



Universidad
de Navarra

CÁTEDRA DE
TRANSICIÓN
ENERGÉTICA



repsol
fundación

PUBLICACIÓN:

*“ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DEL TRANSPORTE DE HIDRÓGENO:
COMPARACIÓN ENTRE CAMIONES CISTERNA Y TUBERÍAS”*

CÁTEDRA FUNDACIÓN REPSOL DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA
EN LA UNIVERSIDAD DE NAVARRA SOBRE HIDRÓGENO
COMO VECTOR ENERGÉTICO

Autor: Guillermo Griñán, Doctorando e investigador de la Universidad de Navarra

Autor: Tomás Gómez-Acebo, Director de la Cátedra Fundación Repsol en la Universidad de Navarra



Título:

Análisis tecno-económico del transporte de hidrógeno: comparación entre camiones cisterna (tube trailer) y tuberías

Autores:

Guillermo G. Griñán, Tomás Gómez-Acebo

Resumen

El transporte de hidrógeno en forma gaseosa se puede realizar de dos maneras: en camiones cisterna (los llamados *tube-trailers*) y por tubería (los hidroductos). Para distancias cortas y cantidades moderadas, el transporte en camión es la alternativa más económica. Sin embargo, para distancias mayores y caudales elevados, es más eficiente construir una red de tuberías por la que se haga un suministro continuo de este vector energético.

En este estudio se ha desarrollado un modelo que permite estimar el coste asociado al transporte de hidrógeno en ambas situaciones. El coste en cada caso se divide en costes de inversión (CAPEX) y costes de operación (OPEX). Para los camiones cisterna se han considerado varias presiones de los recipientes (entre 20 y 50 MPa), lo que permite analizar el impacto de la presión sobre la eficiencia y el coste del transporte. Para el transporte por tuberías se ha analizado una extensa base con costes de proyectos reales en gasoductos de gas natural en Estados Unidos. Esto ha permitido correlacionar los diferentes costes (de construcción, expropiación, etc.) con la distancia de los gasoductos y sus dimensiones. También se han considerado los costes de compresión.

Con toda esta información, se ha obtenido un modelo de costes que permite determinar en qué condiciones es mejor cada tipo de transporte, y cuál es el coste unitario (por kg transportado y por unidad de longitud). La información se presenta en forma de mapa de decisión.

Resumen Ejecutivo

Contexto y Objetivo

El hidrógeno se perfila como un vector energético fundamental para la descarbonización de sectores industriales, de transporte y generación eléctrica. Sin embargo, la logística de su transporte representa un desafío clave para su integración a gran escala en los sistemas energéticos. Este estudio aborda una comparación tecno-económica exhaustiva entre los dos métodos terrestres más consolidados para el transporte de hidrógeno: los camiones cisterna de tubos (*tube trailers*) y las tuberías.

El objetivo principal es ofrecer una herramienta cuantitativa, transparente y reproducible que permita identificar la opción de transporte más rentable en función de la demanda y la distancia, desglosando los principales factores de coste y proporcionando criterios claros para la toma de decisiones en planificación de infraestructuras.

Metodología

Se desarrolló un modelo matemático detallado, implementado en el software MATLAB®, que calcula el coste nivelado de transporte de hidrógeno (€/kg) considerando tanto la inversión inicial (CAPEX) como los costes operativos (OPEX) a lo largo de la vida útil de cada tecnología. El modelo permite ajustar parámetros clave y desglosa los costes en sus componentes principales (vehículos, compresión, infraestructura, etc.), facilitando el análisis de escenarios.

Análisis de camiones cisterna (tube trailers)

- Se evaluaron tres niveles de presión de operación: 20, 35 y 50 MPa, lo que permite analizar el impacto de la presión sobre la eficiencia y el coste del transporte.
- El cálculo incluye la adquisición de camiones, remolques, recipientes a presión y estaciones de compresión, así como los costes operativos asociados (combustible, mantenimiento, personal, energía para compresión, etc.).
- Se determina el número óptimo de unidades necesarias para satisfacer diferentes demandas y distancias, considerando la vida útil de los equipos y factores de disponibilidad.

Análisis de tuberías

- Para estimar el coste de construcción de tuberías de hidrógeno, se utilizó una base de datos de costes reales de tuberías de gas natural y petróleo en EE. UU., ajustando los valores mediante factores de corrección específicos para el hidrógeno.
- Se aplicó un modelo de regresión logarítmica robusta y ponderada para cada componente de coste (materiales, mano de obra, costes misceláneos y derechos de paso), lo que permite modelar la relación entre el diámetro de la tubería y el coste, y gestionar la variabilidad y posibles valores atípicos en los datos.
- El análisis estadístico incluye la obtención de intervalos de confianza (95%) y de predicción (95%) para las estimaciones de coste, proporcionando una cuantificación explícita de la incertidumbre y la variabilidad esperada en futuros proyectos.

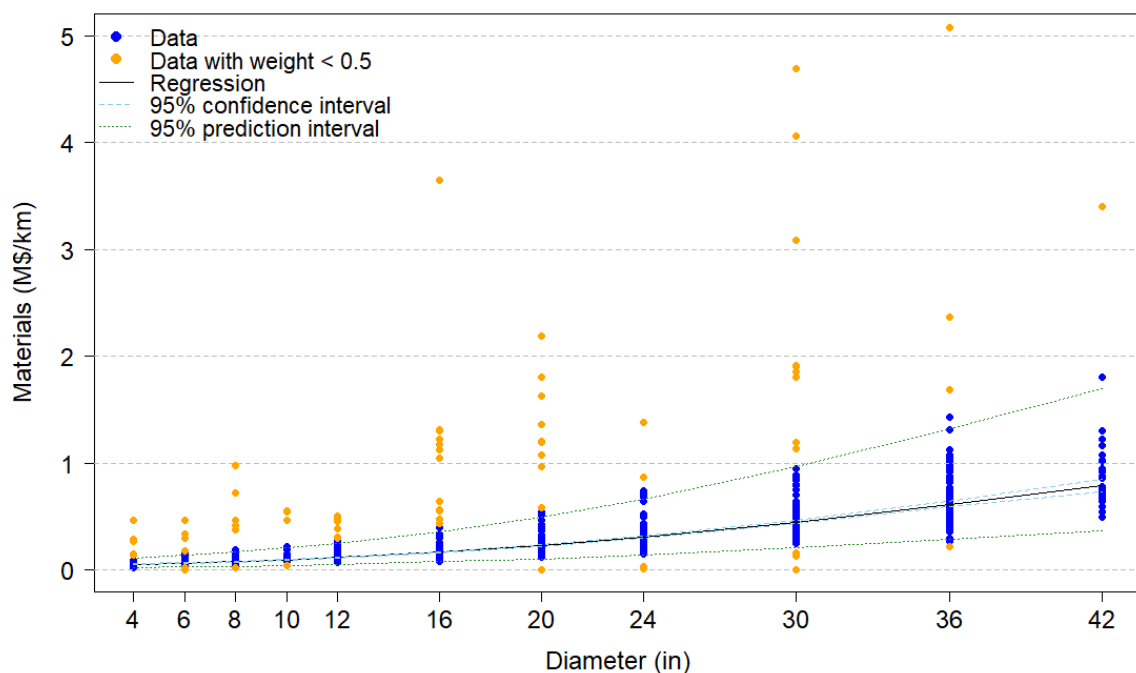


Figura 1: regresión logarítmica del coste de materiales para tuberías con intervalos de confianza y de predicción al 95%. Los puntos azules representan los datos, y los puntos naranjas representan datos con peso menor a 0,5.

Principales resultados

Camiones cisterna (tube trailers):

- Son más rentables para demandas bajas y distancias cortas (menos de 300–450 km).
- El coste está dominado por la inversión en los propios vehículos y los costes operativos (combustible, mantenimiento, personal).
- A partir de demandas superiores a 10 toneladas/día, el coste por kg se estabiliza.
- El análisis se realizó para presiones de 20, 35 y 50 MPa, observándose que a mayor presión, se mejora la eficiencia de carga y se reduce el número de viajes necesarios, aunque el coste de los recipientes a presión aumenta.

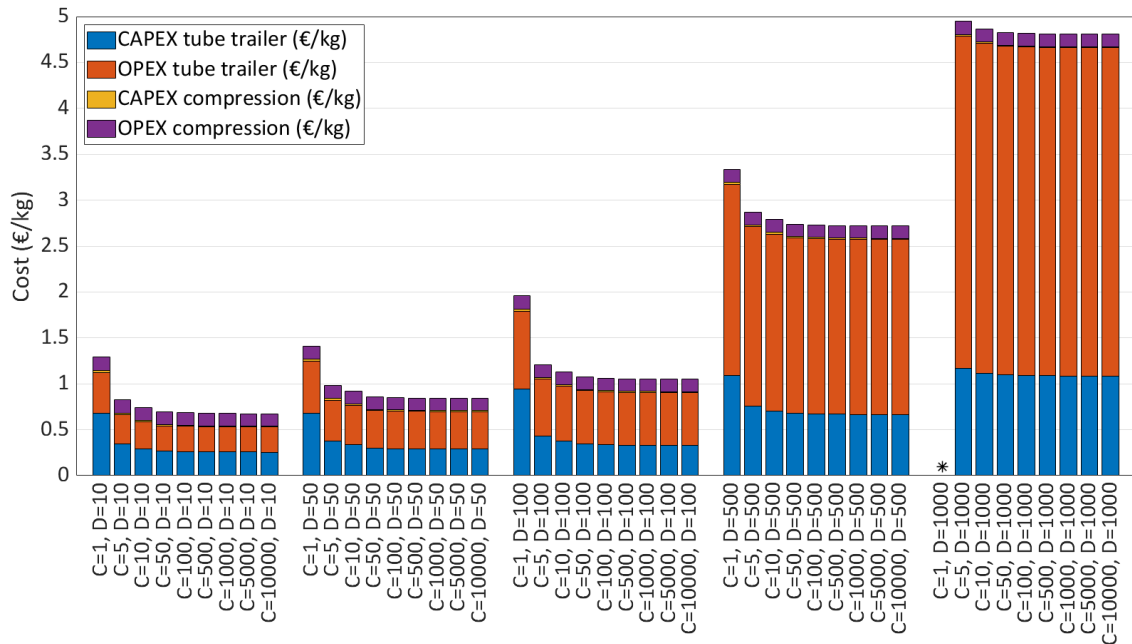


Figura 2: coste nivelado del hidrógeno a 20 MPa mediante transporte en camión cisterna (€/kg) en función de la capacidad de entrega (C, t/día) y la distancia (D, km). Las barras muestran el desglose de CAPEX y OPEX para el camión cisterna y la compresión. Los valores superiores a 5 €/kg están marcados con un asterisco (*).

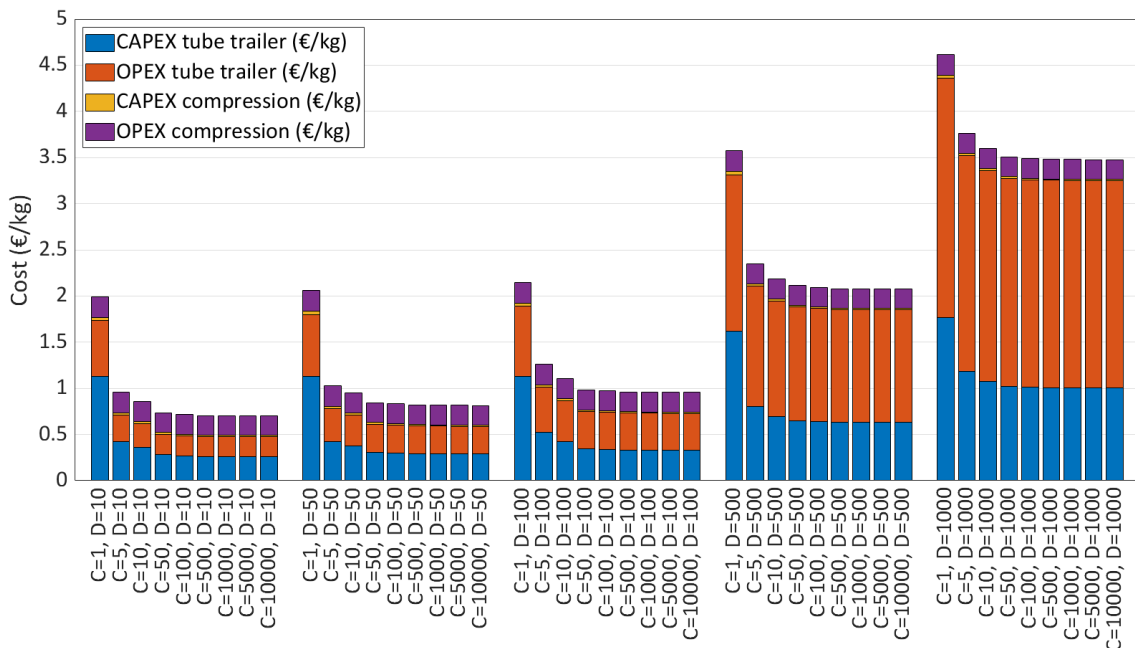


Figura 3: coste nivelado del hidrógeno a 50 MPa mediante transporte en camión cisterna (€/kg) en función de la capacidad de entrega (C, t/día) y la distancia (D, km). Las barras muestran el desglose de CAPEX y OPEX para el camión cisterna y la compresión.

Tuberías:

- Requieren una alta inversión inicial, pero resultan más rentables para demandas elevadas y distancias medias o largas.

- El coste por kg disminuye significativamente a medida que aumenta el volumen transportado, gracias a economías de escala.
- A distancias muy largas, los costes operativos asociados a la compresión del gas ganan peso.

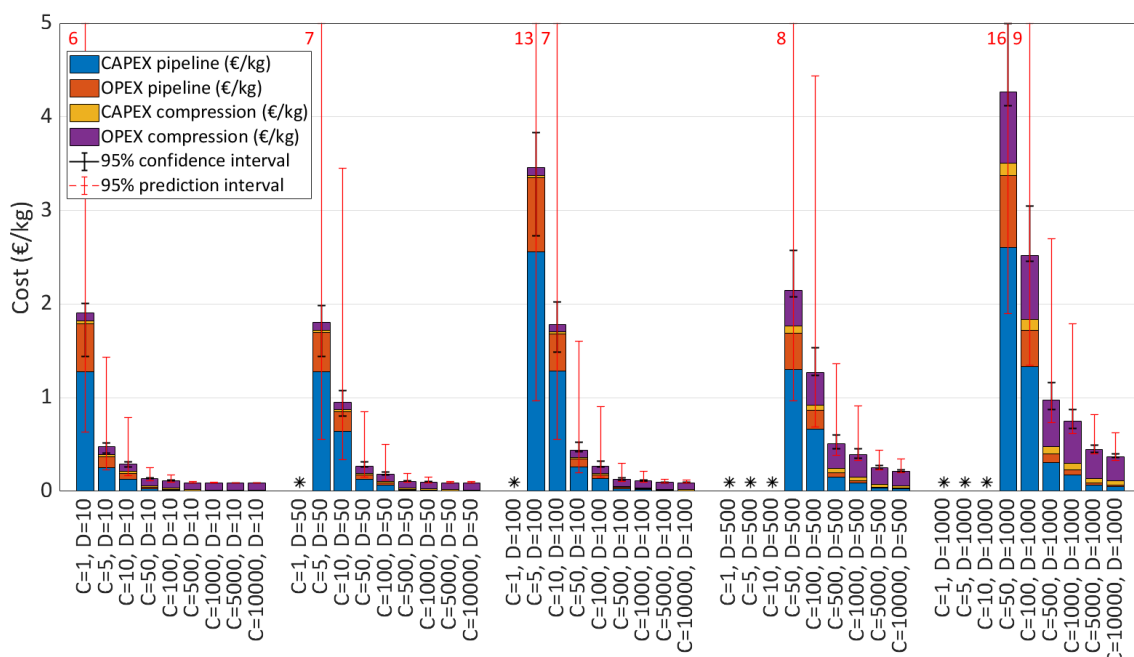


Figura 4: coste nivelado del transporte de hidrógeno por tuberías (€/kg) en función de la capacidad de entrega (C, t/día) y la distancia (D, km). Las barras muestran el desglose de CAPEX y OPEX para las tuberías y la compresión. Las barras de error representan los intervalos de confianza y de predicción al 95%. Los valores superiores a 5 €/kg están marcados con un asterisco (*).

Comparación y mapa de decisión:

- Se elaboró un mapa comparativo que delimita las regiones de mayor competitividad de cada tecnología, considerando los resultados para tube trailers a 20 y 50 MPa frente a las tuberías.
- El mapa utiliza un umbral de 2 €/kg como criterio de viabilidad económica, basado en estudios recientes que indican que costes superiores hacen inviable la producción centralizada frente a la producción in situ.
- En el mapa se representan las fronteras tecnológicas y se incluyen los intervalos de confianza y predicción derivados del análisis estadístico de los costes de tubería, lo que permite visualizar la incertidumbre asociada a cada opción.
- Se observa que los tube trailers son preferibles para demandas bajas y distancias cortas, mientras que las tuberías son la mejor opción para grandes volúmenes y largas distancias. Para distancias superiores a 300–450 km, el transporte por carretera deja de ser viable, independientemente de la demanda.

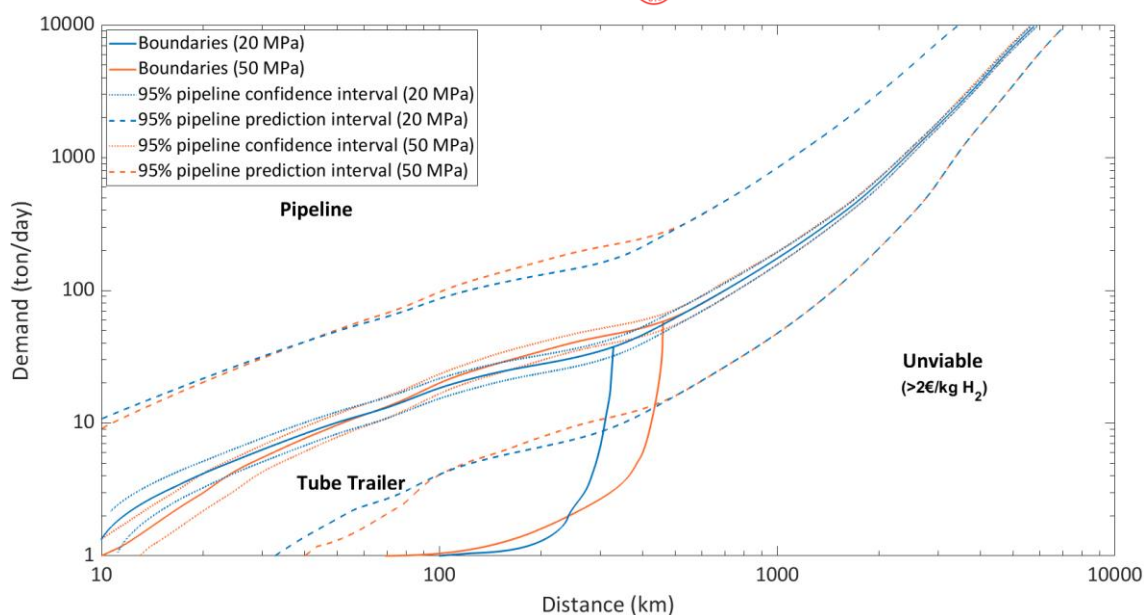


Figura 5: mapa comparativo del transporte de hidrógeno mediante camión cisterna (tube trailer) a 20 y 50 MPa frente a tuberías, destacando las regiones donde los costes de transporte son inferiores a 2 €/kg. Las líneas continuas indican las fronteras tecnológicas; las líneas de puntos y guiones muestran los intervalos de confianza y de predicción al 95% para la regresión del coste de las tuberías, ambos calculados en relación con el camión cisterna a 20 y 50 MPa.

Sensibilidad y robustez:

- Se realizó un análisis de sensibilidad reduciendo los costes de materiales de recipientes y tuberías en un 10%, 20% y 30%. Los resultados muestran que incluso con reducciones significativas, las fronteras de viabilidad entre tecnologías apenas varían, lo que refuerza la importancia de la demanda y la distancia como criterios principales de selección.

Implicaciones y Recomendaciones

- La selección óptima del modo de transporte debe basarse principalmente en la demanda prevista y la distancia a cubrir, más que en expectativas de reducción de costes futuros.
- El modelo desarrollado es una herramienta útil para planificadores y responsables de infraestructuras, ya que permite adaptar el análisis a diferentes escenarios y tomar decisiones informadas.
- Para largas distancias, se recomienda considerar alternativas como el hidrógeno líquido o portadores químicos.
- El estudio no aborda aspectos regulatorios, ambientales o de volatilidad de precios energéticos, que deberían ser considerados en futuras investigaciones.

Conclusión

Este trabajo proporciona una base cuantitativa y transparente para la planificación estratégica del transporte de hidrógeno, facilitando la integración eficiente y económica de este vector energético en sistemas sostenibles y apoyando la transición hacia una economía baja en



Universidad
de Navarra

CÁTEDRA DE
TRANSICIÓN
ENERGÉTICA



repsol
fundación

carbón. El modelo y los resultados obtenidos ofrecen una guía práctica para la toma de decisiones en el despliegue de infraestructuras de hidrógeno, considerando tanto la eficiencia económica como la incertidumbre inherente a los proyectos de gran escala.