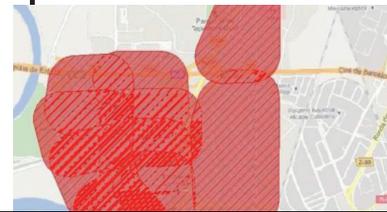


Metodología de dimensionamiento y optimización de la infraestructura necesaria para la incorporación del hidrógeno al sector transporte

OPTIMIZATION AND SIZING METHODOLOGY OF NECESSARY INFRASTRUCTURE FOR THE INCORPORATION OF HYDROGEN TO THE TRANSPORTATION SECTOR

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5481> | Recibido: 24/10/2013 • Aceptado: 05/03/2014



Jesús Gallego-Navarro, Emilio Larrodé-Pellicer, Juan Antonio Sicilia-Montalvo, Beatriz Royo-Agustín y Alberto Fraile-del-Pozo

Universidad de Zaragoza. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes. c/ María de Luna, s/n - 50018 Zaragoza. Tfno: +34 976 761 888. jesusgallegonavarro@gmail.com

ABSTRACT

- This study is motivated by the need to develop a methodology that allow the parameterizing of the fuel supply infrastructure needed to drive the new concepts in a transportation system based on electric cars. Among the several electric traction systems, the fuel cell hydrogen vehicle has been identified as the alternative with the greatest potential in the medium to long term to replace conventional vehicles. At the same time that the emergence of new vehicles with traction systems based on fuel cells and hydrogen technologies, it is necessary the implementation of new infrastructures to ensure the delivery of this new "fuel". Therefore, there is necessity to prepare the arrival of these new infrastructures to the transportation system with the objective that the transition, both in technical and economic terms, is as painless as possible. Thus, in this study has been performed the analysis and development of a computational tool that allows the use of an optimized design of a new hydrogen distribution infrastructure and of a methodology based on a GIS (Geographic Information System) that allows validate the obtained results with the tool. This make a reality the resolution of the problem of the construction feasibility of resulting number of installations with their technical characteristics in the optimal locations.
- **Keywords:** Hydrogen infrastructure, hydrogen station, transport, GIS, facility sizing.

RESUMEN

El presente estudio viene motivado por la necesidad de desarrollar una metodología que permita la parametrización de la infraestructura de suministro de combustible necesaria para los nuevos conceptos de tracción en un sistema de transporte basado en automóviles eléctricos. De entre los diferentes sistemas de tracción eléctricos, se ha identificado al vehículo de hidrógeno y pila de combustible como la alternativa de mayor potencial a medio-largo plazo para sustituir a los vehículos convencionales.

Paralelamente a la irrupción de nuevos vehículos con sistemas de tracción basados en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible, se hace necesaria la implantación de nuevas infraestructuras que aseguren el suministro de este nuevo "combustible". Por lo tanto, se plantea necesario preparar la llegada de estas nuevas infraestructuras al sistema de transporte de forma que la transición, tanto en términos técnicos como económicos, sea lo menos traumática posible.

Así, en este estudio se ha realizado el análisis y desarrollo de una herramienta de cálculo que permita la realización de un diseño optimizado de una nueva infraestructura de distribución de hidrógeno y de una metodología basada en un sistema GIS (Sistema de Información Geográfico) que permite validar los resultados obtenidos con la herramienta, posibilitando la resolución del problema de la viabilidad de la construcción del las instalaciones resultantes con sus características técnicas en las ubicaciones más óptimas.

Palabras clave: Infraestructura del hidrógeno, hidrogenera, transporte, GIS, dimensionamiento de instalaciones.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte proporciona unas funciones sociales fundamentales, pero en las condiciones actuales no puede considerarse como un sistema sostenible. El transporte, en parte debido al crecimiento económico de nuevas potencias como China, India o Brasil [1], es responsable del 20% del aumento previsto en la demanda mundial de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero hasta el año 2030. Paralelamente debe afrontarse el problema económico motivado por el fin de los recursos energéticos fósiles baratos, cuyo máximo de producción ya se ha superado según los expertos [2].

El sector transporte es uno de los principales consumidores de energía primaria a nivel global; en el año 2011 representaba aproximadamente el 28% del consumo de energía pri-

maria [3] y un 22% de las emisiones globales de CO₂, siendo el mayor responsable de éstas el transporte por carretera [4]. Por lo tanto, una de las claves para lograr un ambiente limpio y luchar contra el cambio climático es conseguir un transporte libre de emisiones.

En este sentido, el vehículo de hidrógeno y pila de combustible cumple con la condición *zero emisiones*. El hidrógeno, que es el elemento más abundante en el planeta, puede utilizarse como combustible limpio y eficiente, alcanzando unas prestaciones comparables a las proporcionadas por los combustibles fósiles convencionales. A lo largo de los años se ha realizado una amplia investigación con el fin de incorporar el hidrógeno al transporte, sobre todo para aplicaciones de media y larga distancia [5]. El hidrógeno es un vector energético limpio y su uso conlleva un impacto positivo en el cambio climático, calidad del aire local y ruido [6,7].

Se prevé que en un periodo de 10-20 años el número de vehículos que requieran hidrógeno para su propulsión se incremente notablemente, desde los primeros años, en los que la demanda será reducida y destinada predominantemente a flotas cautivas y de demostración, hasta el punto en el que el uso de este tipo de vehículo se extienda a todos los consumidores [8].

En la actualidad, no se sigue ningún criterio de optimización para ubicar este tipo de instalaciones. Al tratarse de flotas localizadas, su ubicación atiende a criterios de proximidad, y en muchos casos se trata de instalaciones de uso privado. Ante esta situación, se plantea la necesidad de crear una herramienta de cálculo que ayude a dar solución al dimensionado de las instalaciones de repostaje de hidrógeno, bajo unas condiciones determinadas de operación, accesibilidad, disponibilidad y viabilidad. Con ella se debe valorar técnica y económicamente, a partir de una metodología desarrollada, la infraestructura de hidrógeno requerida para implantar en un entorno urbano un sistema de transporte limpio propulsado con hidrógeno.

El desarrollo de esta metodología ayudará a localizar de la manera más eficiente posible la ubicación de las estaciones de suministro de hidrógeno, así como la dimensión de las mismas, atendiendo a las diferentes demandas que se produzcan en las diferentes épocas de implementación. Acertar con la elección de la ubicación óptima, que atiende tanto a criterios logísticos como técnicos, es de gran importancia debido al elevado coste que supone la construcción de este tipo de instalaciones.

2. METODOLOGÍA

2.1. HERRAMIENTA DE DIMENSIONAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN

Con el objetivo de definir las necesidades e infraestructuras de suministro de hidrógeno requeridas para dar asistencia a un sistema de transporte en un entorno urbano, se ha planteado una metodología que posibilite, como ayuda al proceso de toma de decisiones a la hora de plantear una nueva infraestructura de hidrógeno, obtener una valoración de las diferentes posibles soluciones que se plantean bajo criterios técnicos y económicos.

Para poder determinar la dimensión óptima de las infraestructuras de repostaje es necesario prever la demanda diaria de hidrógeno. Esto es posible a partir de las previsiones de demanda de la flota de vehículos que van a utilizar hidrógeno en un horizonte temporal determinado o a partir del estudio y diseño de las rutas a seguir por los vehículos, en el caso de tratarse de flotas con recorridos conocidos.

El proceso seguido hasta la obtención de la opción óptima y que ha sido implantado en una herramienta de cálculo web cuyo esquema general se muestra en la Figura 1, es el siguiente:

- Definición de la base de datos con las especificaciones técnicas del mayor número posible de modelos de los diversos equipos que componen una estación de suministro o de producción de hidrógeno y de los modelos de los vehículos a utilizar; así como de los costes estimados de todas las variables de entrada consideradas (naranja en la Figura 1).
- Determinación y simulación de los trayectos y/o estimación de flota que utilizará la nueva infraestructura (morado en la Figura 1).
- Cálculo de la demanda diaria de hidrógeno prevista (azul en la Figura 1).
- Definición de los parámetros de entrada: tiempos de operación que afectan al tiempo total de repostaje, porcentaje de llenado de los depósitos de los vehículos y número de dispensadores por hidrogenera. Necesarios para determinar el número de surtidores requeridos para cubrir la demanda total (englobado en el proceso Cálculo N° hidrogeneras de la Figura 1).
- Cálculo, del número de hidrogeneras requeridas para cubrir la demanda calculada y del número de surtidores necesarios (verde oscuro en la Figura 1).
- Selección de las tecnologías que se quieren analizar como posibles para las futuras instalaciones. Para ello se tiene en cuenta el tipo de demanda de hidrógeno a cubrir: estado y presión (verde claro en la Figura 1).

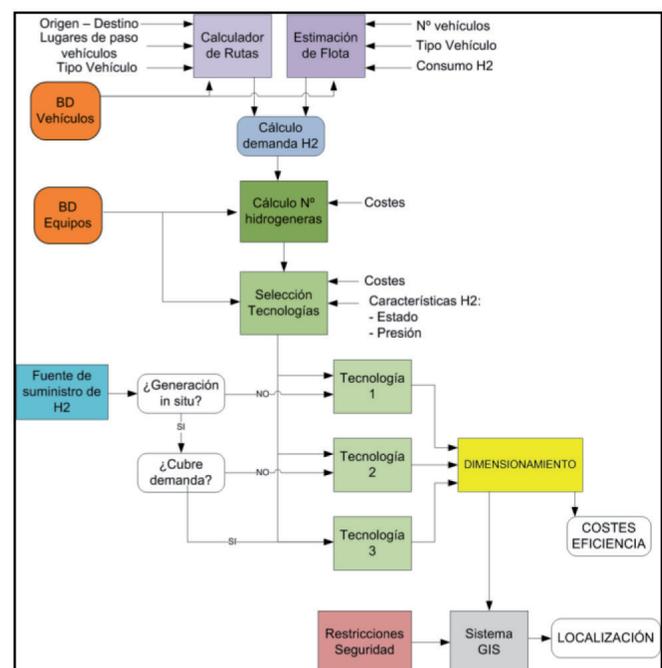


Fig. 1: Esquema general de la herramienta de cálculo desarrollada

- Combinación y obtención de la solución óptima en términos de coste y eficiencia de las opciones tecnológicas consideradas (amarillo en la Figura 1).

2.1.1. Criterios de optimización de la herramienta

Paso previo al resultado final proporcionado por la herramienta, se calcularán los costes y eficiencias energéticas de las opciones tecnológicas posibles, como criterios para analizar las diferentes opciones tecnológicas y determinar cuál es la óptima. Se tendrá en cuenta: abastecimiento (agua, energía, gas o hidrógeno), producción, almacenamiento y suministro del hidrógeno.

A cada una de las opciones se le asociará un valor (R_{ϵ} y R_{η} para coste y eficiencia respectivamente) que tomará los valores de 1 hasta n , siendo n el número de opciones estudiadas. A la mejor opción se le asociará el valor n , mientras que la peor tomará el valor de 1.

Para obtener un resultado en el que se tenga en consideración ambos criterios, se sumarán los valores asociados a cada una de las opciones, multiplicados cada uno por un peso (λ_{ϵ} , λ_{η}), que tomará un valor u otro en función de que se quiera dar mayor importancia a uno de los criterios de selección, siendo en este caso la opción óptima, según la Ecuación 1, aquella cuya suma (R_T) sea mayor.

$$OPCIÓN \text{ ÓPTIMA} = MAX (R_T) \quad (1)$$

Siendo:

$$R_T = (R_{\epsilon} \times \lambda_{\epsilon}) + (R_{\eta} \times \lambda_{\eta}) \quad (2)$$

λ_{ϵ} y λ_{η} , tomarán valores de 0 a 1, según el nivel de importancia y cumplen con la condición indicada en la Fórmula 3.

$$\lambda_{\epsilon} + \lambda_{\eta} = 1 \quad (3)$$

El criterio de selección según coste se rige por la función descrita en la Fórmula 4.

$$f \text{ MIN COSTE} (COSTE_{combustible} + COSTE_{equipos} + COSTE_{energía} + COSTE_{abast.ext.H_2O}) \quad (4)$$

#	Dispensadores	Repostaje	Almacenamiento	Coste (€/U)	Coste Total(€)
1	H2 Logic 700	gaseoso	HL	1.475.604	1.475.604
2	Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HL	1.655.604	1.655.604
3	H2 Logic 700	gaseoso	HCG	2.108.954	2.108.954
4	Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	2.288.954	2.288.954
5	H2 Logic 700	gaseoso	HCG	2.469.396	2.469.396
6	Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	2.649.396	2.649.396
7	H2 Logic 700	gaseoso	HL	2.725.604	2.725.604

Fig. 2: Resultados obtenidos aplicando el criterio de selección según coste

Tras aplicar esta función la herramienta devuelve todas las opciones tecnológicas posibles para la construcción de la estación de repostaje ordenadas de menor a mayor precio (Figura 2).

El criterio de selección según rendimiento responde a la función descrita en la Fórmula 5.

$$f \text{ MAX RENDIMIENTO} \left(\eta_{produccionH_2} \times \eta_{procesos} \times \eta_{abast.ext.H_2} \right) \quad (5)$$

En la Tabla 1 se recogen los rendimientos de los principales procesos a los que se refiere la Fórmula 5, cuyos valores se han obtenido a partir de la consulta de varias fuentes [9, 10, 11].

PROCESO	EFICIENCIA %
Reformado por vapor (gas natural)	80
Electrólisis convencional	35*
Licuefacción	55 - 70
Gasificación	70
Compresión	90
Transporte por tubería	80
Transporte tanque criogénico	85
Transporte tube trailer	85

Tabla 1: Rendimientos de los diferentes procesos

*La baja eficiencia del proceso de electrólisis se debe a que a la eficiencia de la propia electrólisis (56% - 73%) hay que aplicarle la eficiencia de la producción de la energía eléctrica (35% - 55%)

2.2. SISTEMA GIS

De forma complementaria a la aplicación web desarrollada y ante la problemática existente a la hora de determinar la ubicación geográfica óptima de las instalaciones de repostaje de hidrógeno, a partir del uso de un sistema GIS (representado en gris en la Figura 1) se ha desarrollado una metodología basada en la elección de aquellos criterios que se consideran más determinantes a la hora de ubicar las nuevas instalaciones, y en una asignación de pesos en base a la importancia otorgada a cada uno de estos criterios.

La metodología propuesta se basa en la superposición de capas que permitan la priorización o exclusión de determinadas zonas en función de que cumplan o no unos requisitos determinados. Estas capas representan cada uno de los criterios de decisión considerados:

- Índice medio de densidad de tráfico diario (IMD)
- Accesibilidad
- Densidad de población
- Rutas de transporte urbano
- Zonas comerciales
- Polígonos industriales
- Plan General de Ordenación Urbana

Se analizan escenarios basados en transporte urbano y/o privado:

- Transporte Urbano: se presta especial atención a las rutas seguidas por los autobuses urbanos. En este caso se deberá conocer los principios y finales de línea y la con-

currencia de números de línea y frecuencias en cada uno de ellos.

- *Transporte Privado*: en este conjunto se incluyen los vehículos privados (turismos, furgonetas y motos), así como taxis, flotas de reparto, o flotas de vehículos municipales. A la hora de la localización óptima de las estaciones de hidrógeno deberán conocerse las zonas de mayor concentración de vehículos, ya sea como origen o destino, o en itinerancia.

La herramienta de trabajo utilizada para desarrollar la metodología es ARCGIS, versión 10, bajo licencia ArcView.

La información proporcionada se referencia con el mismo sistema de referencia de *Google Maps*, "datum WGS84 15N". De este modo es posible representarla a través de mapas en la aplicación y generar los *shapefiles* correspondientes (formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados).

Para la construcción del GIS se precisan los siguientes planos y sus respectivas tablas de atributos, que corresponden con la capa de información común para todos los escenarios y los diferentes criterios de decisión:

- Planos de carreteras de la zona en estudio, con sus longitudes, nº de vías, sentido.
- Planos de los índices medios diarios (IMD) del tráfico.
- Planos de la densidad demográfica de la ciudad.
- Planos de la distribución de la actividad comercial
- Planos de la distribución de los polígonos industriales.
- Planos de las líneas de autobús de la ciudad.
- Planos del P.G.O.U. para ver la posible edificabilidad de las parcelas.

Como capa de información común se utiliza el mapa de carreteras de la zona en estudio, o el plano del plan de ordenación urbano dividido en sus zonas catastrales. De cada una de estas zonas se debe disponer de la clasificación y calificación, tamaño, coste del suelo y geolocalización.

2.2.1. Criterios de decisión

Con el fin de facilitar la toma de decisión sobre la localización óptima de las estaciones de recarga de hidrógeno que suministren a flotas de vehículos, se han fijado unos criterios de decisión y se han acompañado de unos pesos (ξ_{IMD} , $\xi_{\text{accesibilidad}}$, $\xi_{\text{d.población}}$, ξ_{rutas} , $\xi_{\text{comercial}}$, $\xi_{\text{industrial}}$, ξ_{PGOU}).

2.2.1.1. Intensidad Media Diaria

Se denomina intensidad media diaria anual (IMD) al número de vehículos que pasan por un vial durante un año, dividido por 365. Puede considerarse como la intensidad de tráfico que corresponde al día medio del año.

El sistema analiza los datos referentes a los IMD de las diferentes vías y las resalta mediante una traza de color azul de un grosor mayor cuanto mayor es el valor de IMD de la vía:

- IMD > 100.000
- IMD entre 60.000 y 100.000
- IMD entre 20.000 y 60.000

A continuación, tal y como se muestra en la Figura 3, el sistema resalta un área en torno a las vías de mayor IMD, de forma que la mayor distancia a la vía sea de 200 metros. Esta

área será considerada como zona de preferencia (representadas en verde en las figuras) a la hora de ubicar una estación de suministro.

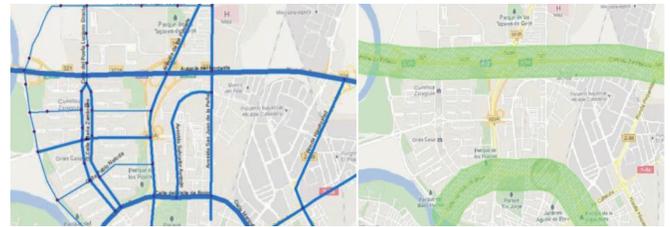


Fig. 3: Representación de los principales viales con clasificación según IMD y selección de zonas de preferencia

2.2.1.2. Accesibilidad

Criterio basado en la localización de los puntos de la red viaria en los que se producen intersecciones, incorporaciones y cruces de vías con IMD elevado, con el fin de facilitar los accesos a las estaciones de servicio.

El sistema realiza el análisis de las tablas asociadas a las vías y localiza aquellos nodos con IMD elevado que pertenecen a más de una vía. Una vez localizados, se crea una nueva capa en la que se representan tantas zonas de preferencia, como cruces de vías con IMD elevado existan en la zona geográfica en estudio. Tal y como se muestran en la Figura 4, estas zonas de preferencia serán circulares con centro en las intersecciones y un radio de 400 metros.



Fig. 4: Representación de las zonas de preferencia debido a la existencia de cruces de vías

2.2.1.3. Rutas transporte urbano

Se tienen en cuenta las rutas fijas seguidas por las líneas de autobús o tranvía que forman parte del transporte urbano. Se necesita disponer de la geolocalización de las paradas bajo el sistema de referencia de *Google* e identificación de inicio y fin de línea. El sistema identifica los puntos donde más líneas de transporte urbano confluyen y los puntos que representan inicio o final de parada como puntos posibles de ubicación de la nueva instalación. Se crea una nueva capa en la que se representa en estos puntos un área circular de preferencia con radio 150 metros.

Se plantea la posibilidad de realizar en cada uno de los principios y finales de línea, un estudio del número de vehículos/hora que concurren en estos puntos, y añadir este dato a su tabla de atributos asociada, posibilitando la modificación del radio del área de preferencia en función de si el número

de vehículos/hora es mayor o menor. A mayor número, mayor consumo de hidrógeno y mayor prioridad se dará a estas ubicaciones, traduciéndose en un aumento del radio del área de preferencia.

2.2.1.4. Parcelas según el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU)

Para que sea posible la construcción de las estaciones de suministro de hidrógeno, el terreno en el que irá situada debe ser clasificado como urbanizable en el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de la zona en estudio.

El sistema analizará los datos asociados a las parcelas referentes al tipo de suelo y creará una nueva capa en la que se representarán aquellas parcelas urbanizables disponibles.

Todas las áreas de preferencia generadas hasta el momento que no coincidan con éstas, o con las referidas a los polígonos industriales (que también son urbanizables) deben ser penalizadas. Esta penalización viene reflejada en los pesos otorgados a cada uno de los criterios de decisión.

2.2.1.5. Zonas residenciales

Debido a la naturaleza del hidrógeno, se recomienda que los emplazamientos donde se prevea situar las estaciones de suministro de este elemento satisfagan unos criterios de seguridad. Entre estas medidas de seguridad se proponen, al igual que ocurre cuando existen zonas comerciales, distancias mínimas a guardar entre las hidrogeneras y las zonas habitadas.

Se ha interpuesto una restricción por la que a menos de 300 metros de las zonas catalogadas como residenciales no sea permitida la ubicación de una estación de suministro de hidrógeno. Este perímetro de seguridad supera a los estipulados en diversos estudios analizados; por ejemplo, en [12] se establece un perímetro de seguridad de 200 metros.

La clasificación según densidad demográfica también es útil a la hora de determinar las ubicaciones óptimas. Cuanto mayor sea la densidad de población, mayor probabilidad existe que la densidad de tráfico sea mayor. Se comprueba así que la densidad de población guarda una estrecha relación con el IMD de las vías.

Tal y como se muestra en la Figura 5, se creará una nueva capa con zonas de exclusión (en rojo) que comprenderán las zonas urbanas residenciales, más un perímetro de seguridad de 300 metros.

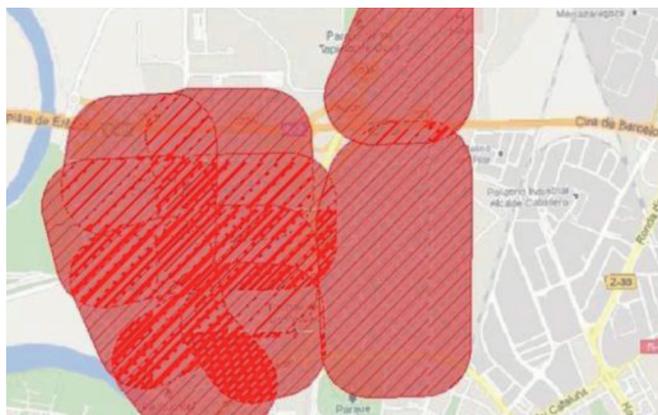


Fig. 5: Representación de las áreas de exclusión generadas a partir de las zonas residenciales

2.2.1.6. Zonas comerciales

Las zonas comerciales suelen actuar como un elemento concentrador de tráfico. Por un lado atrae a grandes cantidades de clientes y visitantes, y por otro crea en su entorno un flujo permanente de trabajadores y transporte de mercancías.

Una vez introducida la localización de las zonas de mayor actividad comercial, se creará una nueva capa en la que se presenta un área de exclusión (en rojo) con un perímetro de 500 metros entorno a la zona comercial. No obstante, debido a la alta concentración de tráfico que se genera en su entorno, el sistema representa a su vez una nueva área de preferencia (en verde). Tal y como se muestra en la Figura 6, esta nueva área tendrá forma de corona con una anchura de 200 metros en torno al área de exclusión indicada.

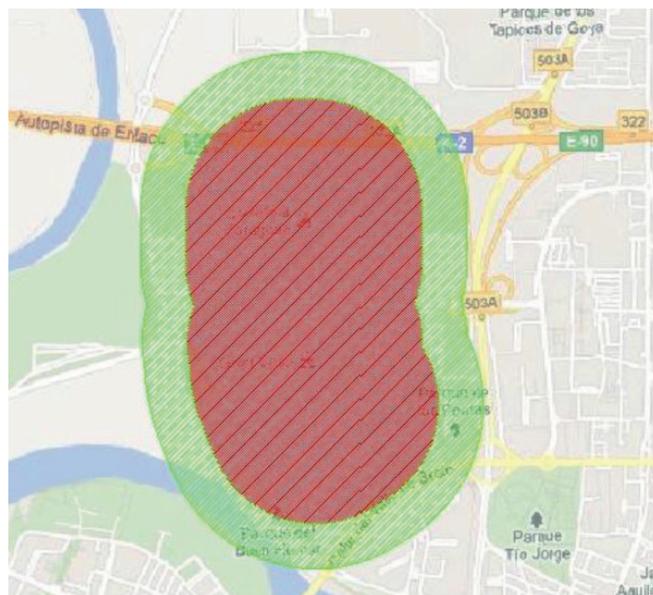


Fig. 6: Representación de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) motivadas por la presencia de zonas con actividad comercial elevada

2.2.1.7. Polígonos industriales

Al igual que las zonas comerciales, los polígonos industriales se caracterizan por contar en su entorno con un elevado movimiento de vehículos. Por un lado atrae a grandes cantidades de clientes, y por otro, crea en su entorno un flujo permanente de tráfico de trabajadores y de mercancías.



Fig. 7: Polígonos industriales existentes en la zona de estudio

Una vez introducida la localización de los polígonos industriales, según se observa en la Figura 7, el sistema crea una nueva capa en la que se representan tantas áreas de preferencia en las que ubicar las hidrogeneras como polígonos industriales existan.

2.2.2. Selección de ubicación óptima

Una vez analizados todos los criterios de decisión, se procede a la selección de las ubicaciones óptimas. A partir de los criterios de decisión, se generan las capas que representan las áreas de exclusión (rojo) y preferencia (verde) para la ubicación de las hidrogeneras. Las áreas de preferencia que se superponen a las de exclusión son desestimadas automáticamente.

Cada criterio de decisión viene acompañado por unos pesos que se utilizarán para decidir de entre todas las posibles, la localización de las ubicaciones más óptimas. Debido a que las zonas comerciales generan dos áreas: una interior de exclusión y otra exterior de preferencia, se asocian dos pesos diferentes: $\xi_{comercial1}$ y $\xi_{comercial2}$ respectivamente. En la Tabla 2 se resumen los criterios de decisión, su identificador y su peso asociado. La Tabla 3 resume los valores asignados a los pesos asociados a los diferentes criterios de decisión.

Criterio de decisión	Factor de área	Peso
IMD	C_{IMD}	ξ_{IMD}
Accesibilidad	$C_{accesibilidad}$	$\xi_{accesibilidad}$
Rutas de transporte urbano	C_{rutas}	ξ_{rutas}
Zonas comerciales (área interior exclusión)	$C_{comercial1}$	$\xi_{comercial1}$
Zonas comerciales (área exterior de exclusión)	$C_{comercial2}$	$\xi_{comercial2}$
Polígonos industriales	$C_{industrial}$	$\xi_{industrial}$
PGOU	C_{PGOU}	ξ_{PGOU}
Densidad de población	$C_{d,población}$	$\xi_{d,población}$

Tabla 2: Resumen criterios de decisión y pesos asociados

Los pesos de los criterios que impliquen la creación de áreas de preferencia, tomarán valores positivos. El valor de estos oscilará entre 0 y 1, pero, tal como viene reflejado en la Fórmula 6, deberán cumplir que la suma de ellos será igual a 1. La ubicación considerada como ideal tomaría este valor.



Fig. 8: Criterios de decisión introducidos sobre el mapa base y las áreas de exclusión y de preferencia generadas

Peso	Valores
ξ_{IMD}	0,05
$\xi_{accesibilidad}$	0,05
ξ_{rutas}	0,05
$\xi_{comercial1}$	-1
$\xi_{comercial2}$	0,05
$\xi_{industrial}$	0,4
ξ_{PGOU}	0,4
$\xi_{d,población}$	-1

Tabla 3: Valores asignados a los pesos asociados a los diferentes criterios de decisión

Los pesos asociados a los criterios de decisión que toman valor positivo son: IMD (ξ_{IMD}), Accesibilidad ($\xi_{accesibilidad}$), Rutas de transporte urbano (ξ_{rutas}), Zonas comerciales ($\xi_{comercial2}$), Polígonos industriales ($\xi_{industrial}$) y PGOU (ξ_{PGOU}).

$$\xi_{IMD} + \xi_{accesibilidad} + \xi_{rutas} + \xi_{comercial2} + \xi_{industrial} + \xi_{PGOU} = 1 \quad (6)$$

Los pesos de los criterios que impliquen la creación de áreas excluyentes tomarán el valor (-1).

Los pesos asociados a los criterios de decisión que toman valor negativo son: Zonas comerciales ($\xi_{comercial1}$) y Densidad de población ($\xi_{d,población}$).

Para determinar el orden de prioridad de las posibles ubicaciones para las nuevas instalaciones, el proceso a seguir es el siguiente:

- a) sumatorio de los productos de los factores de área (C_i) por sus pesos asociados en las zonas donde se superponen áreas de preferencia, lo cual catalogará a la zona con un número que denominamos Grado de Decisión (Fórmula 7):

$$\text{Grado de Decisión} = \sum_i^j (C_i * \xi_i) \quad (7)$$

Los factores de área C_i correspondientes a los diferentes criterios de decisión tomarán el valor 1 o 0, en función de si el sistema reconoce áreas de exclusión o preferencia en las zonas de estudio.

Según el criterio establecido, para que un área sea considerada como posible, el *Grado de Decisión* debe ser mayor o igual a 0,4. En el caso de que sea igual o menor a cero, el área se desestima automáticamente al estar afectada por un área de exclusión. En el caso de que el resultado se encuentre entre 0 y 0,4 (ambos valores no incluidos), significa que la zona no es urbanizable.

- b) Cuando el *Grado de Decisión* resulta mayor o igual a 0,4, a mayor valor de este número, más óptima será la posible ubicación.

3. RESULTADOS

Aplicando la herramienta web desarrollada, la opción más económica de las viables técnicamente para el caso de vehículos que almacenen el hidrógeno en forma de gas a alta presión, es la que contempla una infraestructura basada en el abastecimiento exterior de hidrógeno en estado gas.

Los resultados intermedios obtenidos en la herramienta web de cálculo que se refieren al número de hidrogeneras a instalar y sus dimensiones (en función de los equipos y tecnologías que montarán), serán los datos de partida a utilizar por la metodología GIS desarrollada para determinar su ubicación óptima de entre las posibles.

Tal y como se muestra en la Figura 9, como resultado de la metodología seguida mediante el sistema GIS, se obtendrán unas áreas en verde que representan las zonas en las que es viable ubicar las nuevas instalaciones y que resultan de la superposición de áreas de preferencia generadas por los diferentes criterios de decisión.



Fig. 9: Representación de las zonas más óptimas para la localización de las estaciones de suministro de hidrógeno

4. DISCUSIÓN

Con la metodología expuesta en el presente artículo es posible determinar por un lado, el tamaño óptimo y número de instalaciones de repostaje de hidrógeno a construir, y la opción tecnológica más adecuada en función de criterios técnicos y económicos; y complementariamente, obtener una clasificación de las posibles ubicaciones para estas instalaciones dentro de un área determinada. De esta forma se proporciona una solución global que sirve como herramienta de ayuda a la toma de decisiones para los encargados de gestionar este tipo de instalaciones.

En otros estudios también se ha tratado de dar respuesta a los diferentes problemas expuestos en este artículo, pero no se ha detectado ninguna metodología que abarcara todo el problema completo. Por ejemplo, existen modelos que analizan las diferentes alternativas de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno y calculan el coste capital de las infraestructuras y el transporte del hidrógeno para cada una

de las opciones estudiadas [13], o que analizan y comparan cualitativamente los sistemas de producción y distribución para diferentes escenarios de demanda y temporales [14]. El problema de la ubicación de la red de estaciones de hidrógeno habitualmente es tratado como un simple problema de localización de instalaciones en una red de carreteras o como si se tratara de un subconjunto de la red de gasolineras existente [15, 16, 17]. Otras soluciones utilizan el problema del “*fuel travel back*”, basada en la premisa de que por donde más se conduce es donde va a surgir la necesidad de repostar [18].

Los sistemas GIS también son utilizados, pero contrariamente a lo que se pretende en este estudio, no se relacionan con el dimensionamiento y optimización técnica y económica de las instalaciones. Por ejemplo, existen modelos que combinan un sistemas GIS y algoritmos genéticos para tratar datos, analizar escenarios, introducir supuestos y obtener resultados en un mapa; en [19] se diseña una red de infraestructuras de hidrógeno introduciendo una red de carreteras con sus límites de velocidad, los volúmenes de flujo entre cada origen y destino, la máxima distancia posible entre hidrogeneras y el número de instalaciones a construir. No obstante, el número de criterios utilizados es inferior al considerado en el presente estudio.

En [20] se hace una revisión de los factores que intervienen en la introducción del hidrógeno en el sector transporte y se identifican el precio del hidrógeno, los costes capitales de la infraestructura, el papel de las administraciones y los factores de capacidad (modos de producción y transporte del hidrógeno en función de los ratios de penetración de estas tecnologías) como los más determinantes; factores que también son considerados de forma relevante en este estudio.

5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite obtener unas configuraciones iniciales sobre la infraestructura de hidrógeno necesaria para cubrir las necesidades de una nueva flota de transporte basada en el hidrógeno. Estas soluciones, ordenadas por criterios técnicos y económicos, son de gran ayuda en la etapa inicial de toma de decisiones.

La incorporación de esta metodología a una herramienta web que disponga de una base de datos con diferentes modelos para los equipos presentes en las diferentes combinaciones de tecnologías, permite obtener los resultados de forma rápida; facilitando el análisis de las diferentes soluciones y la realización de cambios en las combinaciones tecnológicas obtenidas para lograr la solución óptima en coste y eficiencia.

Dato imprescindible previo a determinar la dimensión óptima de las estaciones de repostaje de hidrógeno es la demanda diaria de hidrógeno prevista. Es posible determinarla a partir de:

- Las previsiones de demanda de la flota de vehículos, públicos o privados, que van a utilizar hidrógeno en un horizonte temporal determinado. Opción estimativa que se basa en la asignación de la demanda en función del número de vehículos de cada tipo: turismos, furgonetas, autobuses o camiones.
- El estudio y diseño de las rutas a seguir por los vehículos, en el caso de tratarse de flotas cautivas o privadas con

recorridos conocidos. Al tratarse de recorridos conocidos permite alcanzar unas estimaciones de la demanda mucho más cercanas a la realidad.

A la hora de diseñar la herramienta de cálculo, el punto en el que hay que hacer especial hincapié, por su alta sensibilidad tanto en el aspecto técnico como económico, es el tipo de abastecimiento de hidrógeno a la estación. Depende de cuatro variables: el coste, la demanda, la ubicación de las instalaciones y la seguridad de abastecimiento.

Un sistema GIS que plasme la modelización del sistema de transporte y una serie de criterios de decisión ayudan a determinar el tamaño, características y localización de la red de estaciones de repostaje de hidrógeno que minimiza las función de coste y hace máximas las de operatividad y funcionalidad.

AGRADECIMIENTOS

La metodología presentada en este trabajo se ha desarrollado dentro del contexto del proyecto EcoTrans “Tecnologías Ecológicas para el Transporte Urbano”, encuadrado dentro del proyecto CENIT 2008/0712 del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial del Ministerio español de Ciencia y Tecnología, cuyo líder es CAF y en el que han participado un consorcio de más de 20 empresas e instituciones, entre ellas IDOM.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chaitanya K. “Rapid economic growth and industrialization in India, China & Brazil: at what cost?”. William Davidson Institute. October 2007. Working Paper N° 897. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1087333> .
- [2] Tsoskounoglou M, Ayerides G, Tritopoulou E. “The end of cheap oil: Current status and prospects”. Energy Policy. October 2008. Vol.36-10. p.3797-3806. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.011> .
- [3] U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Review 2011.
- [4] IEA Statistics. CO₂ emissions from fuel combustion-Highlights. IEA Publications 2013 Edition.
- [5] Andrews J, Shabani B. “Re-envisioning the role of hydrogen in a sustainable energy economy”. International Journal of Hydrogen Energy. January 2012. Vol.37-2. p.1184-1203. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.137> .
- [6] Doll C, Wietschel M. “Externalities of the transport sector and the role of hydrogen in a sustainable transport vision”. Energy Policy. November 2008. Vol.36-11. p.4069-4078. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.027> .
- [7] Balla M, Wietschel M. “The future of hydrogen – opportunities and challenges”. International Journal of Hydrogen Energy. January 2009. Vol.34-2. p.615-627. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014> .
- [8] The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report 2010.
- [9] Haman K, Stiever E. “Literature Review of Hydrogen Production, Storage, Distribution, and Utilization Technologies: Executive Summary”. July 2007.
- [10] Wang M, Mintz M. “Benefits and Costs of Hydrogen Fuels”, Argonne National Laboratory, January 2003.
- [11] IEA Energy Technology Essentials. 2007 Edition
- [12] LaChance J. “Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations”. International Journal of Hydrogen Energy. July 2009, Vol.34-14. p.5838-5845. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.070> .
- [13] Ogden J. “Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study”. International Journal of Hydrogen Energy. August 1999, Vol.24-8, p.709-730. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00131-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00131-1) .
- [14] Markert F, Nielsen S, Paulsen J, et al. “Safety aspects of future infrastructure scenarios with hydrogen refueling stations”. International Journal of hydrogen Energy. September 2007, Vol.32-13, p.2227-2234. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.011> .
- [15] Kuby M, Lim S, “The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles”. Socio-Economic Planning Sciences. June 2005. Vol.39-2. p.125-145. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2004.03.001> .
- [16] Wang YM, Lin CC. “Locating road-vehicle refueling stations”. Transportation Research Part E. September 2009. Vol.45-5. p.821-829. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.03.002> .
- [17] Wang YM, Wang CR. “Locating passenger vehicle refueling stations”. Transportation Research Part E. September 2010. Vol.46-5. p.791-801. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.12.001> .
- [18] Lin Z, Ogden J, Fan Y et al. “The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting”. International Journal of Hydrogen Energy. June 2008. Vol.33-12. p.3096-3101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.01.040> .
- [19] Kuby M, Lines L, Schultz R et al. “Optimization of hydrogen stations in Florida using the Flow-Refueling Location Model”. International Journal of Hydrogen Energy. August 2009. Vol. 34-15. p.6045-6064. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.050> .
- [20] Agnolucci P. “Hydrogen infrastructure for the transport sector” International Journal of Hydrogen Energy, October 2007. Vol.32-15. p.3526-3544. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.016> .