

Análisis comparativo de la eficiencia y emisiones totales de CO₂ por el transporte intermodal de contenedores desde Singapur hasta Hamburgo

Comparative analysis of the efficiency and CO₂ total emissions caused by the intermodal transport of containers from Singapore to Hamburg

García Bucio Paul/Maestría en Ingeniería Industrial,
Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Instituto Politécnico
Nacional/México/
ing.pgarciab@hotmail.com

Fernández Caria Inés/Maestría en Ingeniería Ambiental,
Instituto Superior Técnico, Universidad de Lisboa/Portugal

*Recibido: 26 de junio de 2015
Aceptado: 18 de octubre de 2015*

Resumen

A pesar de la importancia del seguimiento de las emisiones de CO₂ generadas por las actividades humanas que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático de la Tierra, el transporte marítimo internacional es el único sector que no ha sido cubierto por el plan de reducción de emisiones de la Unión Europea (UE).

El presente estudio estima y compara las eficiencias en la generación de CO₂ en diferentes condiciones de velocidad y capacidad, además de comparar las emisiones actuales con las reales, pone énfasis en las emisiones no cubiertas por el Sistema de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU ETS por sus siglas en inglés), relacionadas al transporte intermodal de mercancías en contenedores entre dos ciudades mundialmente importantes, Singapur y Hamburgo vía Canal de Panamá.

Los resultados muestran que se obtiene una menor eficiencia en la emisión de CO₂ a una velocidad de 25 nudos en comparación con 14 nudos en cualquiera de los escenarios considerados. Sin embargo, empleando el puerto de Rotterdam, las emisiones no cubiertas por el EU ETS representan 82% del CO₂ total emitido. El transporte a través del puerto de Lisboa es 54% más intensivo en la generación total de CO₂. Esta misma tendencia se ha observado para los portacontenedores *Monte da Guia* y *Niledutch Antwerpen* a una velocidad de 25 nudos.

Palabras clave: emisiones CO₂, eficiencia, contenedores, EU ETS, fuga de carbono.

Abstract

Greenhouse gases (GHG) emitted by human activities are strongly contributing to Earth's global warming and climate change with impacts increasingly severe. Even though CO₂ emissions by international shipping is the only sector which is not covered by the European Union emission reduction target.

This study estimates and compares efficiencies in generating CO₂ at different conditions of speed and capacity, it compares current emissions with real, emphasizing emissions not covered by the Emissions Trade System in the European Union (EU ETS), related to the intermodal transport of containerized cargo between two major world cities, Singapore and Hamburg, via the Panama Canal.

Results show that a lower efficiency is obtained in the emission of CO₂ at a speed of 25 knots compared to 14 knots in any of the scenarios considered. However, using the port of Rotterdam, the emissions not covered by the EU ETS represent 82% of total emitted. Moreover, transport through the port of Lisbon is 54% more intensive in the total generation of CO₂. This same trend has been observed for containerhips Monte da Guia and Niledutch Antwerpen at a speed of 25 knots.

Keywords: CO₂ emissions, CO₂ efficiency, containerhip, EU ETS, carbon leakage.

Introducción

El transporte marítimo es uno de los principales medios para el comercio mundial, un elemento clave del desarrollo económico internacional y una razón central por la que el mundo disfruta de una amplia gama de productos a bajo costo. De las mercancías objeto de comercio internacional, 75% se transportan por mar con un amplio espectro que va desde ropa y zapatos, electrónica, mesas y sillas, hasta productos perecederos como pescados y mariscos (Lloyd, 2008).

Los contenedores transportan también materiales como plástico, papel y maquinaria para instalación de fábricas en todo el mundo. Para 2008, el transporte mundial de contenedores se estimó en 1,3 millones de toneladas métricas de carga, y en 2012 este sector representó más de 16% del comercio marítimo mundial, habiendo alcanzado 155 millones de unidades equivalentes a veinte pies, (*twenty-foot equivalent unit*, TEU por sus siglas en inglés). El transporte y comercio en contenedores también representa aproximadamente 65% de la carga seca total (UNCTAD, 2014).

En un año, un solo buque puede transportar más de 200 000 contenedores y, en función de su categoría, cada buque puede transportar hasta 8 000. Se requieren cientos de aviones, vagones de ferrocarril o flotas de camiones para transportar las mercancías que pueden caber en uno de los grandes buques portacontenedores. Por otro lado, la industria del transporte marítimo internacional emplea a cientos de miles de personas por lo que juega un papel fundamental en fomentar la creación de puestos de trabajo (Lloyd, 2008).

El este de Asia, incluyendo Corea, Japón, China, Taiwán, Singapur y otros países adyacentes, generan la mayor cantidad de contenedores de carga en el mundo. Es ahí donde las exportaciones también están muy concentradas con los diez países exportadores que representan más de dos tercios del valor total. En términos de exportación de contenedores, China domina claramente el mercado mundial y casi triplica las exportaciones de contenedores de EE. UU., lo que representa el 30% de las exportaciones del mundo en 2010 (World Shipping Council, 2015).

En cuanto a la Unión Europea (UE), el comercio marítimo está dominado por Alemania, responsable de 20% de las exportaciones marítimas de la región y 17% de las importaciones. Los cuatro principales exportadores e importadores de la Unión Europea (Alemania, Italia,

Países Bajos y el Reino Unido) también figuran entre los primeros a nivel mundial (World Shipping Council, 2015).

Sin embargo, este rápido crecimiento y relevancia tiene graves impactos ambientales. En primer lugar, las emisiones del transporte marítimo representan 3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y se espera que lleguen a 5% para el año 2050. En segundo lugar, en el año 2010, las emisiones de CO₂ provenientes del transporte marítimo llegaron a 176,6 toneladas en Europa, alrededor de una quinta parte de las emisiones marítimas mundiales (EU Commission, 2015).

A pesar de la importancia de la navegación en las emisiones de CO₂, este sector no está cubierto por el reglamento de la Unión Europea. En cuanto que la Comisión Europea y el Parlamento Europeo han acordado que todos los sectores de la economía deben contribuir a reducir las emisiones; para el transporte marítimo en la UE, en 2011, el Libro Blanco del Transporte ha establecido un objetivo de reducción de 40% en las emisiones (si es posible, un 50%) para el año 2050 en comparación con 2005 (European Commission, 2013).

La pertinencia de los estudios de emisiones radica en que son un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire que constituye la base para la definición de directrices y planes de acción en lo relativo al fenómeno de la contaminación atmosférica cuya incidencia ambiental, social, económica y tecnológica es de creciente importancia mundial. Además, permite conocer las fuentes emisoras de contaminantes, su comportamiento y la consecuente detección de áreas de oportunidad en términos de ingeniería inmersos en un ámbito de comercio global (INECC, 2014).

Este estudio tiene como objetivo estimar y comparar las eficiencias en la generación de CO₂ en diferentes condiciones de velocidad y capacidad, así como comparar las emisiones de actuales con las emisiones reales, haciendo énfasis en las emisiones no cubiertas por el EU ETS, lo cual puede conducir a una fuga de carbono, en relación con el transporte de mercancías en contenedores entre dos ciudades mundialmente importantes, Singapur y Hamburgo vía Canal de Panamá, a través de dos rutas intermodales divididas de la siguiente manera: 1) ruta Marítima desde Singapur hasta el puerto de Rotterdam (el más importante puerto europeo) y posterior transporte por tierra en tren hasta Hamburgo, Alemania, 2) ruta Marítima desde Singapur hasta el Puerto de Lisboa (implica menor desplazamiento dentro del espacio marítimo europeo) y posterior transporte por tierra en tren hasta Hamburgo, Alemania.

Metodología

Buques portacontenedores

Las emisiones de CO₂ provenientes de buques portacontenedores se han calculado de acuerdo con el apartado 3, sección 3.4.3.b de la Guía para el inventario de emisiones de la Agencia ambiental europea, que se basa en el movimiento de las naves, los datos de actividad de los buques, así como el consumo de combustible por categorías de buques (UNCTAD, 2014; IMO, 2009). Los valores de consumo específico de combustible (g/kW h) de cada categoría para los motores principal y auxiliar fueron tomadas de IMO (2009), misma que consiste en un promedio ponderado de todos los buques.

La potencia generada (kW h) depende de la potencia instalada, el tiempo estimado de viaje para una categoría particular y del factor de carga promedio. Por otra parte, las emisiones totales de CO₂ (ton) dependen del consumo específico de combustible y la potencia generada. El mismo principio se aplica para estimar el consumo de combustible del motor auxiliar (IMO, 2009).

Datos de movimiento de los buques

Las distancias por mar entre los puertos seleccionados fueron estimadas a partir de searates.com, sistema web de información geográfica. Para estimar estas distancias vía Canal de Panamá, las rutas se dividieron en dos partes, la primera desde Singapur a Panamá y la segunda desde Panamá hasta el correspondiente destino final (tabla I).

Tabla I. Distancias marítimas entre las ciudades seleccionadas vía Canal de Panamá

Lugar de salida	Lugar de llegada	Distancia (km)
Puerto de Singapur	Lisboa, Portugal	27 485
Puerto de Singapur	Rotterdam, Países Bajos	28 629

Fuente: searates.com

Tiempo total de navegación

El tiempo total de navegación ha sido determinado entre los puntos de partida y llegada a diferentes velocidades. La elección de la velocidad media se basó en la velocidad estándar de portacontenedores, que varía de 20 a 25 nudos. La velocidad baja comprende entre 18 y 20 nudos, mientras que las velocidades muy lentas pueden alcanzar los 14 nudos (ABS, 2013; Panayides & Wiedmer, 2011), (tabla II). Se ha supuesto que todo el tiempo fue empleado en navegación, ya que las maniobras y *hotelling* (estancia en el muelle) del buque representan sólo 1% del total de las horas navegadas.

Tabla II. Velocidad y tiempos de navegación relacionados a cada destino vía Canal de Panamá

Velocidad		Tiempo de navegación (h)	
(Nudos)	(km/h)	Singapur-Lisboa	Singapur-Rotterdam
14	25.9	1 221	1 264
18	33.3	868	904
22	40.7	722	748
25	46.3	640	664
27	50	597	621

Fuente: searates.com

Caracterización de buques por categoría

Los inventarios de emisiones de CO₂ presentados en este estudio incluyen motores principales y auxiliares, por tanto, se hizo una caracterización de los buques teniendo en cuenta su capacidad en TEU (unidad equivalente de contenedores de 20 pies) (Tran & Haasis, 2015; IMO, 2009). Dentro de cada categoría, la mediana de la capacidad se utilizó para los cálculos. Las potencias medias instaladas para motores principales y auxiliares fueron definidas para cada tipo de buque, donde todos los buques son internacionales con un arqueo bruto superior a 400 toneladas. Se presume que todos los barcos operan con motores de cuatro tiempos que emplean diésel y combustóleo, puesto que 92,98% de la flota mundial se mueve por los tipos 5, 6 y mixto (tabla III).

Tabla III. Caracterización de los buques

Categoría	Tamaño / tipo	Capacidad (TEU)	Potencia media del motor principal (kW)	Potencia media del motor auxiliar (kW)
Post-Panamax	5 000 – 7 999 TEU	6 500	55 681	2 433
Panamax	3 000 – 4 999 TEU	4 000	34 934	1 782
Sub-Panamax	2 000 – 2 999 TEU	2 500	21 462	1 359
Handy	1 000 – 1 999 TEU	1 500	12 364	985

Fuente: IMO, 2009

Factor de carga y consumo específico de combustible

La utilización promedio de las rutas comerciales más grandes es de setenta por ciento aproximadamente y es un valor representativo de la media mundial de utilización, lo que hace el análisis mucho más preciso que si se considera 100% de carga (nominal). Para este estudio se ha empleado 70% de carga para el motor principal y 60% para el motor auxiliar (CCWG, 2014; IMO, 2009) Esta estimación es indicativa, ya que no incluye parámetros como el efecto de las variaciones de velocidad, el viento, las olas, la degradación del casco o el calado de la nave.

El consumo específico de combustible (*specific fuel oil consumption*, SFOC por sus siglas en inglés) depende de una serie de parámetros, que incluyen tamaño y edad del motor así como la densidad de energía del combustible. En el caso de este estudio, el valor genérico de 196 g/kWh ha sido empleado, el cual consiste en un promedio ponderado de la flota mundial. Los valores típicos del SFOC se reportan en el segundo estudio de la OMI en 2009 (tabla IV).

Tabla IV Factores de carga de combustible y consumo de aceite de motor principal

Referencia	SFOC promedio del motor principal (g/kW.h)	Carga media (% MCR)
Corbett, et al. 2003	206	63
Eyring, 2005	210	70-80
IMO, 2007	185	80
IMO, 2009	196	70

Fuente: IMO; 2009

Eficiencia de CO₂

Expresa la eficiencia en la producción de CO₂ en términos de masa emitida del gas por capacidad y distancia, donde "capacidad" se refiere a la cantidad de carga que transporta el buque y para efectos de este estudio es expresada en TEU (IMO, 2009). Esta eficiencia ha sido estimada para cada categoría de buque, puerto de destino y velocidad, dividiendo el total de las emisiones de CO₂ entre la capacidad del buque y la distancia marítima entre los puertos de salida y llegada. Este principio se ha aplicado para estimar la eficiencia del motor principal y auxiliar.

Tren

En el caso del transporte ferroviario la metodología empleada ha sido tomada de la sección b de las directrices para la medición y la gestión de las emisiones de CO₂ del transporte de mercancías. Con el fin de hacer la comparación entre transporte en tren eléctrico o diésel, por

lo que se han empleado los valores presentados por INFRAS, 18 gCO₂/ton-km y 38 gCO₂/ton-km, respectivamente (CEFIC-ECTA, 2011).

Según DB Schenker (RailColor, 2015), debido a que los límites son diferentes en cada país, el servicio ferroviario de Portugal a Alemania se ve limitado por la legislación portuguesa, correspondiente a una carga máxima de 703 toneladas por tren. Por lo tanto, asumiendo que el peso medio de un contenedor estándar de 20 pies puede fluctuar entre 9 y 21 toneladas, en el presente documento se ha empleado el valor de 15 toneladas. Además, cada tren puede tener una longitud máxima de 480m (cerca de 75 contenedores). Las mismas condiciones se han aplicado a la ruta desde Rotterdam a Hamburgo.

Datos de movimiento de los trenes

Las distancias entre las ciudades de origen y de destino se han estimado a partir del sistema de información geográfica en searates.com. Dicho valor representa las distancias generales por transporte terrestre (tabla V).

Tabla V. Distancia entre las ciudades seleccionadas

Lugar de salida	Lugar de llegada	Distancia (km)
Lisboa, Portugal	Hamburgo, Alemania	2 635
Rotterdam, Países Bajos	Hamburgo, Alemania	500

Fuente: searates.com

Resultados

Caso general

La variación en la velocidad y la carga tiene influencia importante en la cantidad de dióxido de carbono emitido. Sin embargo, es también cierto que dichos cambios de velocidad y las diferencias inherentes al consumo de combustible de los motores, complican la interpretación de los resultados, ya que la relación no es lineal, además, los cambios en las condiciones de operación no sólo tendrán una influencia importante en la variabilidad de consumo de combustible, sino también el coste de la energía y el beneficio económico, mismos que están íntimamente relacionados porque la energía es un importante factor de coste (Lack, *et al.*, 2011).

Sólo teniendo en cuenta dos de las variables —velocidad en nudos y los cuatro tipos de capacidad (1500, 2500, 4000 y 6500 TEU)— para establecer una comparación, es posible determinar que la ruta marítima Singapur–Lisboa es la más contaminante en términos del inventario de CO₂. De manera particular, al comparar entre las distintas capacidades propuestas, el buque con 4000 TEU de capacidad presenta los mayores niveles de emisión, independientemente de su velocidad de desplazamiento y de la ruta en cuestión; en ese sentido, el navío que presenta los menores valores de emisión de CO₂ es el de 1500 TEU de capacidad, como se muestra en los gráficos 1 y 2 para las rutas Singapur–Lisboa y Singapur–Rotterdam, respectivamente. En general la relación tiende a la linealidad, sin embargo, esto también depende de las variables adicionales que se integran al modelo, como las mostradas por Leonardi & Baumgartner (2004).

En cuanto a la velocidad, a pesar del hecho de que las emisiones de CO₂ disminuyen con mayor velocidad, la realidad es que la gama de velocidades empleadas por las empresas de transporte marítimo se encuentra entre 14 y 25 nudos, siendo este último uno de los más

comunes, ya que a pesar de implicar mayores emisiones, bajo la situación actual, permite ofrecer un mayor nivel de servicio al cliente (Martínez & Pérez, 2004). Contrario a las expectativas, se observó que los buques con la mayor capacidad de transporte no son los que emiten la mayor cantidad de dióxido de carbono, lo que significa que no hay relación directa entre la velocidad, la carga y las emisiones (MAN, 2014).

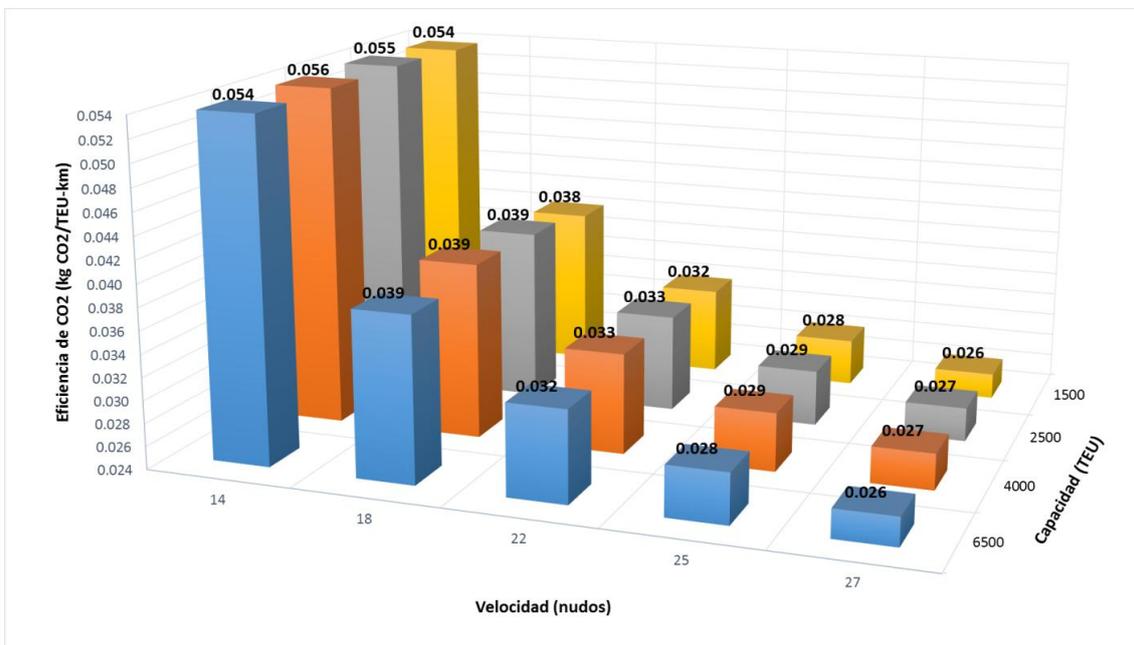


Gráfico 1. Eficiencia de CO₂ del transporte marítimo entre Singapur y Lisboa considerando las variables velocidad y capacidad. Fuente: elaboración propia

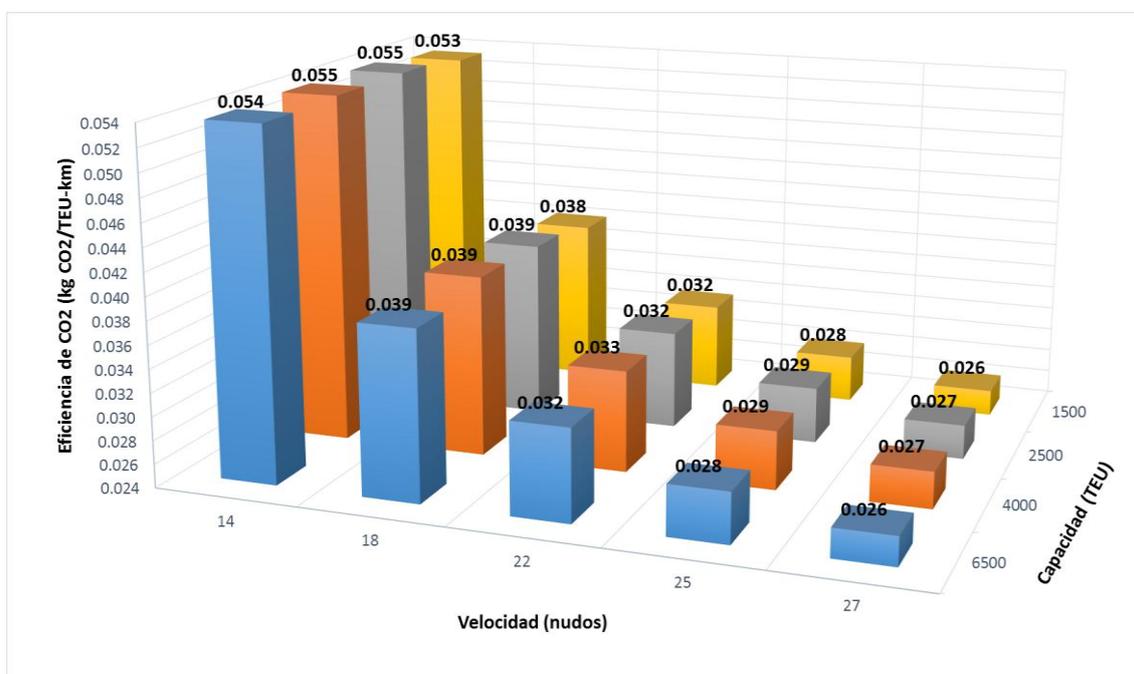


Gráfico 2. Eficiencia de CO₂ del transporte marítimo entre Singapur y Rotterdam considerando las variables velocidad y capacidad. Fuente: elaboración propia

Suponiendo una velocidad media de navegación de 25 nudos (46,3 km/h), se obtuvo una eficiencia en producción de CO₂ de 0,03 kgCO₂/TEU-km para el transporte marítimo y 0,44 kg CO₂/TEU-km para la etapa de transporte terrestre en ferrocarril, con lo cual ha sido posible estimar el total de emisiones de CO₂ por TEU por viaje, basado en el artículo 13 del Plan de monitoreo (EU Commission, 2015) cuyos valores se muestran en la tabla VI.

De esta forma, por la vía Singapur>Lisboa>Hamburgo vía Canal de Panamá y considerando el transporte intermodal barco-ferrocarril, se tiene una emisión total de 1983,95 kg CO₂/TEU (824,55 + 1159,40kg CO₂/TEU), donde 42% no se encuentra actualmente cubierto por el EU ETS. Por el contrario, de los 1078,87kg CO₂/TEU emitidos a través de la ruta intermodal Singapur>Rotterdam>Hamburgo, las emisiones de CO₂ no cubiertas por el EU ETS representan 80% del total (tabla VII, gráfico 3).

Lo anterior sugiere claramente que este viaje trasatlántico y, en general, cualquier transporte de mercancías a través de la ruta que va desde el este de Asia y hasta Europa occidental, estaría expuesto a un riesgo importante de fuga de carbono por parte de los países de la Unión Europea, con el fin de resultar competitivos frente a la competencia de las industrias de los países que no están sujetos a tales restricciones (EU Commission, 2015).

Tabla VI. Eficiencia de CO₂ y emisiones totales de CO₂ por el transporte intermodal de contenedores entre Singapur y Hamburgo vía Canal de Panamá

Ruta	Singapur – Hamburgo			
Transporte	Marítimo (25 nudos)		Ferrocarril	
Vía	Singapur – Lisboa	Singapur - Rotterdam	Lisboa – Hamburgo	Rotterdam – Hamburgo
Distancia (km)	27 485	28 629	2 635	500
Eficiencia de CO ₂ (kg CO ₂ /TEU-km)	0.03		0,44	
Emisiones totales (kg CO ₂ /TEU)	824,55	858,87	1 159,40	220,00

Tabla VII. Emisiones totales de CO₂ (kg CO₂/TEU) cubiertas y No cubiertas por el EU ETS por el transporte intermodal de contenedores entre Singapur y Hamburgo vía Canal de Panamá

Ruta	Emisiones de CO ₂ cubiertas por EU ETS	Emisiones de CO ₂ No cubiertas por EU ETS	Emisiones totales de CO ₂
Singapur>Lisboa>Hamburgo	1 159,40	824,55	1 983,95
Singapur>Rotterdam>Hamburgo	220,00	858,87	1 078,87

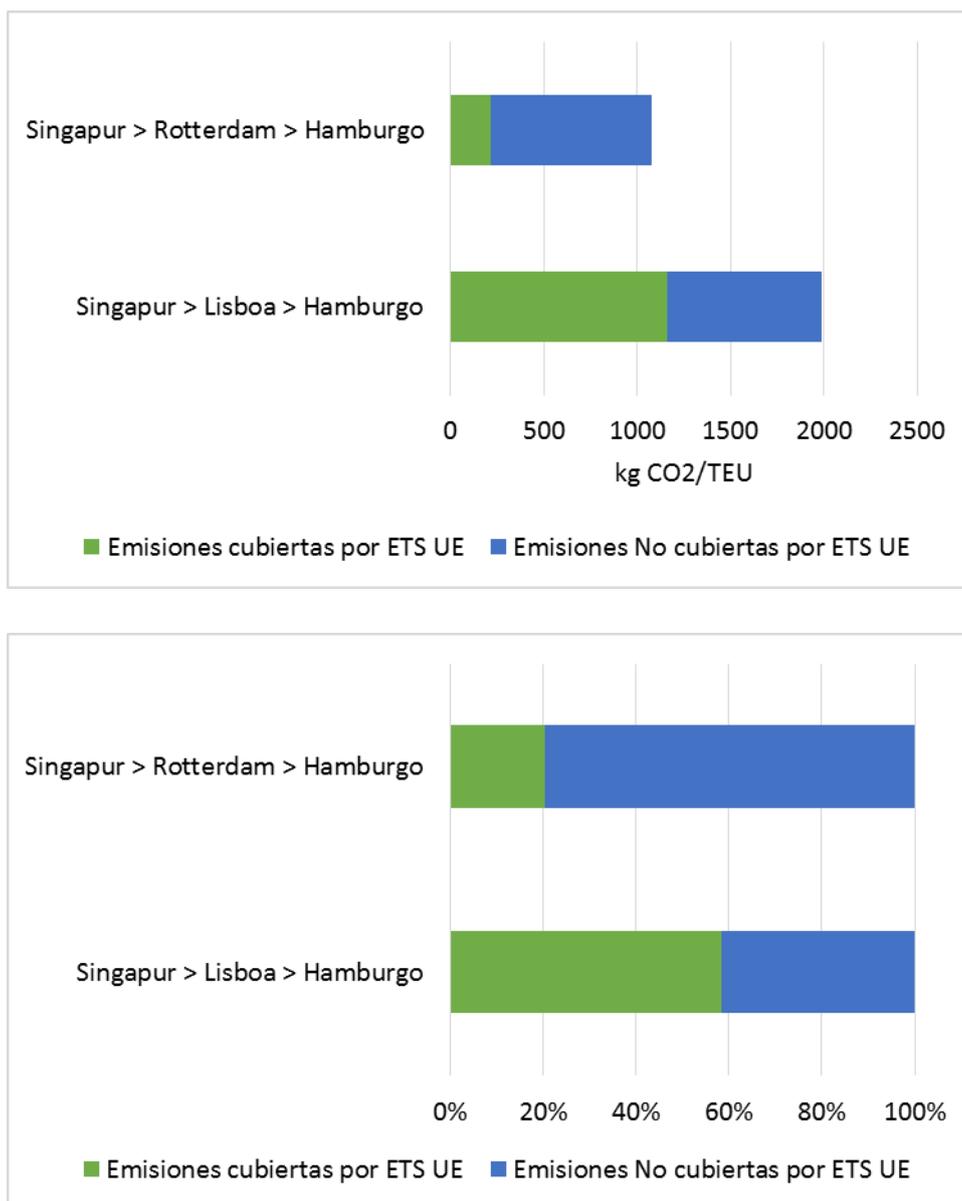


Gráfico 3 Emisiones totales de CO₂ (kg CO₂/TEU) (arriba) cubiertas y No cubiertas por el EU ETS (abajo) por el transporte intermodal de contenedores entre Singapur y Hamburgo vía Canal de Panamá

Estudio de caso

En concreta aplicación de los métodos utilizados y los datos recabados en el caso general del presente documento, se han calculado las emisiones totales para el siguiente caso de estudio, donde se presentan los diferentes escenarios considerando dos buques —*Monte da Guia* y *Niledutch Antwerpen*— ambos llamados a los puertos de Lisboa, Portugal y Rotterdam, Países Bajos, para la carga y descarga de mercancías; seguido por el transporte en ferrocarril, donde se presentan dos alternativas: movido por diésel o eléctrico, ambos empleados actualmente en la red de transporte ferroviario de la Unión Europea.

En la tabla VIII se concentran los valores de las emisiones totales de CO₂ por el transporte intermodal por buque (mostradas en la tabla VII) y ferrocarril (calculadas de acuerdo con lo establecido en la sección 4.2), donde es posible advertir que el transporte en tren eléctrico genera hasta 50% menos emisiones de CO₂ que el movido por diésel. Por otro lado, debido a que el *Niledutch* es un buque de más reciente construcción que el *Monte da Guia*, presenta

emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera hasta 50% menores, ya que su moderna construcción permite la reducción de las mismas como consecuencia de las mejoras tecnológicas en su maquinaria y estructura.

Tabla VIII. Emisiones totales de CO₂ (kg CO₂/TEU), por el transporte intermodal de contenedores entre Singapur y Hamburgo vía Canal de Panamá

Ruta	Buque	Tipo de tren	Emisiones cubiertas por EU ETS	Emisiones no cubiertas por EU ETS	Emisiones totales
Singapur> Lisboa> Hamburgo	Monte da Guia	Eléctrico	750,9	824,5	1575,5
		Diesel	1501,9		2326,5
	Niledutch	Eléctrico	750,9	467,2	1218,2
		Diesel	1501,9		1969,2
Singapur> Rotterdam> Hamburgo	Monte da Guia	Eléctrico	142,5	858,9	1001,3
		Diesel	285,0		1143,9
	Niledutch	Eléctrico	142,5	486,7	629,2
		Diesel	285,0		771,7

Similar a lo analizado anteriormente, para el caso general y mostrado en el gráfico 3, en el gráfico 4 se muestran los valores del estudio de caso con los buques y ferrocarriles antes mencionados, para la vía Singapur>Lisboa>Hamburgo, vía Canal de Panamá, donde 20 a 60% de las emisiones no se encuentran actualmente cubiertas por el EU ETS en cualquiera de las combinaciones buque-ferrocarril. A diferencia de la ruta intermodal Singapur>Rotterdam>Hamburgo, donde las emisiones de CO₂ no cubiertas por el EU ETS representan desde 60% y alcanzan incluso 80% del total.

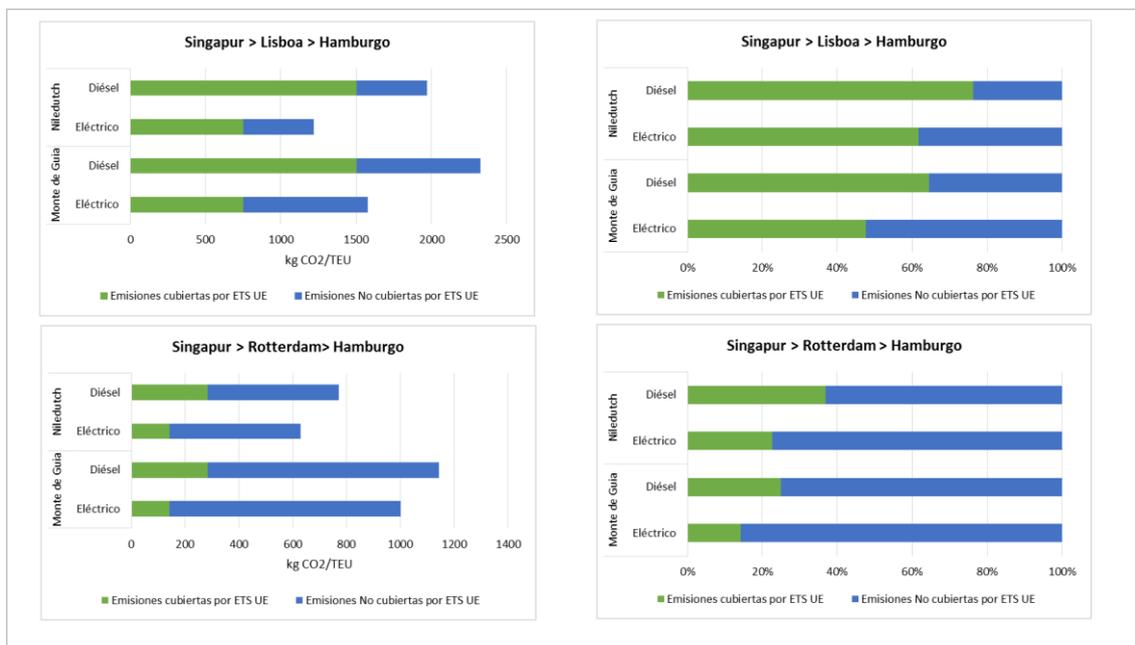


Gráfico 4 Emisiones totales de CO₂ (izquierda), cubiertas y no cubiertas por el EU ETS (derecha), en el transporte intermodal de contenedores

Conclusión

De acuerdo a las condiciones especificadas, se han calculado las emisiones de dióxido de carbono asociadas al transporte intermodal de contenedores en el contexto actual de las propuestas de monitoreo, reporte y verificación de emisiones en el marco del Sistema de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea, lo cual resulta primordial para lograr el objetivo de reducción de 40% en las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE para el año 2030, por lo que la Unión ha proyectado que será necesario rebajar en un 2,2% por año a partir de 2021 (EU Commission, 2015).

De esta manera, para la ruta Singapur-Hamburgo vía Canal de Panamá, se determinó la eficiencia de CO₂ para buque y ferrocarril (0,03 y 0,44 CO₂/TEU-km respectivamente), además de las emisiones totales (kg CO₂/TEU) donde el transporte utilizado en el puerto de Lisboa es más intenso en la generación de CO₂ en comparación con la ruta a través del puerto de Rotterdam debido a la mayor eficiencia de dióxido de carbono atribuible principalmente al tramo realizado por ferrocarril.

En la primera parte del estudio, se observa que la ruta con el valor más alto de emisiones totales ha resultado ser la vía por el Puerto de Lisboa—1983,95 kg CO₂/TEU—, que podría ser atribuido a la mayor distancia que requiere ser cubierta por tren desde Lisboa hasta Hamburgo, ya que este medio presentó una eficiencia mucho mayor de CO₂ que la del buque.

De manera general, para el transporte de contenedores por buque se obtuvo una menor eficiencia de CO₂ a mayor velocidad mientras se aumenta de 14 a 27 nudos, con la misma tendencia para arribo al puerto de Lisboa o de Rotterdam, esto atribuible a que la variación en las condiciones de funcionamiento y las condiciones externas no fueron consideradas. Además, los buques con una capacidad de 4000 TEU mostraron la mayor eficiencia de CO₂.

Por otro lado, según las medidas vigentes de la Comisión Europea, las emisiones de CO₂ no cubiertas por el EU ETS representan 80% de las emisiones totales en el caso del transporte de contenedores de Singapur a Hamburgo a través del puerto de Rotterdam. Sin embargo, este escenario podría cambiar después de la aplicación de las nuevas normas de emisión en 2018, cuando será necesario registrar y ofrecer obligatoriamente la información relevante de las actividades de transporte marítimo a fin de establecer no sólo un límite para las emisiones marítimas, sino también derechos de emisión marítimo.

Para el estudio de caso, el transporte de contenedores empleando los buques *Monte da Guia* o *Niledutch Antwerpen* a 25 nudos de velocidad y seguido por cambio a tren eléctrico o diésel se encontró que la ruta más contaminante en términos de emisiones de CO₂ es Singapur>Lisboa>Hamburgo (2326,5 kg CO₂/TEU) pues la primera parte se realiza por el buque *Monte da Guia* y la segunda por tren diésel. Este resultado es consistente con lo que se esperaba, desde que el *Monte da Guia* es un barco más viejo (construido en 1995) y la distancia recorrida por tren es más amplia.

Adicionalmente se ha mostrado que, por ejemplo, en la ruta Singapur>Rotterdam>Hamburgo con transporte intermodal empleando el buque portugués *Monte da Guia* seguido por ferrocarril eléctrico, las emisiones no cubiertas por el EU ETS alcanzan 82% del total, debido principalmente a que se recorre una mayor distancia en un buque construido en 1995, lo cual representa sin duda una probable fuga de carbono, como se comentó, lo cual establece una oportunidad para la competitividad de los países europeos.

En el otro extremo, la ruta con la menor cantidad de emisiones no cubiertas ha sido Singapur>Lisboa>Hamburgo empleando el buque holandés *Niledutch Antwerpen*, debido

principalmente a una menor distancia recorrida y a las mejoras en materia de tecnología que implica ser un buque construido en el año 2015.

Una vez que se encuentre en marcha el inventario y reporte de las emisiones de CO₂ provenientes del transporte marítimo en el año 2018, el mejor itinerario, en términos de las emisiones de CO₂ será Singapur>Rotterdam>Hamburgo por el buque *Niledutch*, navío construido en el año 2015, con los valores de emisiones más bajos, con nuevos y eficientes motores y mejoras en el diseño con nuevas tecnologías de medición y control.

Consideraciones

En el cálculo de las eficiencias de CO₂ debe considerarse que, aunque se han utilizado las metodologías establecidas en el contexto de regulación europea, se han omitido influencias adicionales complejas como son la resistencia del oleaje, composición del agua, materiales de construcción y diseño de los buques, entre otras.

Cabe aclarar que no se han tomado como referencias la ruta y medios de transporte con las mayores emisiones totales, debido a que la cuestión se centra en las emisiones actualmente no cubiertas por el EU ETS que puedan permitir una fuga de carbono, sin embargo, una vez aprobada su aplicación por el parlamento europeo, será responsabilidad de los propietarios de las flotas verificar y considerar que sus buques no alcancen y sobrepasen los límites correspondientes, de lo contrario incurrirán en importantes costos debido a la adquisición de mayores derechos de emisión que permitan ampliar el límite permitido en el caso de manejar buques cuyas emisiones sean considerables, ya sea por su eficiencia en la producción de CO₂, otros gases de efecto invernadero o aquellos degradantes de la capa de ozono.

Finalmente, es importante la participación e integración de los países del continente americano para el establecimiento de límites permisibles, ya que sin duda es urgente una legislación global que permita prevenir y controlar las emisiones de contaminantes a la atmósfera más allá de los intereses comerciales de las naciones y, en su caso, abatir el impacto en la actividad económica en medida de lo posible.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo y asesoría del Dr. Manuel Heitor, Director del Centro de investigación para la Innovación, Tecnología y Políticas del Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa, Portugal. Agradecemos también al Conacyt y al Instituto Politécnico Nacional de México.

Bibliografía

- ABS. (2013). American Bureau of Shipping. Ship energy efficiency measures. Status and guidance. *ABS ship energy efficiency measures advisory*.
- CCWG. (2014). *Global maritime trade lane emissions factors*. Clean cargo working group.
- CEFIC-ECTA. (2011). *Guidelines for measuring and managing CO₂ Emission from freight transport operations*.
- EU Commission. (2015, 03 26). *The EU emissions trading system (EU ETS)*. Retrieved from European Commission: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm

- European Commission. (2013, 6 28). *Integrating maritime transport emissions in the EU's greenhouse gas reduction policies*. Retrieved from European Commission-Transports: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping/docs/com_2013_479_en.pdf
- IMO. (2009). *Second IMO GHG Study*. International maritime organization. London: CPI Books Limited.
- INECC. (2014, Mayo 06). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático, México*. Retrieved from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/folletos/299/inven.html>
- Lack, D., Cappa, C., Langridge, J., Bahreini, R., Buffaloe, G., Brock, C., Holloway, J. (2011). Impact of fuel quality regulation and speed reductions on shipping emissions: Implications for climate and air quality. (A. publications, Ed.) *Environ. Sci. Technol.*, (45)9052–9060.
- Leonardi, J., & Baumgartner, M. (2004). CO₂ efficiency in road freight transportation: status quo, measures and potential. *Transportation Research*, 451–464.
- Lloyd. (2008). *Ship Efficiency Trend Analysis, Report 2008/MCS/ENV/SES/SES08-0008*, Marine Consultancy Services. London : Lloyd's Register.
- MAN. (2014). *Low Container Ship Speed Facilitated by Versatile ME/ME-C Engines*. Copenhagen: MAN Diesel and Turbo Technical leaflet. Retrieved from www.mandieselturbo.com
- Martínez, A., & Pérez, M. (2004). Servicio al cliente en la cadena de suministro: efecto de la adopción del EDI. *Revista de Economía y Empresa*, (21) 75-94.
- Panayides, & Wiedmer. (2011). Strategic alliances in container liner shipping. *Research in Transportation Economics*, (32) 25-38.
- RailColor. (2015, May). *Railcolor.net*. Retrieved from http://www.railcolor.net/index.php?nav=1405008#.YYbSxPI_Okp
- Searates.com. (2015, 05 25). *International container shipping platform for all size shippers*. Retrieved from Sea Rates: <http://www.searates.com/services/routes-explorer/>
- Tran, N. K., & Haasis, H. (2015). An empirical study of fleet expansion and growth of ship size in container liner shipping. *Production Economics*, (159) 241–253.
- UNCTAD. (2014). *Review of maritime transport*. New York and Geneva: United Nations Conference on Trade and Development. Retrieved Sept 2015, from http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014_en.pdf
- World Shipping Council. (2015). Retrieved from World Shipping Council: <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/trade-statistics>