

EVALUACIÓN DE LA CONGESTIÓN EN LOS PUERTOS Y DECISIONES DE INVERSIÓN ÓPTIMAS

Eduardo Martínez Budría

Universidad de La Laguna

Las decisiones de inversión en infraestructuras del transporte se enfrentan siempre a la valoración de externalidades y, concretamente, a la evaluación de los costes del tiempo del usuario que resulta, generalmente, afectado por las inversiones. La evaluación de estos tiempos de espera juegan un papel determinante para establecer las decisiones óptimas de inversión. El objetivo del presente trabajo es presentar un método para valorar los tiempos de espera de los buques en los puertos. Posteriormente, este método se aplica a la determinación de las decisiones óptimas de inversión en una terminal de contenedores.

Palabras clave: congestión, inversión portuaria.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios que tratan de determinar el valor del tiempo en transporte se han planteado dos objetivos diferentes. En primer lugar, las investigaciones que intentan obtener el valor subjetivo que los pasajeros otorgan al tiempo de viaje en un determinado modo de transporte. Puesto que no existe un mercado donde observar el precio, se utilizan técnicas basadas en la teoría de la utilidad aleatoria donde, mediante modelos de elección discreta, se comparan diferentes modos de transporte en los que exista un compromiso entre el precio de cada modo y el tiempo invertido en realizar el viaje. La Relación Marginal de Sustitución entre los diferentes tiempos y precios permite determinar el precio subjetivo del tiempo entre los diferentes modos.

En segundo lugar, los estudios que tratan de determinar el tiempo que los usuarios pasan en las instalaciones. En este caso, el precio del tiempo se puede deducir, en general, de una manera objetiva, siendo la cantidad la

variable a determinar. El interés de este tipo de trabajos se encuentra en la determinación, a priori, del tiempo que los usuarios van a consumir en las instalaciones de forma que pueda ser utilizado para establecer criterios óptimos de inversión. A este segundo grupo pertenece el presente estudio.

Así, las decisiones de inversión en infraestructuras del transporte se enfrentan siempre a la evaluación de los costes del tiempo de uso que resulta, generalmente, afectado por las inversiones. En este trabajo se presenta un método para evaluar los tiempos de espera de los buques en los puertos. Esta evaluación permite determinar las decisiones óptimas de inversión, que es el objetivo del presente estudio, teniendo en cuenta, exclusivamente, los costes que se producen en los puertos¹.

En la sección 2 se analizan los costes portuarios y en la 3 se realiza una aplicación para una terminal de contenedores que consiste en la evaluación de los costes de espera y en la determinación de las decisiones óptimas de inversión.

2. LOS COSTES PORTUARIOS Y LAS DECISIONES ÓPTIMAS DE INVERSIÓN

El coste durante la estancia del buque en el puerto tiene dos componentes. El primero es el coste de los recursos fijos y variables consumidos por el oferente de los servicios portuarios. El segundo corresponde al valor del tiempo para el usuario e incluye tanto el tiempo de servicio² como el tiempo de espera, si lo hubiera, valorado al precio-sombra que el tiempo tiene para el que lo consume.

El tiempo de la operación está condicionado por la dotación de instalaciones y equipos portuarios. Los puertos disponen de un importante poder de mercado (Martínez Budría, 1995) que les permite transferir, al menos parcialmente, sus variaciones de costes a los usuarios. La transferencia de costes podría realizarse tanto por la vía de las tarifas como a través de las esperas generadas por la escasez de instalaciones.

Dada la inevitable fluctuación en las llegadas de los buques, si se quieren evitar las esperas habría que tener una capacidad que permanecería ociosa durante largos períodos de tiempo. Por el contrario, si se quieren minimizar los costes de las instalaciones, se incrementará el coste de los usuarios, ya que aparecerán las esperas. Hay que llegar a un compromiso entre los costes de capacidad y los de espera. Para ello, un decisor que exhibiese un com-

(1) En realidad, el planificador portuario debe tener en cuenta en la toma de decisiones no sólo los costes que se producen en los puertos, sino también los efectos de las inversiones en toda la cadena de transporte. Por el lado del mar las posibles variaciones en el coste del transporte marítimo al permitir la operación de buques distintos antes y después de la inversión. Por el lado de tierra la variación que eventualmente se produjese en los costes del transporte interior. En este trabajo se analizan las decisiones de inversión óptimas teniendo en cuenta, exclusivamente, los costes que se producen en los puertos, es decir, se supone que la inversión no afecta a los costes del transporte marítimo ni a los costes del transporte interior.

(2) El tiempo de servicio es el que transcurre durante la carga/descarga del buque.

portamiento económico globalmente optimizador debería considerar el coste generalizado³ como variable de decisión.

Para analizar las decisiones de inversión óptimas se supone que existe una situación inicial de n atraques⁴, la cantidad de mercancía q que justifica la inversión en un atraque adicional debe cumplir la siguiente condición (Jansson y Shneerson, 1982):

$$p_k \leq c_t [TE(n, q, \bar{t}_s) - TE(n+1, q, \bar{t}_s)] \quad (1)$$

donde:

p_k : precio de un atraque (unidad de capital).

c_t : valor unitario del tiempo del buque. Depende del tipo de buque (portacontenedores, granelero, de mercancía general, etc.) y de sus características (arqueo del buque dado en toneladas de registro bruto, etc.)

$TE(n, q, \bar{t}_s)$: tiempo de espera asociado a la cantidad q y a n atraques, cuando el tiempo de servicio del buque individual, t_s , permanece constante.

La expresión (1) indica, en términos discretos, que, en el óptimo, el beneficio marginal de la inversión (ahorro en costes de tiempo) debe superar o igualar el coste marginal de la misma, que es el precio. Existen tres ideas implícitas en la ecuación (1): En primer lugar, la de que el capital presenta amplias indivisibilidades (véase, por ejemplo, Jansson y Shneerson, 1982). En segundo lugar, que la inversión no modifica los costes variables. Por ejemplo, que éstos son proporcionales a la cantidad (Martínez Budría, 1994 y, de forma implícita, Jansson y Shneerson, 1982). Finalmente, que el tiempo de servicio para el buque individual es independiente del número de atraques y tampoco resulta modificado por la inversión.

2.1. El coste del tiempo de espera

El tiempo que pasan los buques en el puerto se divide en dos: el tiempo de servicio y el tiempo de espera. Este último sólo se produciría si todos los atraques estuviesen ocupados a la llegada del buque.

La expresión que recoge este valor del tiempo en un período, por ejemplo de un año, es la siguiente.

$$C_t = c_t (TS + TE) \quad (2)$$

(3) El coste generalizado es un término utilizado en economía del transporte que incorpora tanto los costes de los recursos consumidos por la oferta como los costes del tiempo del usuario. Estos últimos, no evitables, dependen directamente de la cantidad e inversamente del capital portuario.

(4) Un atraque incluye la línea de atraque, el equipamiento para la carga/descarga de la mercancía, la superficie de terreno adosada y el equipo para la manipulación anterior o posterior a la carga/descarga, constituyendo la unidad mínima de capital que permite una operación completa.

donde:

Ct: coste del tiempo de estancia de todos los buques durante el año.

TS = q/r: tiempo de servicio demandado por todos los buques en el año.

r: rendimiento de las grúas en unidades de carga por unidad de tiempo, considerado constante.

$$TE(n, q, ts) = TE(n, to) \quad (3)$$

TE: tiempo de espera en unidades de tiempo por año.

n: número de ataques.

q: cantidad de mercancía a mover en el año.

to: tasa de ocupación de las instalaciones.

Por su parte to se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$to = TS / TSO \quad (3)$$

siendo:

TSO = TSO(n, i): tiempo de servicio ofrecido durante el año.

i: aspectos institucionales como los calendarios y horarios de trabajo establecidos.

La UNCTAD (1984) ha evaluado la siguiente variante de la expresión (2) de TE, en función del número de ataques y de la tasa de ocupación de las instalaciones:

$$\frac{TE}{TS} = TE/TS(n, to) \quad (4)$$

La cuantificación de TE/TS se ha realizado simulando las diferentes condiciones que afectan al tiempo de espera como son, por una parte, la mayor o menor aleatoriedad en las llegadas de los buques y, por otra, la varianza en el servicio de los mismos. Teniendo en cuenta estos dos aspectos, UNCTAD (1984) ha realizado diferentes evaluaciones de TE/TS. Por ejemplo, la máxima aleatoriedad en la llegada de los buques vendría recogida por una distribución de Poisson mientras que, por el contrario, las llegadas totalmente programadas estarían representadas por una distribución Erlang. Con respecto al servicio a los buques, la distribución exponencial negativa respondería a una alta varianza en la carga/descarga y las distribuciones de tipo Erlang serían adecuadas cuando el servicio presenta escasa variabilidad.

3. UNA APLICACIÓN: LAS TERMINALES DE CONTENEDORES

3.1. Los costes de espera

En esta subsección se realiza una aplicación para evaluar los costes del tiempo de espera en una terminal de contenedores. Se consideran tres escalas distintas de la terminal que corresponden a 1, 2 y 3 ataques respectiva-

mente para dar servicio a diferentes cantidades de contenedores a mover en la terminal. Además, se hacen los siguientes supuestos:

1) Cada atraque está equipado con 2 grúas cuyo rendimiento conjunto es de 40 contenedores/hora. La tecnología es la misma para 1, 2 y 3 atraques, lo que se traduce en que el valor de r no varía.

2) Se supone que la terminal es utilizada por muchos operadores de forma que no puedan programarse las llegadas. En este caso, las llegadas de los buques se ajustan a una distribución de Poisson. Si la terminal fuese utilizada por un solo operador se podría realizar una programación de las llegadas, de forma que las esperas no tuviesen la aleatoriedad implícita en la distribución de Poisson. En este caso, una distribución más adecuada sería la de Erlang.

3) En general, los buques tienen unos volúmenes de carga diferentes por lo que el tiempo de servicio varía entre ellos, lo que afecta a la varianza y, como se ha mencionado, condiciona la distribución que mejor ajusta el servicio. En este trabajo, supondremos una variabilidad media por lo que adoptaremos una Ley de Servicio Erlang 2⁵.

4) La terminal es operativa todos los días del año y durante las 24 horas del día, lo que produce una oferta de tiempo de servicio de:

$$TSO_1 = 8.760 \text{ horas/año.}$$

$$TSO_2 = 17.520 \text{ horas/año.}$$

$$TSO_3 = 26.280 \text{ horas/año.}$$

para 1, 2 y 3 atraques, respectivamente.

A partir de los supuestos y datos anteriores se ha elaborado el Cuadro 1.

La columna 1 presenta diferentes cantidades de contenedores/año a mover en la terminal. En la columna 2 aparece el tiempo de servicio requerido. En las columnas 3 a 5 se han calculado las tasas de ocupación en las situaciones de 1, 2 y 3 atraques. Las columnas 6 a 8 presentan la relación TE/TS para 1, 2 y 3 atraques, respectivamente, obtenidas a partir de UNCTAD (1984). Finalmente, en las columnas 9 a 11 se ha calculado el TE en horas de espera/año para 1, 2 y 3 atraques respectivamente.

El coste de la espera se obtiene a partir de la expresión siguiente:

$$C_E = c_i TE \quad (5)$$

Para valorar el coste de la espera se requiere obtener el valor de c_i . Este se ha obtenido de MOPU (1986) que proporciona los valores de c_i para diferentes tipos y tamaños de buques⁶. Si, por ejemplo, los buques son portacontenedo-

(5) Los resultados varían, lógicamente, si las llegadas de los buques y/o el servicio a los mismos se ajustan a otras distribuciones, lo que dependerá de las características de la terminal (véase, por ejemplo, UNCTAD, 1984). En todo caso, el procedimiento es independiente de las leyes utilizadas.

(6) c_i es el coste/hora del buque e incluye las cargas de estructura de la empresa naviera, los costes fijos del buque, la remuneración de la tripulación, los seguros marítimos, el mantenimiento y los consumos durante la estancia del buque en el puerto.

Cuadro 1

Nº contén.	TS horas	tasas de ocupación			tiempo de espera/tiempo de servicio			tiempo de espera (horas)		
		1 atraque	2 atraques	3 atraques	1 atraque	2 atraques	3 atraques	1 atraque	2 atraques	3 atraques
35040	876	0,100	-	-	0,080	-	-	70	-	-
52560	1314	0,150	-	-	0,130	-	-	171	-	-
70080	1752	0,200	-	-	0,190	-	-	333	-	-
87600	2190	0,250	-	-	0,250	-	-	548	-	-
105120	2628	0,300	0,150	-	0,320	0,020	-	841	53	-
122640	3066	-	0,175	-	-	0,025	-	-	77	-
140160	3504	-	0,200	-	-	0,030	-	-	105	-
157680	3942	-	0,225	-	-	0,040	-	-	158	-
175200	4380	-	0,250	-	-	0,050	-	-	219	-
192720	4818	-	0,275	-	-	0,065	-	-	313	-
210240	5256	-	0,300	-	-	0,080	-	-	420	-
227760	5694	-	0,325	-	-	0,095	-	-	541	-
245280	6132	-	0,350	-	-	0,110	-	-	675	-
262800	6570	-	0,375	0,250	-	0,130	0,020	-	854	131
280320	7008	-	-	0,267	-	-	0,023	-	-	161
297840	7446	-	-	0,283	-	-	0,026	-	-	194
315360	7884	-	-	0,300	-	-	0,030	-	-	237
346896	8672	-	-	0,33	-	-	0,04	-	-	347
388944	9724	-	-	0,37	-	-	0,05	-	-	486
420480	10512	-	-	0,4	-	-	0,06	-	-	631
452016	11300	-	-	0,43	-	-	0,07	-	-	791
473040	11826	-	-	0,45	-	-	0,08	-	-	946
494064	12352	-	-	0,47	-	-	0,09	-	-	1112

Fuente: UNCTAD (1984); Elaboración propia

res de 1.250 contenedores de capacidad c_i adopta un valor de 208.000 pesetas/hora, donde se supone incluido el valor del tiempo de la mercancía.

En el Cuadro 2 se han obtenido los datos de costes totales, medios y marginales de la espera. Asimismo, se pueden determinar los costes totales medios y marginales de la espera para cualquier número de contenedores/año, por interpolación entre los extremos de los datos relevantes.

3.2. Las decisiones óptimas de inversión

Para determinar las decisiones óptimas de inversión, es decir, las cantidades de contenedores que justifican el paso de 1 a 2 y de 2 a 3 atraques, hay que comparar el precio del capital p_k con el ahorro en tiempo de espera.

La estimación del p_k /año se ha realizado a partir de los siguientes datos:

1) El coste de la infraestructura de un atraque es de 1.250 millones de pesetas⁷. El período de amortización de la infraestructura es de 40 años, que es el utilizado en los puertos españoles. No queda valor residual.

2) El coste por atraque de las grúas de carga/descarga más los elementos para la movilización de los contenedores dentro de la terminal (trastainers y carretillas) es de 1.000 millones de pesetas⁸. El período de amortización utilizado para el equipamiento ha sido de 20 años. El valor residual es el 10%.

3) La rentabilidad aplicada, en términos reales, ha sido del 4%.

Con estos datos se ha obtenido una tasa de retorno del capital de 141 millones de pesetas/año, que es la cifra utilizada como precio del capital.

A partir de aquí se pueden encontrar las decisiones óptimas de inversión de la manera siguiente:

En las columnas 2 y 3 del Cuadro 2 se observa que para 105.120 contenedores/año, el ahorro en costes de espera entre 1 y 2 atraques es de 164.520 (diferencia entre los costes de espera de 1 y 2 atraques). Este ahorro, en el caso de que se mantenga a lo largo del período de evaluación, justifica el incremento de capacidad que tiene un coste de 141 millones de pesetas/año. Si hubiese períodos en los que el ahorro fuese inferior al precio del capital habría que encontrar el Valor Actual Neto y/o la Tasa Interna de Rentabilidad de la inversión y decidir de acuerdo a sus reglas. Igualmente, se debe incrementar la capacidad de 2 a 3 atraques para 262.800 contenedores/año.

Para determinar de manera exacta el número de contenedores hay que encontrar las funciones

$$CE_n = CE(n, q); \quad n = 1, 2, 3$$

donde CE son los costes de la espera.

(7) Datos de la terminal de contenedores del muelle del Bufadero en el puerto de S/C de Tenerife.

(8) Datos de la terminal de contenedores gestionada por la empresa CAPSA en el puerto de S/C de Tenerife.

Cuadro 2

Nº conten.	Coste de la espera (miles pts.)			Coste medio y marginal de la espera (pesetas/contenedor)					
				1 atraque		2 atraques		3 atraques	
	1 atraque	2 atraques	3 atraques	cme	cma	cme	cma	cme	cma
35040	14600	-	-	417	-	-	-	-	-
52560	35588	-	-	677	1198	-	-	-	-
70080	69350	-	-	990	1927	-	-	-	-
87600	114063	-	-	1302	2552	-	-	-	-
105120	175200	10950	-	1667	3490	104	-	-	-
122640	-	15969	-	-	-	130	286	-	-
140160	-	21900	-	-	-	156	339	-	-
157680	-	32850	-	-	-	208	625	-	-
175200	-	45625	-	-	-	260	729	-	-
192720	-	65244	-	-	-	339	1120	-	-
210240	-	87600	-	-	-	417	1276	-	-
227760	-	112694	-	-	-	495	1432	-	-
245280	-	140525	-	-	-	573	1589	-	-
262800	-	177938	-	-	-	677	2135	104	-
280320	-	-	27375	-	-	-	-	120	354
297840	-	-	33580	-	-	-	-	135	385
315360	-	-	40333	-	-	-	-	156	510
346896	-	-	49275	-	-	-	-	208	729
388944	-	-	72270	-	-	-	-	260	690
420480	-	-	101288	-	-	-	-	313	955
452016	-	-	131400	-	-	-	-	365	1059
473040	-	-	164798	-	-	-	-	417	1536
494064	-	-	197100	-	-	-	-	469	1641
	-	-	231593	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Para ello se ha estimado la siguiente función:

$$CE_n = \beta_1 q + \beta_2 q^2; \quad n = 1, 2, 3$$

Ya que CE_n debe ser no negativo, los valores de q a partir de los cuales comienzan las esperas se han obtenido resolviendo las ecuaciones:

$$CE_n \geq 0, n = 1, 2, 3$$

Las cantidades así calculadas han sido 15.994, 101.893 y 214.990 según que n valga 1, 2 o 3, respectivamente. Estos valores se han utilizado para determinar el rango de variación de la variable q .

Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 3:

Cuadro 3
RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE ESPERA

n	Función	T-stat		\bar{R}^2
		β_1	β_2	
1	CE=0 si $q < 15.994$			0,999
	CE=-0,2962 $q + 1,852 \cdot 10^{-6} q^2$ si $15.994 \leq q < 105.120$	-5,4	30,26	
2	CE=0 si $q < 101.893$			0,989
	CE=-0,4091 $q + 4,015 \cdot 10^{-6} q^2$ si $101.893 \leq q < 262.800$	-8,7	18,38	
3	CE=0 si $q < 214.990$			0,992
	CE=-0,3442 $q + 1,601 \cdot 10^{-6} q^2$ si $214.990 \leq q < 494.064$	-11,7	22,51	

Aplicando (1) a las expresiones de CE_n que aparecen en el Cuadro 3 y resolviendo las correspondientes ecuaciones se han determinado las cantidades exactas de contenedores que constituyen las decisiones óptimas de inversión. Para una cantidad esperada superior a los 94.780 contenedores/año hay que construir el segundo atraque y, asimismo, si la cantidad de contenedores es de 255.500 se debe invertir en el tercero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jansson, J.O. y Shneerson, D. (1982): *Port Economics*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England.
- Martínez Budría, E. (1995): «La demanda de servicios portuarios», *Cuadernos de Economía*. Vol. XXIII, nº 65 enero-abril, pp. 69-82.
- Martínez Budría, E. (1994): «Costes portuarios y decisiones de inversión». *Documentos de trabajo*, Nº 57, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de La Laguna.
- MOPU (1986): *Manual de Evaluación de Inversiones en Puertos*. Vol II, Anejo VI, pp. 6-16.
- UNCTAD (1984): *Desarrollo portuario*, TD/B/C.4/175/Rev. 1, p. 232. New York.

ABSTRACT

The decisions to invest in transport infrastructure always have to face the evaluation of external factors and specifically, the assessment of the costs of the user's time, which is generally affected by these investments. The assessment of these waiting times plays a decisive role in the establishment of optimum investment decisions. The aim of the present study is to present a method for assessing the waiting times of boats in ports. Subsequently, said method is applied to the determination of the optimum decisions for investment in a container terminal.

Key words: congestion, port investment.