte los resultados de la operación del terminal en términos de tiempos de espera, de servicio y de ocupación simulados.

Gráfico 2: Tiempos de Espera, de Servicio y Nivel de Ocupación Caso Base



Para la distribución Triangular no se registraron tiempos de espera; para la distribución Erlang 2 se obtuvo una mediana de ~7 h/nave y de ~19 h/nave para la Exponencial. La mediana de los tiempos de servicio no presenta diferencias apreciables entre las tres distribuciones (~2 días para cada caso), dado que para los tres casos se utilizó un mismo esquema de tasa de embarque, fallas aleatorias y mantenciones programadas. Con ellos los niveles de calidad de servicio (representados en término de la relación Tiempo espera/Tiempo servicio) para los casos de

distribuciones Erlang 2 y Exponencial se sitúan en valores de 15% y 37%, respectivamente, ambos dentro de niveles normalmente aceptables para este tipo de terminales, usualmente en torno a 50% (Monfort et al., 2011).

Las tasas de ocupación mediana se encontraron en un rango acotado, del orden de 33% como mediana y valores máximos en torno a 37%, con una mayor dispersión para el caso de la distribución Exponencial, en cuanto a situaciones en que no pudo atenderse la totalidad de las naves programadas (dado los niveles de espera registrados), y por ende con menores niveles extremos de ocupación registrados. Estas tasas dan cuenta también de un nivel de operación lejos de la condición de congestión para un terminal de graneles de un sitio de atraque, para los que se recomiendan valores en torno a 41% - 55%, tratándose de arribos exponenciales o Erlang 2, respectivamente (Monfort et. Al, 2011). Más adelante (sección §3.2.4), se presenta el caso de operación con mayores niveles de transferencia anual y por tanto de ocupación.

3.2.2 Tamaño de lotes de embarque

La distribución de valores de capacidad requerida del stockpile para los dos casos de tamaños de lotes sensibilizados (10 000 y 40 000 t), se presenta en la **Tabla 4** y los Gráfico 3 y Gráfico 4.

Se observa el mismo comportamiento del caso base, en cuanto a mayor requerimiento de capacidad de stockpile según mayor aleatoriedad de la distribución de tiempos interarribos, con las siguientes especificidades:

Tabla 4: Resultados sensibilización tamaño de lotes de embarque

Parámetro	Erlang 2	Triangular	Exponencial
Tamaño de lote 10 000 t			
Capacidad requerida stockpile [t]	124 000	52 500	167 100
Cap. stockpile/Transferencia anual [%]	8.3%	3.5%	11.1%
Tamaño de lote 40 000 t			
Capacidad stockpile [t]	281 200	119 250	341 700
Cap. stockpile/Transferencia anual [%]	18.7%	8.0%	22.8%

Gráfico 3: Tamaño lote 10 000 t

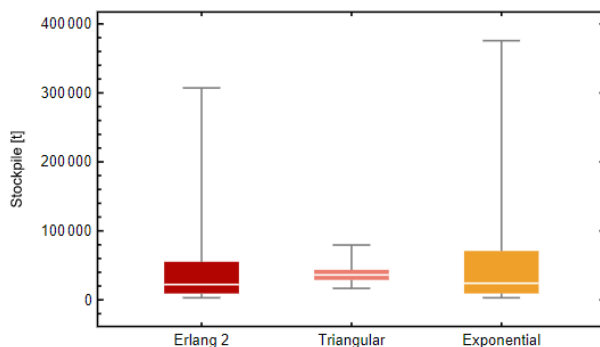
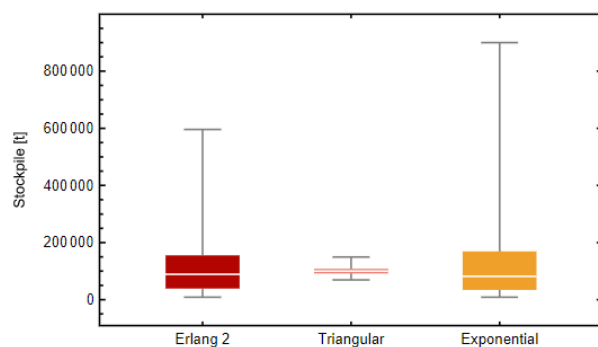


Gráfico 4: Tamaño lote 40 000 t



3.2.2.1 Tamaño de lote 10 000 t

- Los requerimientos de capacidad de stockpile son menores que en el caso Base en todas las condiciones de distribuciones interarribos: en torno a un 42%-48% para las distribuciones de mayor aleatoriedad, y un 28% para el caso de la distribución Triangular. Es decir, lotes de embarque menores inciden en menores requerimientos de capacidad de stockpile, dado que la frecuencia de naves a atender es mayor y con menores volúmenes de embarque requeridos en cada ocasión.
- Los mayores requerimientos de capacidad del caso Erlang 2 con respecto a la distribución Triangular alcanzan un 136% (algo menor al caso Base) y 218% en el caso de la Exponencial, también menor que en el caso Base.
- Siendo menores los requerimientos de capacidad del stockpile, su proporción con el nivel de transferencia anual del terminal se reduce a valores entre 3.5% y 11.1%, todos inferiores al del caso Base.

Se observó que los tiempos de espera medianos asciende a 1.9 h para la distribución Triangular, 18 h para la Erlang 2 y 27 h para la Exponencial, todos superiores al del caso Base, lo que puede atribuirse al mayor número de naves requeridas para mantener el nivel de transferencia anual, lo que se traduce en un mayor nivel de ocupación (~41%). Este nivel de ocupación se sitúa próximo al establecido como máximo recomendado para sistemas de tasas de interarribo exponenciales, según se ha indicado con anterioridad.

Los tiempos de servicio medianos se sitúan en torno a 24.5 horas, dado que las naves se atienden con la misma tasa de transferencia de embarque que el caso Base pero con un menor tamaño de lote de embarque. Los tiempos de espera y de servicio registrados se traducen en valores de calidad de servicio de 7.9% (Triangular), 78.9 % (Erlang 2) y 109% (Exponencial), dando cuenta de los niveles de congestión en que se operaría en este caso para las distribuciones interarribos de mayor aleatoriedad.

Es decir, la reducción de los tamaños de lotes de embarque si bien es cierto implica un menor requerimiento de capacidades del stockpile, conlleva un nivel de operación de mayor congestión que en el caso de operar con tamaños de lote mayores.

3.2.2.2 Tamaño de lote 40 000 t

- Los requerimientos de capacidad de stockpile son levemente mayores que en el caso Base para la distribución tipo Exponencial (6.8%), mayores para el caso de la Erlang 2 (29.6%) y francamente mayores en el caso de la distribución Triangular (63.4%). Es decir, lotes de embarque mayores tienen mayor incidencia en el requerimiento de capacidad de stockpile en el caso de sistemas de llegada de menor aleatoriedad, por cuanto la dispersión de los sistemas de mayor aleatoriedad permite generar grados de reserva que posibilitan atender de mejor manera incrementos de los tamaños de lotes de naves a embarcar.
- Los mayores requerimientos de capacidad del caso Erlang 2 con respecto a la distribución Triangular alcanzan un 135% (algo menor al caso Base) y 186% en el caso de la Exponencial, es decir, diferencias menores que en el caso Base.

- Atendido lo expuesto en cuanto a menor variabilidad de los casos de mayor aleatoriedad respecto del caso de distribución Triangular, las proporciones con el nivel de transferencia anual del terminal son similares al caso Base para los primeros tipos de distribuciones (18.7% y 22.7%), y cercano al doble para el caso de la distribución Triangular (8.0%).

Respecto a la operatividad, se observó que lotes más grandes resultan en menos naves y menor ocupación, a pesar de los mayores tiempos de servicio asociados. En este caso, se observa que la ocupación disminuye de un 33% a un 31%, comparado con el caso Base. Esta diferencia es menos significativa que el aumento observado al disminuir el tamaño de lote a 10 000 t. Una posible explicación es que las simulaciones con lotes de 25 000 t y 40 000 t arrojan tasas de ocupación bajas (terminal no saturado), mientras que las simulaciones con lotes de 10 000 t se acercan a una condición de saturación.

Los tiempos de espera se sitúan en torno a 17 h y 53 h para los casos de distribuciones Erlang 2 y Exponencial, superiores a los del caso Base, pero con tiempos de servicio en torno a 75 h, respectivamente, lo que se traduce en niveles de calidad de servicio de 23% y 71%, respectivamente. Es decir, se produce un decrecimiento de la calidad de servicio para el caso de distribución Exponencial, que la sitúa sobre los niveles recomendados de operación.

3.2.3 Nivel inicial del stockpile

Los resultados de sensibilización de este parámetro, para niveles iniciales de stock equivalentes a una y tres naves, se presentan en la **Tabla 5** y los Gráfico 5 y Gráfico 6.

Tabla 5: Resultados sensibilización stock inicial

Parámetro	Erlang 2	Triangular	Exponencial
Stock inicial 1 nave (25 000 t)			
Capacidad requerida stockpile [t]	182 000	48 000	238 000
Cap. stockpile/Transferencia anual [%]	12.2%	3.2%	15.9%
Stock inicial 3 naves (75 000 ton)			
Capacidad stockpile [t]	232 200	97 950	286 300
Cap. stockpile/Transferencia anual [%]	15.5%	6.5%	19.1%

Para el caso de stock inicial equivalente a 1 nave se observa que los requerimientos de capacidad del stockpile se reducen para los tres casos de distribuciones analizadas, en proporciones de 16% (Erlang 2), 34% (Triangular) y 26% (Exponencial), manteniéndose la tendencia de mayor requerimiento de stockpile a mayor grado de aleatoriedad de la distribución de tiempos interarribo. Las proporciones respecto del nivel de transferencia anual se sitúan en valores entre 3.2% y 15.9%.

En el caso de stock inicial equivalente a 3 naves, se observa un comportamiento disímil: leve incremento de 7% respecto del caso Base para la Erlang 2; mayor aumento para el caso de la distribución triangular, 34%; y reducción de 7.9% en el caso de la Exponencial. El efecto menor en el caso de las distribuciones Erlang 2 y Exponencial es atribuible a su mayor aleatoriedad. Las proporciones respecto del nivel de transferencia anual se sitúan en valores entre 6.5% y 19.1%.

Gráfico 5: Stock inicial 1 nave

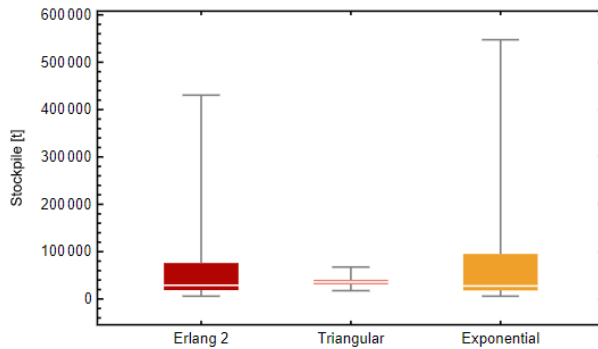
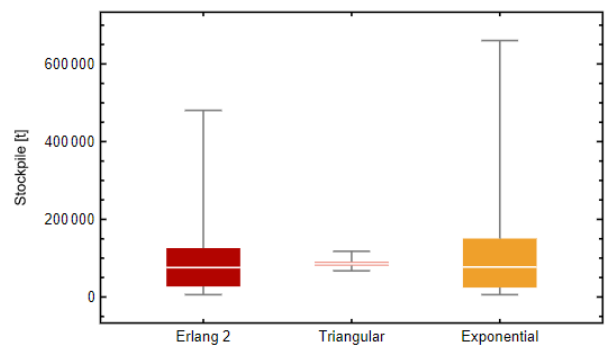


Gráfico 6: Stock inicial 3 naves



Con relación a la distribución Triangular, estos resultados dan cuenta de una mayor dependencia directa de la capacidad requerida de stockpile respecto de su nivel inicial, dada la mayor regularidad de los arribos de naves, que hace que las oscilaciones de entrada-salida de material se mantengan en general en un mismo nivel, asociado al nivel inicial. En el caso de llegadas de mayor aleatoriedad, la dependencia disminuye.

Los tiempos de espera de naves son considerablemente mayores en el caso de stock inicial equivalente a 1 nave que en el caso Base, alcanzando medianas de 44 h/nave para la distribución Erlang 2 y 68 h/nave para la Exponencial. Esto se traduce en calidades de servicio de 87% y 138% respectivamente, consideradas superiores a lo aceptable. Los niveles de ocupación, sin embargo, se mantienen respecto al caso Base. Esto hace suponer que los tiempos de espera se ven incrementados por mayores periodos de no disponibilidad por falta de material en el stockpile.

Para el caso de stock inicial equivalente a 3 naves, los tiempos de espera y calidad de servicio son muy similares al del caso Base. Es decir, reduciendo el stockpile inicial de 2 a 1 nave resulta en mayores tiempos de espera que perjudican de manera importante la operación del terminal, pero aumentarlo de 2 a 3 lotes no significa un cambio sustancial. Esto hace suponer que, para los casos estudiados, el equivalente a 2 lotes de stock inicial resulta una cantidad suficiente de volumen inicial para la adecuada operación del terminal.

3.2.4 Volúmenes de transferencia anual

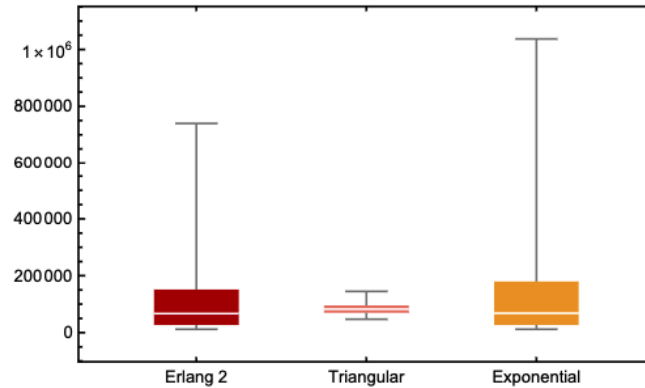
3.2.4.1 Duplicación del nivel de transferencia anual

Los resultados de este caso de sensibilización, en que el nivel de transferencia anual se duplica de 1.5 Mtpa a 3.0 Mtpa se presentan en la **Tabla 6** y el Gráfico 7.

Tabla 6: Duplicación nivel de transferencia anual

Parámetro	Erlang 2	Triangular	Exponencial
Capacidad requerida stockpile [t]	301 700	113 000	388 980
Cap. stockpile/Transferencia anual [%]	10.1%	3.8%	13.0%

Gráfico 7: Distribución niveles stockpile – Duplicación transferencia anual



Los incrementos registrados del requerimiento de capacidad del stockpile, con respecto al caso Base, son los siguientes:

- Erlang 2: 39%
- Triangular: 55%
- Exponencial: 22%

Se observa una relación inversamente proporcional a la aleatoriedad de la distribución interarribo: a menor aleatoriedad mayor incremento del requerimiento de capacidad del stockpile, sin llegar en ningún caso a duplicarse.

Un examen de los indicadores de operación indica un nivel de ocupación en torno a 67%, con niveles de calidad de servicio de 60%, 9% y 91% para los casos de distribución Erlang 2, Triangular y Exponencial, respectivamente, dando cuenta de operación en niveles de congestión para el primer y el último caso.

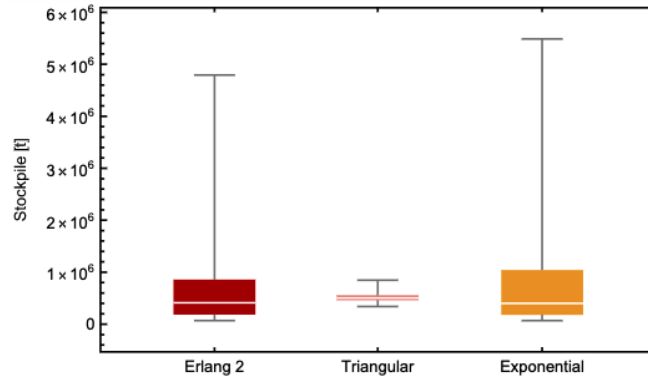
3.2.4.2 Volumen anual 15 Mtpa

Se modificó el volumen inicial por un volumen mucho mayor, con el fin de evaluar si las diferencias observadas en el caso base entre distribuciones se repiten en terminales de otro tipo. Se adoptaron volúmenes que podrían ser representativos de un terminal de mineral de hierro, con un nivel de transferencia anual de 15 Mtpa, mayor tasa de transferencia y naves de mayor capacidad (ver **Tabla 2**). Los resultados se presentan en el Gráfico 8 siguiendo el mismo formato presentado en §3.2.1.

Tabla 7: Incremento transferencia anual a 15 Mtpa

Parámetro	Erlang 2	Triangular	Exponencial
Capacidad requerida stockpile [t]	1 775 000	652 400	2 315 000
Cap. stockpile/Transferencia anual [%]	11.8%	4.3%	15.4%

Gráfico 8: Distribución niveles stockpile – Incremento transferencia anual a 15 Mtpa



Se observa que la respuesta del sistema es la misma del caso Base, en cuanto a la alta dependencia de la capacidad requerida de stockpile con relación a la aleatoriedad de la distribución interarribo de naves. En este caso, el requerimiento de capacidad para la Exponencial es un 255% superior al asociado a la distribución Triangular, en tanto que de 172% para la Erlang 2, similares a las relaciones obtenidas para el caso Base. Es decir, el comportamiento observado de dependencia de la aleatoriedad de la distribución interarribos, no cambia con los niveles de transferencia anual, al menos para los rangos analizados dentro del presente trabajo.

Las relaciones entre capacidad de stockpile y nivel de transferencia anual se mantienen entre 4.3% y 15.4%, también similares al caso Base.

Operativamente, el terminal simulado se encuentra trabajando a un 54% de ocupación, con niveles de calidad de servicio de 51%, 4% y 88% para el caso de las distribuciones Erlang 2, Triangular y Exponencial, respectivamente, dando cuenta de operación en nivel de congestión en este último caso.

3.2.5 Comparación con recomendaciones típicas

Las recomendaciones de PIANC (2019) establecen como guía general para propósitos de planificación, la utilización de valores entre 5-10% para la relación entre capacidad del stockpile y el nivel de transferencia anual. Valores de 5% o menos serían apropiados para, entre otros factores, casos de distribución controlada de tiempos de interarribo de naves, y 5% o más en el caso de terminales con control limitado sobre esta distribución.

Los otros factores guardan relación con, por ejemplo, la cantidad de usuarios que hacen uso del terminal; el número de productos manejados por usuario; tamaños medios de lotes de embarque; la estadía media de los productos en depósito; requerimientos de mezcla de productos; modalidades de transferencia de carga; etc., dando cuenta de la complejidad del problema.

Siguiendo otras recomendaciones, tales como las establecidas en UNCTAD (1985), la capacidad del stockpile resultante para las condiciones del caso Base estaría situado en un valor en torno a 12% del volumen de transferencia anual.

Y finalmente, recomendaciones establecidas en Patel (2021) indican rangos entre 3% y 10% para terminales de exportación y 5% a 22% para terminales de importación, incrementándose en 10% por efectos estocásticos.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se sitúan en general dentro de dichos rangos, en particular para el caso de la distribución Triangular, con alto nivel de control de llegada de naves, y con valores en general superiores para el caso de las distribuciones interarribo Erlang 2 y Exponencial. El criterio utilizado para definir la capacidad de almacenamiento requerida (95% de no-excedencia) podría ser un factor de influencia en estos resultados. Para efectos comparativos, el criterio adoptado en este trabajo se utilizó para todos los casos, siendo además de uso habitual en la industria para este tipo de simulaciones. Sin embargo, este porcentaje podría ser distinto. La adopción de un valor mayor o menor se relaciona con la frecuencia en que este valor pueda ser alcanzado en la operación, y con la capacidad del terminal de lidiar con situaciones que lleven a dichos valores extremos. Por ejemplo, mediante la regulación de la entrada de material desde el centro de producción o tomando medidas para aumentar o disminuir el número de naves que se espera recalen en el mediano plazo. Estas medidas de contingencia no están incorporadas en el modelo desarrollado.

4 CONCLUSIONES

El trabajo efectuado permite establecer las siguientes conclusiones principales:

- La capacidad de almacenamiento requerida para un recinto de depósito de graneles sólidos (stockpile) en un terminal de embarque es altamente dependiente del grado de aleatoriedad de las distribuciones interarribo de las naves que hacen uso del terminal.
- Para las mismas condiciones operativas, un terminal que desarrolle su actividad con un bajo nivel de control de las llegadas de las naves (mayor nivel de aleatoriedad), requerirá de una mayor capacidad de stockpile.
- Una reducción del tamaño de los lotes de embarque de naves redundará en una disminución de la capacidad requerida de stockpile, pero en general a costa de una reducción de los niveles de calidad de servicio, para mayor aleatoriedad en los arribos de naves. El incremento en los tamaños de lotes de embarque tiene el efecto de requerir también una mayor capacidad del stockpile, pero decreciente con relación al grado de aleatoriedad de las distribuciones interarribos: mayor incidencia en el caso de llegadas reguladas, menor incidencia en el caso de llegadas menos controladas.
- Una reducción en el nivel inicial de carga en el stockpile se traduce también en una reducción de su requerimiento de capacidad, con mayor incidencia en el caso de la distribución de llegadas más regulares (Triangular). El mismo comportamiento, en sentido contrario, se observa con un aumento del nivel inicial de carga en el stockpile: el mayor efecto en el requerimiento de capacidad se observa en el caso de distribución triangular.
- El incremento en los niveles de transferencia anual del terminal se traduce en un aumento también de los requerimientos de capacidad del stockpile, pero con un factor no

directamente proporcional, siendo menores mientras mayor sea el grado de aleatoriedad de las llegadas de naves. En los dos casos analizados de incremento del nivel de transferencia anual del terminal, se mantiene el comportamiento de mayor requerimiento de capacidad a mayor grado de aleatoriedad de los interarribos.

- Las relaciones entre capacidad requerida de almacenamientos y nivel de transferencia anual del terminal guardan en general buena correspondencia con las recomendaciones típicas sobre la materia, en particular en el caso de arribos regulares. El criterio de diseño general adoptado en el presente trabajo para la definición de la capacidad requerida del stockpile (95% de no excedencia), es un criterio que se recomienda analizar para cada caso particular, según sea la industria en que se aplique (embarque/desembarque de distintos productos) en interacción con los operadores del terminal.
- Los resultados presentados se limitan a los casos evaluados. Estos cumplen con el objetivo del trabajo desarrollado, en cuanto a evaluar la influencia de la disciplina de llegada de naves en la determinación de la capacidad requerida para un terminal marítimo de embarque de graneles sólidos.

REFERENCIAS

Monfort, A., Aguilar, J., Vieira Gonçalves de Souza, P., Monterde, N., Obrer, R., Calduch, D., . . . Sapiña, R. (2011). Sea port capacity manual: application to container terminals. Fundación VALENCIAPORT.

PIANC. (2019). Design Principles for Dry Bulk Marine Terminals. MarCom WG Report N°184. Brussels: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure.

Rodrigues, R., & Rangel, J. J. (2016). Analysis of ship arrival functions in discrete event simulation models of an iron ore export terminal. *Pesquisa Operacional*, 36 (1), 36(1), 45–66. doi:<https://doi.org/10.1590/0101-7438.2016.036.01.0045>

UNCTAD. (1985). Port development - A handbook for planners in developing countries (Second ed.). New York: United Nations Conference on Trade and Development.

Van Asperen, E., Dekker, R., Polman, M., & de Swaan Arons, H. (2003). Modeling Ship Arrivals in Ports. Winter Simulation Conference. Rotterdam.

Van Vianen, T. (2015). Simulation-integrated Design of Dry Bulk Terminals [TRAIL Research School]. doi:<https://doi.org/10.4233/uuid:d707f257-307a-4fd0-9ee6-160f507a42a8>

Patel, M. (2021). Conceptual Design of Dry Bulk Terminals. M. Eng. Thesis. Stellenbosch University, Sudáfrica.