

*CENTRO: FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. LEIOA
O
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION. SANTANDER*

*TITULO: REVISIÓN DE LOS ESTUDIOS BASADOS EN ANALISIS
DE CICLO DE VIDA APLICADOS A LA TECNOLOGIA DE PILAS
DE COMBUSTIBLE*

TRABAJO FIN DE MASTER (TFM)

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA QUIMICA
POR LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Y LA UNIVERSIDAD DEL
PAÍS VASCO/EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA

Alumno Paula Cabezón Rodríguez

Fecha 20/07/2017

Firma

**Directores:
María Margallo Blanco
Antonio Domínguez Ramos**

**Curso Académico
2016- 2017**

Agradecimientos:

Me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a mis directores de proyecto, Antonio Domínguez Ramos y María Margallo Blanco, por su trabajo, dedicación y por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo de fin de master.

Finalmente, me gustaría dar las gracias a mi familia y mis amigos por su apoyo durante todo este periodo sin el cual no habría podido conseguirlo.

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS	6
3. METODOLOGIA	7
4. RESULTADOS	9
4.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS ESTUDIOS	9
4.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	9
4.3 ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE PILA DE COMBUSTIBLE	12
4.4 ANÁLISIS DE VIDA ÚTIL	15
4.5 ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE COMBUSTIBLE Y LAS FUENTES DE GENERACIÓN PRINCIPALES	16
4.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	18
4.6.1 Definición de objetivos	18
4.6.2 Unidad Funcional	18
4.6.3 Límites del sistema	19
4.6.4 Bases de datos	21
4.6.5 Análisis de impactos ambientales	23
5. CONCLUSIONES	27
6. RECOMENDACIONES DE TRABAJOS FUTUROS	29
7. BIBLIOGRAFIA	30
ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Marco de referencia de ACV según ISO	5
Figura 2. Diagrama de revisión bibliográfica	8
Figura 3. Año de publicación de los estudios analizados	9
Figura 4. Localización geográfica de los estudios analizados	10
Figura 5. Cuantificación del tipo de pilas de combustible analizadas	13
Figura 6. Tecnologías de obtención de hidrógeno analizadas	17
Figura 7. Límites del sistema estudiados	20
Figura 8. Cuantificación de los softwares más utilizados	22
Figura 9. Cuantificación de los métodos de evaluación de impactos más utilizados	22

Figura 10. Impactos ambientales estudiados en los análisis	24
--	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de pilas de combustible y sus características principales	12
--	----

Tabla A1. Características de los artículos revisados.....	.
---	---

Tabla A2. Unidades Funcionales definidas en los estudios.....	.
---	---

RESUMEN

La problemática originada por la re-definición del futuro de los derivados del petróleo para su uso como combustible de vehículos automóviles y el hecho de que los vehículos de celda de combustible están recibiendo cada vez más atención como tecnología para reducir la dependencia del sector del transporte del petróleo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han disparado el interés en los mismos en los últimos años. Sin embargo, para poder hacer una comparación ambiental cuantitativa entre los vehículos con motor de combustión interna y los vehículos con pilas de combustible, es preciso utilizar una herramienta como el análisis de ciclo de vida (ACV).

Para ello, este estudio ha completado una revisión bibliográfica, en base a una revisión crítica de 34 artículos científicos referente a la aplicación de la metodología de ACV a la tecnología de pilas de combustible, en concreto a vehículos, analizando los diferentes puntos de interés. Los resultados observados hacen referencia a la preferente utilización de pilas de combustible de intercambio protónico (PEMFC) y a su viabilidad en vehículos en comparación con las pilas alcalinas (AFC) o las pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC). Se ha constatado que es posible analizar diferentes unidades funcionales, dependiendo de cuales sean los límites del sistema: vehículo, potencia, energía, distancia recorrida y área de membrana. Así mismo, se ha demostrado que los impactos ambientales que más se analizan son el cambio climático (GWP), la acidificación terrestre (TAP) y la toxicidad humana (HTP).

ABSTRACT

The problematic due the re-definition of the future of oil spills for use as fuel for motor vehicles and that fuel cell vehicles are receiving increasing attention as technology to reduce dependence on the oil transport sector and reduce the emissions of greenhouse gases at the same time has made interest grow in the last years. However, to make a quantitative environmental comparison between vehicles with internal combustion engines and vehicles with fuel cells, a tool such as life cycle analysis (LCA) must be used.

For this purpose, this study has done a thorough bibliographical work, based on a critical review of 34 scientific articles regarding the application of the ACV methodology to fuel cell technology, specifically to vehicles, analysing the different points of interest. The observed results refer to the preferential use of proton exchange fuel cells (PEMFCs) and their viability in vehicles compared to alkaline fuel cells (AFCs) or phosphoric acid fuel cells (PAFCs). It has been found that it is possible to analyse different functional units, depending on the limits of the system: vehicle, power, energy, distance travelled and membrane area. Also, it has been shown that the environmental impacts most analysed for this technology are climate change (GWP), terrestrial acidification (TAP) and human toxicity (HTP).

1. INTRODUCCIÓN

El suministro de energía en los últimos años ha sido impulsado por diferentes factores, en particular los avances tecnológicos que han aumentado la gama y la disponibilidad de diferentes combustibles. La combinación del lento crecimiento de la demanda y el cambio en la mezcla de combustible del carbón al gas natural y a la energía renovable está teniendo implicaciones importantes para las emisiones de carbono (BP Statistical Review of World Energy ,2016).

En este sentido, son muchos los estudios que alertan del agotamiento de las reservas de combustibles fósiles. Además, el balance esperado entre oferta y demanda determinan la tendencia a largo plazo del precio del petróleo, mientras que a más corto plazo también se deja sentir la influencia de los cambios de percepción y de expectativas en el mercado, en ocasiones motivados por acontecimientos geopolíticos y las decisiones de la Organización de países exportadores de petróleo (OPEP), hace que no se vea un techo claro a su precio (Carpio, 2015).

Por otro lado, el continuo deterioro de la atmósfera debido a las emisiones de gases de efecto invernadero, como el CO₂, parece hacer mella en ciclos climáticos y está llevando a las sociedades avanzadas a formalizar su compromiso para limitar dichas emisiones mediante la firma del Tratado de París que establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del Calentamiento Global, siendo su aplicabilidad para el año 2020, cuando finaliza la vigencia del Protocolo de Kioto (European Comission, 2017). Cabe señalar que el sector del transporte consume el 61,2% de las reservas mundiales de petróleo, contribuyendo con el 28% del suministro total de energía final y el 23% de las emisiones de CO₂ en el mundo. Por esta razón, se están realizando investigaciones adicionales para sistemas de transporte sostenibles que permitan disminuir el uso de combustibles fósiles y promover el uso de combustibles alternativos como hidrógeno y metanol junto con vehículos eléctricos (Bicer & Dincer, 2017).

Como alternativa, los vehículos de celda de combustible están recibiendo cada vez más atención como tecnología potente y poderosa para reducir la dependencia del sector

del transporte del petróleo y reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero al mismo tiempo. Los sistemas de celdas de combustible tienen altas eficiencias, especialmente a cargas parciales y tienen el potencial para un mayor desarrollo en la construcción de sistemas sencillos con larga vida debido a muy pocas piezas móviles (Folkesson et al., 2003). La mejora de la calidad del aire urbano, las preocupaciones por el cambio climático y la resistencia a depender de fuentes no renovables han sido las principales motivaciones para el desarrollo de estas tecnologías de celdas de combustible y sus aplicaciones en vehículos de celdas de combustible (Contadini et al., 2002).

Los vehículos de células de combustible a base de hidrógeno (FCVs) se consideran un sustituto potencial de los vehículos con motor de combustión interna basados en fósiles (ICEVs), que podrían reducir los impactos ambientales del transporte (Miotti et al., 2017) ya que los biocarburantes son una alternativa transitoria, pues el bioetanol sólo es un aditivo de la gasolina y el biodiésel un sustituto del diésel, pero no implican un cambio drástico de la tecnología, sólo un sustituto temporal (Bueno, 2007). La pila de combustible (*fuel cell*) parece la solución más convincente. Sin embargo, es necesario evaluar las ventajas y desventajas de estas nuevas alternativas tanto desde un punto de vista técnico-económico como ambiental.

Para ello, una de las técnicas más utilizadas a nivel ambiental es el análisis de ciclo de vida (ACV), que permite evaluar los impactos ambientales y económicos de un producto o un proceso en su vida (The International Standards Organisation, ISO 14040, 2006). El ACV también se conoce como una evaluación "de la cuna a la tumba" de los sistemas, que van desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, el uso del producto y el reciclaje/eliminación final. El principal objetivo de ACV es la compilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales de un sistema de productos durante su ciclo de vida (The International Standards Organisation, ISO 14040, 2006). Esta metodología ha sido ampliamente aplicada en la evaluación ambiental del sector de transporte. Debido a que diferentes sistemas de transporte y opciones de vehículos podrían operar utilizando diferentes combustibles, es un desafío importante desarrollar políticas adecuadas para apoyar combustibles alternativos con el fin de reducir las emisiones en cada jurisdicción y mercado específicos (Ahmadi &

Kjeang ,2016). Por lo tanto, es esencial realizar un análisis de ciclo de vida completo para vehículos y combustibles basados en las condiciones locales pertinentes.

El ACV regido por la normativa ISO 14040:2006 describe los principios y el marco de referencia del ACV entre los que se encuentran como se indica en la Figura 1: la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV), la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida, el informe y la revisión crítica, limitaciones y la relación entre las fases del ACV (The International Standards Organisation, ISO 14040, 2006).



Figura 1. Marco de referencia de ACV según ISO

El análisis de inventario implica la recolección de datos y el procedimiento de cálculo para cuantificar las entradas y las salidas y productos pertinentes (en este estudio no se realizará análisis de inventario). Una vez desarrollado el inventario se transforma en categorías de impacto en la fase de evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV). La EICV consta de dos etapas obligatorias, clasificación y caracterización, y dos opcionales la normalización y la ponderación. En dos primeras fases se definen las categorías de impacto a estudiar, como el calentamiento global o acidificación, y mediante factores se determina la contribución de diferentes sustancias a esa categoría de impacto. En la cuarta etapa, se lleva a cabo la interpretación, las observaciones del análisis de inventario y la evaluación de impacto se combinan para formular recomendaciones o sacar conclusiones (The International Standards Organisation, ISO 14040, 2006).

2. OBJETIVOS

Tal y como se detalla posteriormente existe un número importante de trabajos científicos publicados que han aplicado la metodología de ACV para evaluar el comportamiento ambiental de diferentes tipos de pilas de combustible. Varios de ellos han abordado también una revisión de los mismos. Sin embargo, ninguno de los realizados hasta la fecha ha sido capaz de abordar en su conjunto los diferentes puntos de interés para abordar un estudio de ACV: identificación de límites del sistema, unidad funcional, indicadores de impacto, bases de datos y software empleado. Si bien varios comentan en cierta extensión algunos de ellos, no existe una descripción analítica de todos los elementos claves que configuran un estudio de esta clase.

El objetivo de este trabajo fin de máster es la revisión de la literatura referente a la aplicación de la metodología de ACV a la tecnología de pilas de combustible, en concreto a vehículos. Para ello, se ha completado una importante labor bibliográfica, en base a una revisión crítica de 34 artículos científicos, de los cuales 24 son artículos propios de ACV y los 10 restantes contienen aspectos relevantes para su realización. La novedad del presente trabajo radica por tanto en aportar conclusiones respecto a los elementos clave de un estudio de ACV (límites del sistema, unidad funcional, bases de datos y software, indicadores de impacto) aplicado a la tecnología de pilas de combustible. Este trabajo se ha desarrollado principalmente en torno a 3 tipos de pila de combustible: 1) pilas de intercambio protónico o pilas de membrana polimérica (PEMFC), entre las que están las pilas de intercambio protónico de alta temperatura, 2) pilas alcalinas (AFC) y 3) pilas de ácido fosfórico (PAFC). Todas ellas estudiadas para ver si pueden ser potencialmente aplicadas al sector de la automoción tanto en vehículos ligeros como vehículos pesados. Los vehículos que emplean baterías eléctricas quedan fuera del presente estudio.

3. METODOLOGIA

Este trabajo presenta una revisión de 34 estudios centrados en la tecnología de pilas de combustible aplicados a la tecnología de la automoción, para vehículos tanto ligeros como pesados disponibles hasta el año 2017. De los 34 artículos, 24 son propiamente ACVs, mientras que los 10 restantes se circunscriben a aspectos transversales pero de interés para el presente estudio.

Los estudios se recogen en la Tabla A1 en el apartado de Anexos y se han seleccionados de entre los disponibles en la bibliografía aquellos que (1) se centran en la tecnología de pilas de combustible para vehículos, excluyendo los vehículos híbridos; (2) analizan varios puntos de análisis de ciclo de vida; (3) incluyen la etapa de evaluación de impacto; (4) están publicados en revistas internacionales. Los estudios que no reunieron las cuatro condiciones se excluyeron en la revisión.

El enfoque adoptado para recopilar los estudios como se puede observar en la Figura 2. consistió en realizar una búsqueda con ayuda de la base de datos “Web of science” y “Scopus”. Las palabras claves se fueron variando en función del número de artículos encontrados, en una primera selección las palabras claves atendieron a: “*life cycle*”, “*fuel cell*” y “*vehicle*”. Refinando la búsqueda solo a “*reviews*” el buscador nos proporciona un total de 45 artículos. Entre los 45 artículos, la mayoría son descartados puesto que no estudian pilas de combustible si no baterías eléctricas. Los años de publicación de estos estudios se centran sobre todo en los últimos años, con 7 artículos tanto en el año 2016 como en el 2015, ya que es un tema innovador en el sector de la automoción y un progreso para el medio ambiente.

Se realizó una segunda selección para obtener artículos más concretos y diferentes a los encontrados en la búsqueda anterior. En este caso, las palabras claves fueron: “*life cycle*”, “*fuel cell*”, “*car*” y “*PEM*”. Fueron encontrados 4 artículos, de los cuales, uno de ellos fue descartado ya que se centraba en baterías, no en pilas de combustible. Atendiendo a la búsqueda por los diferentes tipos de pila de combustible y con las palabras clave: “*Alkaline fuel cell*”, “*Phosphoric-acid fuel cell*”, “*Molten carbonate fuel cell*”, “*Solid oxide fuel cell*” y “*life cycle*” se encuentran 5 artículos aptos para el estudio.

El enfoque adoptado para realizar una búsqueda más exhaustiva y recuperar los estudios para ACV en la literatura científica consistió en analizar la bibliografía de los artículos anteriores analizados para poder hacer un estudio del arte más amplio finalizando la búsqueda con un total de 34 artículos.

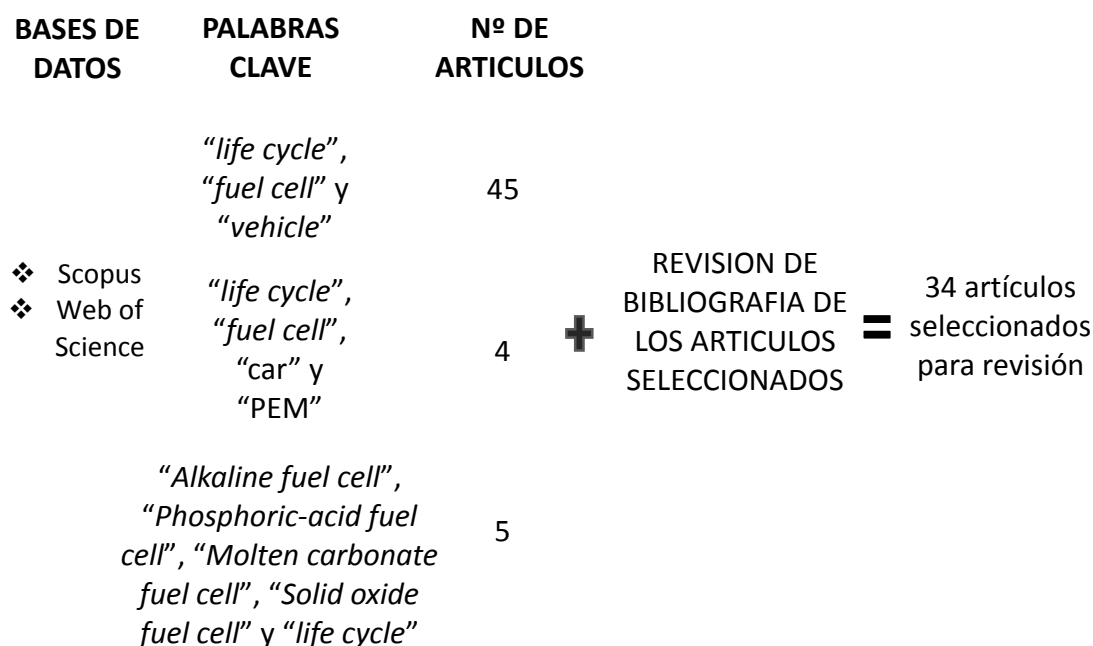


Figura 2. Diagrama de revisión bibliográfica

La sección de resultados del presente trabajo consta de los siguientes apartados en los cuales se realizará hincapié:

- Evolución temporal de los estudios
- Localización geográfica de los estudios
- Evolución temporal de los estudios
- Distribución de estudios en referencia a la tecnología de pilas de combustible
- Análisis de puntos del análisis de ciclo de vida
 - Definición de objetivos
 - Unidad funcional
 - Límites del sistema
 - Bases de datos
 - Análisis de los impactos ambientales

4. RESULTADOS

4.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS ESTUDIOS

Se ha realizado un análisis temporal observándose en la Figura 3 que en el 2003 hay un auge de estudios analizados, siguiéndole en año 2016 con otro pico de estudios analizados, con un promedio de dos artículos al año publicados. Es difícil determinar por qué se ve un aumento de estudios en estos dos años al ser un análisis de ciclo de vida. Se cree que habrá un aumento potencial de los estudios realizados en sobre esta tecnología ya que las pilas de combustible van a gozar de un gran desarrollo en los próximos años, pues no sólo van a impulsar su desarrollo los vehículos automóviles, sino varias otras aplicaciones.



Figura 3. Año de publicación de los estudios analizados

4.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La importancia de establecer los límites geográficos de las actividades a incluir en el ACV, ya que pueden ser afectadas por condiciones locales, hace que se realice un análisis geográfico de los 34 artículos analizados. El análisis geográfico se hace en base a la nacionalidad de los autores de los artículos. Como se muestra en la Figura 4, se puede

comprobar que el mayor número de estudios se localizan en Canadá y en Alemania con 6 publicaciones, seguido de China con 5 publicaciones.



Figura 4. Localización geográfica de los estudios analizados

Un gran número de estudios se han desarrollado en Canadá ya que el sector del transporte es responsable de un gran porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que Canadá es el segundo emisor principal de dióxido per cápita de carbono en el mundo, contribuyendo con un 2% a la emisión de GEI (Zamel & Li, 2006). La necesidad de combustibles alternativos, además del petróleo, y la necesidad de reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero son las principales razones detrás de estos estudios (Zamel & Li, 2006). Además, los FCVs han entrado recientemente a mercados selectos en los EE.UU. y Canadá, pionero por el Hyundai Tucson FCV disponible en 2015 (Ahmadi & Kjeang, 2016).

Finalmente, el uso de los combustibles principales utilizado en la tecnología de pila de combustible, el hidrógeno producido a partir del gas natural es abundante en Canadá y puede proporcionar un equilibrio razonable entre las reducciones de emisiones y los beneficios económicos para la implementación del FCV (Ahmadi & Kjeang, 2015).

Alemania al igual que Canadá, es ya uno de los países más avanzados en el campo de la pila de combustible y ya existen 34 estaciones de servicio en su territorio que surten hidrógeno para los vehículos. A los ya comercializados automóviles de pila de combustible *Mercedes B F-Cell*, *Hyundai ix35 Fuel Cell* y *Toyota Mirai*,⁷⁰, se sumarán pronto al mercado nuevos modelos desarrollados por fabricantes alemanes como BMW o el grupo Volkswagen (El economista, 2016).

Seguido de estos países se encuentra China, interesado en este tipo de tecnología debido a la escasez de crudo que se sufre en el país. El hidrógeno se produce principalmente a partir de fuentes fósiles, y la producción de electricidad en China depende en gran medida del carbón, con lo que están interesados en la sustitución de la generación de hidrógeno a partir de energías renovables que supondría un descenso en las emisiones de CO₂ (Dong et al., 2016).

En China, los vehículos representaron el 16% de las emisiones totales de GEI en 2009. En este contexto, se desea desarrollar vehículos más eficientes y limpios para reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones contaminantes (Dong et al., 2016).

Finalmente, en el análisis geográfico podemos comprobar que se ha despertado en Europa un gran interés por esta tecnología con un 62% de estudios publicados, ya que la UE importa actualmente el 50% de sus necesidades de petróleo, y, si no se hace nada, esta cifra se incrementará hasta un 70% en los próximos 20-30 años. Las tecnologías de hidrógeno y de las pilas de combustible podrían ser una parte integrante de futuros sistemas energéticos sostenibles. Esto contribuirá a la mejora de la seguridad energética y de la calidad del aire de Europa, a la vez que atenuará el cambio climático (European Commission Press Release Database, 2017).

4.3 ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE PILA DE COMBUSTIBLE

La tecnología de pilas de combustible está basada en el principio de reducción-oxidación de dos sustancias. Básicamente son sistemas electroquímicos que transforman la energía química de una reacción en energía eléctrica. A diferencia de una pila convencional, las pilas de combustible no se acaban ni tienen que ser recargadas. Mientras que se le suministre el combustible desde fuera de la pila esta seguirá funcionando. El inconveniente es el deterioro de las mismas con el tiempo. Las pilas constan de dos electrodos (ánodo y cátodo) en la célula que son unas placas de metal conductoras de electricidad que unen la parte no conductora de la célula con la conductora. Al electrodo ánodo llegan los electrones de la celda y ocurre la oxidación, mientras que el cátodo es el electrodo al cual llegan los electrones para reaccionar con el oxidante, y producir la reducción. Hay que tener en cuenta también en el funcionamiento de la pila que las reacciones no ocurren a la misma velocidad en un lado y otro de la pila. Así pues, la mayoría de las pilas de combustible requieren de la utilización de catalizadores (Asensio et al., 2011).

Las pilas de combustible pueden clasificarse en función de determinados parámetros: temperatura de trabajo, tipo de electrolito, tipo de ánodo, cátodo y matriz, rangos de potencia, eficiencia, tipo de combustible y aplicaciones, especificados en la Tabla 1. (Barreras & Lozano, 2012).

Tabla 1. Tipos de pilas de combustible y sus características principales

	Pilas de intercambio protónico (PEMFC)	Pilas Alcalinas (AFC)	Pilas de ácido fosfórico (PAFC)
Electrolito	Polímero sólido perfluorosulfonado	KOH	H ₃ PO ₄
Ánodo/Cátodo	Pt/C	Ni, AG, MeO	Pt/C
Matriz	Polimérica	Asbestos	SiC
Temperatura [°C]	80-95	70-100	150-200
Potencia [kW]	0-250	10-100	50-1000
Eficiencia [%]	55-58% transporte 25-35% estacionario	60	>40
Combustible	H ₂ /Metanol	H ₂	H ₂ /CH ₄

Aplicaciones	• Back up	• Militar	Domésticas
	• Transporte	• Aeroespacial	
	• Aplicaciones móviles		
	• Domesticas		

Los estudios analizados han seleccionado el tipo de pila de combustible en base a criterios de operación, rendimiento y sobre todo campo de aplicación.

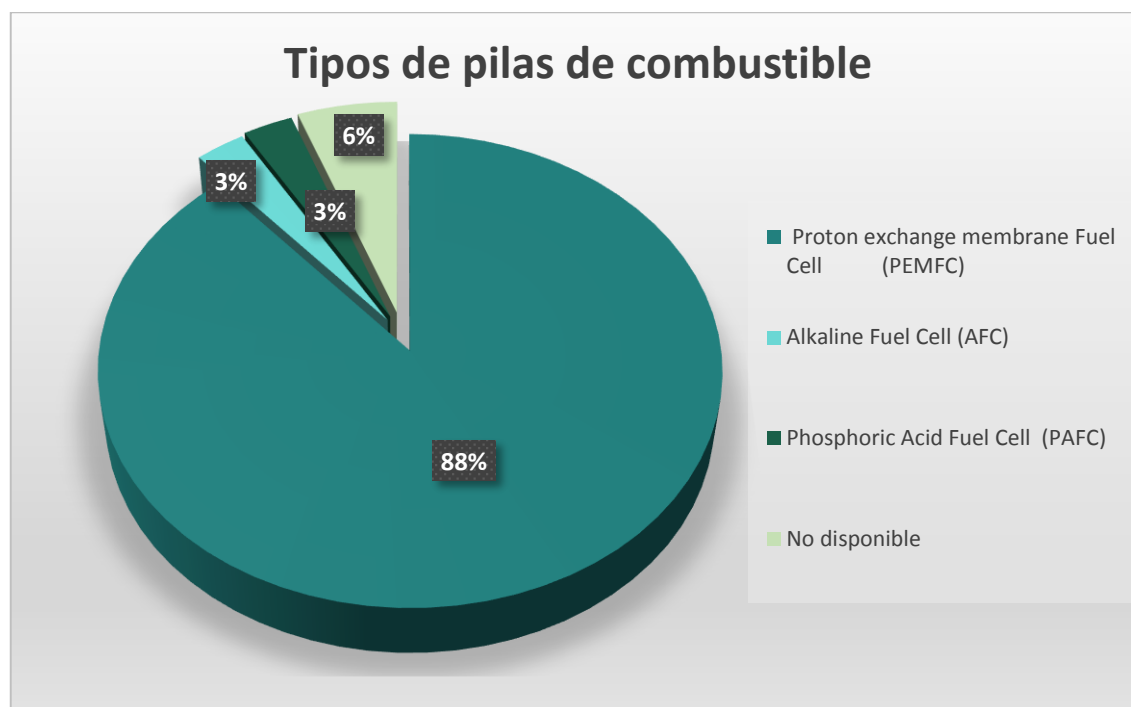


Figura 5. Cuantificación del tipo de pilas de combustible analizadas

Como se puede observar en la Figura 3 un 88% de los todos los estudios revisados y un 84% de los estudios que realizan análisis de ciclo de vida se centran en las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico o también llamadas pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC). El interés en las aplicaciones de PEMFC está creciendo rápidamente, especialmente debido al compromiso de los fabricantes de automóviles para desarrollar los coches impulsados por pilas de combustible (Pehnt, 2001).

Esto es debido a que las células de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) se consideran actualmente las más adecuadas para uso en vehículos, debido a que son simples, funcionan a temperaturas relativamente bajas (80-95 °C), tienen capacidad de arranque rápido y una respuesta rápida al cambio de carga, poseen

alto potencial de bajo coste y volumen, tienen alta eficiencia y alta densidad de corriente, y cuando utilizan el hidrógeno como combustible, tienen cero emisiones, además su aptitud para la operación en discontinuo se convierten en el candidato más prometedor y atractivo para el desarrollo de vehículos eléctricos (Simons & Bauer, 2015) (Zamel & Li, 2006) (Pei et al., 2008). Sin embargo, este tipo de pilas presentan también ciertas desventajas o inconvenientes que hace que otro tipo de pilas de combustible sean estudiadas y analizadas.

Este tipo de pilas utilizan electrodos porosos con platino como catalizador. Estos presentan cierto tipo de problemas ya que, en la actualidad, la demanda mundial de platino es constante (aproximadamente 200 toneladas al año), pero muy alta en comparación con las reservas de platino disponibles, estimadas en aproximadamente 10 kT (el total de recursos mundiales se estima en aproximadamente 40 kT) (Labbe & Dupuy, 2014). Supone un problema medioambiental ya que sólo el 17% del platino usado se recicla, además de un problema de costes ya que los costes de extracción representarían entre 30 y 40% de los costes de fabricación de celdas de combustible (Duclos et al., 2017). Otro de los problemas que presenta este tipo de pila es el tiempo de vida de la celda de combustible en su uso, y es también uno de los principales factores que obstaculizan su comercialización (Pei & Chen, 2014).

Un 3% de los estudios estarían enfocados por un lado al tipo de pilas alcalinas (AFC) y por otro lado a las pilas de ácido fosfórico (PAFC). Las pilas alcalinas, son pilas con alta densidad de corriente, trabajan a temperaturas relativamente bajas (70-100 °C) en rangos parecidos a las PEMFC y poseen alto rendimiento. Las pilas alcalinas tienen la principal desventaja de ser muy sensibles a contaminación por CO₂. Este suceso requiere de la purificación tanto de los tanques de hidrógeno como de oxígeno, siendo un proceso muy costoso y que hace que tenga menor durabilidad. Sus aplicaciones principales son aplicaciones espaciales, aplicaciones militares y recientemente han sido empleadas en instalaciones estacionarias de baja potencia. Las pilas de ácido fosfórico operan a una temperatura entre 150-200 °C. Su uso es muy apropiado para generación estacionaria o móvil de gran dimensión ya que tienen una eficiencia de hasta un 85%, tienen excelente estabilidad química, electroquímica y térmica y su fabricación es relativamente sencilla (O'Hayre et al., 2016). Las pilas PAFC producen menos energía

que otras pilas a igualdad de peso y volumen. Por este motivo, estas pilas normalmente son de gran tamaño y peso, y son más caras. Como ocurre en las PEMFC, estas pilas necesitan un catalizador de platino, lo que incrementa su coste. La naturaleza corrosiva del ácido limita la opción de materiales y acelera fenómenos de degradación. Este tipo de pila se usa normalmente en la generación de energía estacionaria, pero también se ha usado en vehículos pesados, como los autobuses urbanos (Hoogers ,2002). Con un 6% están los estudios que hacen referencia a las pilas de combustible, pero sin explicitar ninguna en particular.

Como conclusión se puede observar que el sector de la automoción está centrado en las pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC) ya que son las que más viabilidad tienen en este campo con un mayor número de estudios realizados.

4.4 ANÁLISIS DE VIDA ÚTIL

Una característica importante de la tecnología de pilas de combustible para vehículos es la durabilidad de las pilas y la distancia que pueden recorrer los vehículos con este tipo de tecnología. Un 60% de los artículos revisados hace referencia a la distancia que pueden recorrer los diferentes tipos de vehículo mientras que un 32% tienen en cuenta la durabilidad de pila combustible en sus estudios.

Realizando una revisión de los estudios las membranas de electrolito polimérico (PEMFC) que son las más analizadas para automoción y haciendo una media entre los distintos estudios se comprueba que tienen aproximadamente una distancia de recorrido de en torno a 122.000 km y una durabilidad de en torno a 32.000 h.

En cuanto a los otros tipos de pila, en los estudios de las pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) registra que los vehículos pueden alcanzar 180.000 km (rango parecido al de las pilas de combustible PEMFC) y no se hace referencia a la durabilidad de la pila en sí, en el tipo de pilas alcalinas (AFC) al contrario que con las pilas de ácido fosfórico se hace referencia solo a la durabilidad de la pila que se encuentra entre 5.000-20.000 h (rango parecido al de las pilas de combustible PEMFC). Un 26% de los artículos revisados no tienen en cuenta ni la durabilidad de la pila de combustible ni la distancia que puede ser recorrida con este tipo de tecnología.

4.5 ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE COMBUSTIBLE Y LAS FUENTES DE GENERACIÓN PRINCIPALES

La pila de combustible como se ha mencionado anteriormente es el sistema que transforma, vía un proceso electroquímico, un combustible en energía eléctrica y en energía térmica. Aunque en función del tipo de pila existen numerosas diferencias, todas se basan en la utilización de dos electrodos conductores separados por un electrolito iónico (celda electroquímica).

Las pilas de combustible pueden ser alimentadas con hidrógeno, metano y metanol. En el presente estudio las pilas analizadas utilizan hidrogeno y metanol como combustible. Un 64% de los artículos revisados utilizan incluyendo los que no realizan análisis de ciclo de vida, analizan o tienen en cuenta el hidrógeno como combustible, diferenciándose en gran medida con el metanol que estaría en torno al 13% de los artículos.

Las dos ventajas principales que a priori ofrece el uso del hidrógeno como fuente de energía son que su combustión no contamina, tan sólo genera agua, y a su vez, por vía electroquímica, su materia prima el agua, es inagotable.

Un factor importante a analizar han sido las vías de obtención del combustible ya que el hidrógeno puede ser generado a partir de varias fuentes, reforzando el desarrollo de alternativas de tipos de combustible para vehículos y puedan proporcionar opciones basadas en recursos renovables a largo plazo. En el caso del hidrógeno, aunque la disponibilidad esté asegurada, se trata de un elemento que no se encuentra en estado puro en la Tierra y que, por tanto, se necesitan tecnologías capaces de generarlo de forma eficiente, ya sea vía electrolítica o bien a partir de reformado de gas natural con vapor (Stolen & Emonts, 2016).

Como se ha podido analizar en los estudios, las distintas tecnologías en base al hidrógeno han sido mediante la electrólisis, en el que puede obtener hidrógeno del agua descomponiendo ésta mediante el uso de electricidad. También se puede obtener hidrógeno a partir de los combustibles fósiles como gas natural a través del proceso de reformado, en el cual mediante el uso de un catalizador, agua y energía se transforma el combustible fósil en hidrógeno y CO₂. También se puede obtener hidrógeno de la biomasa. Ésta puede ser tratada mediante un proceso de biometanización para producir

biogás, y posteriormente el metano convertido en hidrógeno a través del proceso de reformado (Hwang, 2013).

Atendiendo a estos tipos de vía de obtención de combustible se ha observado y como se muestra en la Figura 6, que un 60% de los artículos revisados incluyendo los que no realizan análisis de ciclo de vida dan mayor importancia a la obtención de hidrógeno mediante reformado de gas natural seguido de la vía de la electrólisis despuntando frente a la gasificación de biomasa.

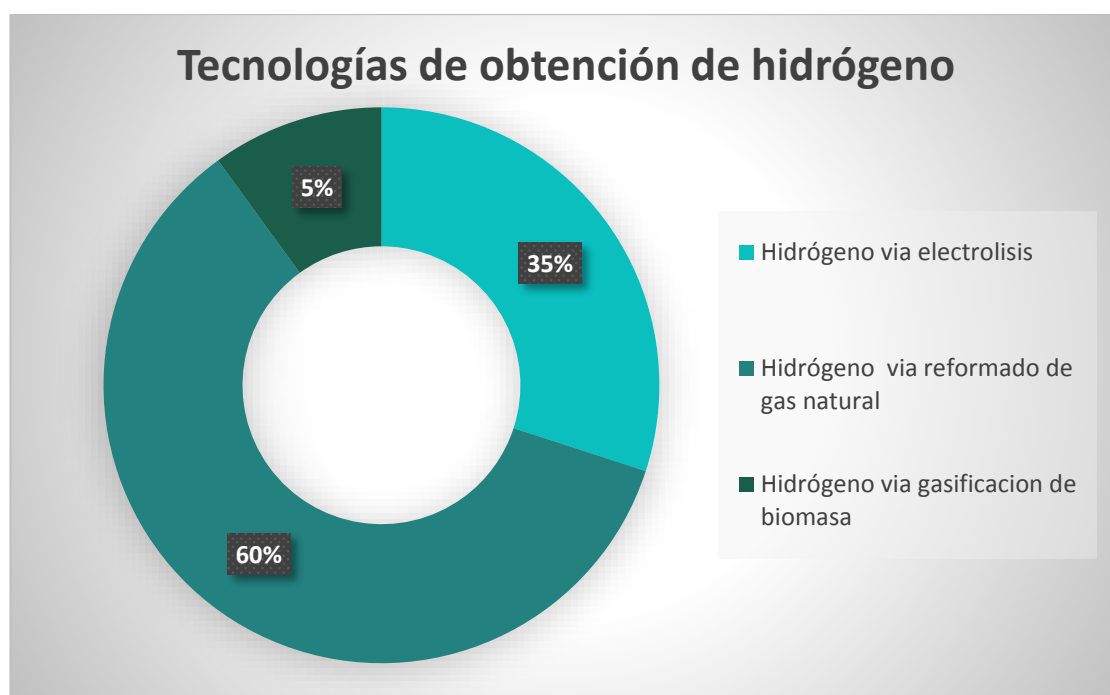


Figura 6. Tecnologías de obtención de hidrógeno analizadas

Teniendo en cuenta el metanol como combustible las vías de obtención a las que se hace referencia en la mayoría de los artículos son metanol vía gasificación con un porcentaje más alto que la otra opción que sería mediante reformado combinado (Wagner et al., 2006). Se ha analizado también que un 23% de los artículos no hace referencia a la tecnología de obtención de combustible.

Este análisis nos indica la relevancia del hidrógeno como combustible y su uso en vehículos ya que ofrecen una opción prometedora para los sistemas de transporte sostenible debido a su capacidad de generar cero emisiones de GEI el proceso que tiene lugar en la pila (Ahmadi & Kjeang, 2016). Esto es coherente con el hecho de que el principal tipo de pila de combustible estudiado sean las PEMFC.

4.6 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

4.6.1 Definición de objetivos

El primer paso en el desarrollo de un ACV es la definición de los objetivos del estudio. Se debe especificar las razones que impulsaron el trabajo y la información que se espera obtener como resultado. Se ha comprobado a lo largo del estudio que hay gran diversidad de objetivos particulares, aunque ha sido posible establecer una lista concreta que les agrupe.

Los objetivos de los estudios analizados se basan en los siguientes puntos desarrollados:

- Comparación de vehículos de pila de combustible con vehículos de combustión interna, señalando las fortalezas y debilidades de los diferentes sistemas y determinación de la competitividad de ambos.
- Evaluación de los impactos ambientales de vehículos de pila de combustible y el uso de la energía.
- Realización de evaluación de ciclo de vida de automóviles con pila de combustible y determinación de los factores que afectan a la vida útil de esta tecnología en vehículos.
- Desarrollo de mejoras con respecto a la producción de pilas de combustible.
- Desarrollo de herramientas de análisis de ciclo de vida para vehículos de pila de combustible.
- Evaluación de los recientes desarrollos en el campo de pila de combustible y utilización de métodos de análisis de la tecnología con el fin de discutir posibles desarrollos futuros.

4.6.2 Unidad Funcional

En un estudio de LCA, la unidad funcional (UF) proporciona una referencia a la cual se normalizan las entradas (recursos y energía) y las salidas (productos y emisiones) y establece la escala para los análisis comparativos. Dependiendo del alcance del estudio de LCA (es decir, pila o sistema), la unidad funcional puede expresarse en términos de capacidad de potencia de la pila fabricada expresada en kW, o producción de energía

útil, así como la distancia recorrida por un vehículo, la superficie de electrodo de membrana, el tipo de vehículo y el tipo de pila.

En consecuencia, se han considerado diferentes UF en los estudios que se han agrupado de la siguiente manera: (1) unidades de potencia en las que estarían incluidas unidades como “1 kW de potencia de pico del sistema PEMFC” (Simons & Bauer, 2015) o como se observa en el artículo (Miotti et al., 2017) “Una membrana de electrolito polimérico (PEM) FCS con una potencia nominal de 80 kW y un depósito de hidrógeno de 5,6 kg de capacidad utilizable para vehículos ligeros”, (2) unidades de distancia como “1 kilómetro conducido bajo condiciones de la media europea” (Hawkins et al., 2013) , (3) unidades de superficie de electrodo como “Fabricación y reciclaje de un MEA que disponga de 25 cm² de área activa (50 cm² de capa de electrodo)” ,(4) unidades de energía como serían “La unidad funcional es 1 kWhe (= 3600 kJ) producida por el sistema” , (5) tipo de vehículo como por ejemplo “Un vehiculo de pasajeros ligero” (Ahmadi & Kjeang, 2016) y por último (6) por tipo de pila (Sørensen, 2011). Todas las unidades funcionales de los artículos revisados se encuentran en la Tabla A2 que aparece en el apartado de Anexos.

La selección de una unidad común de fácil comprensión para medir y mostrar los resultados de ACV mejorará la precisión del estudio, la utilidad de los resultados y la fase de interpretación. Por otra parte, la selección de múltiples UF podría ser más precisa para proporcionar una mejor representación de los aspectos de sostenibilidad para ese sistema y, al mismo tiempo, hacer el estudio más comparable con otros.

Cuando un proceso de un sistema proporciona más de una función, es decir, entrega varios bienes y/o servicios, se define como multifuncional, haciendo la elección de la UF muy controvertida y una de las posibles fuentes de error en la realización de un LCI (Sørensen, 2004).

4.6.3 Límites del sistema

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del análisis de ciclo de vida. Los límites definen las operaciones del proceso y las entradas y salidas que deben tenerse en cuenta en el análisis.

Un estudio de ciclo de vida teóricamente completo sigue un enfoque de cuna a tumba, es decir, desde extracción de materias primas y combustibles, fabricación, uso hasta eliminación/reciclaje de componentes y sistemas como se observa en la Figura 7. De los estudios analizados que realizan análisis de ciclo de vida un 75% de ellos siguen principalmente un enfoque de la cuna a la tumba (*cradle to grave*), algunos de ellos excluyendo la etapa de eliminación, mientras un 17% de los estudios van de la cuna a la puerta (*cradle to gate*) en el que no incluye el uso final y el 8% restante no especifica en sus estudios los límites del sistema.

Muchos de los artículos a la hora de definir los sistemas no hablan de procesos que van de la cuna a la tumba (*cradle to grave*) sino que hace referencia a procesos que van del pozo a la rueda (*well to wheel*), esta terminología es específica para el análisis de la eficiencia de los combustibles utilizados para el transporte por carretera. WtW se descompone a menudo en dos etapas tituladas "*Well-to-Tank*" (WtT) (que incorpora la materia prima, los procesos de combustible y el transporte a las gasolineras) y la operación "*Tank-to-Wheel*" (TtW).

Como conclusión la mayoría de los estudios hacen un estudio de ciclo de vida de la cuna a la tumba, desde la extracción de materias primas pasando por la producción de coche o de la pila hasta su etapa de uso y su fin de vida.

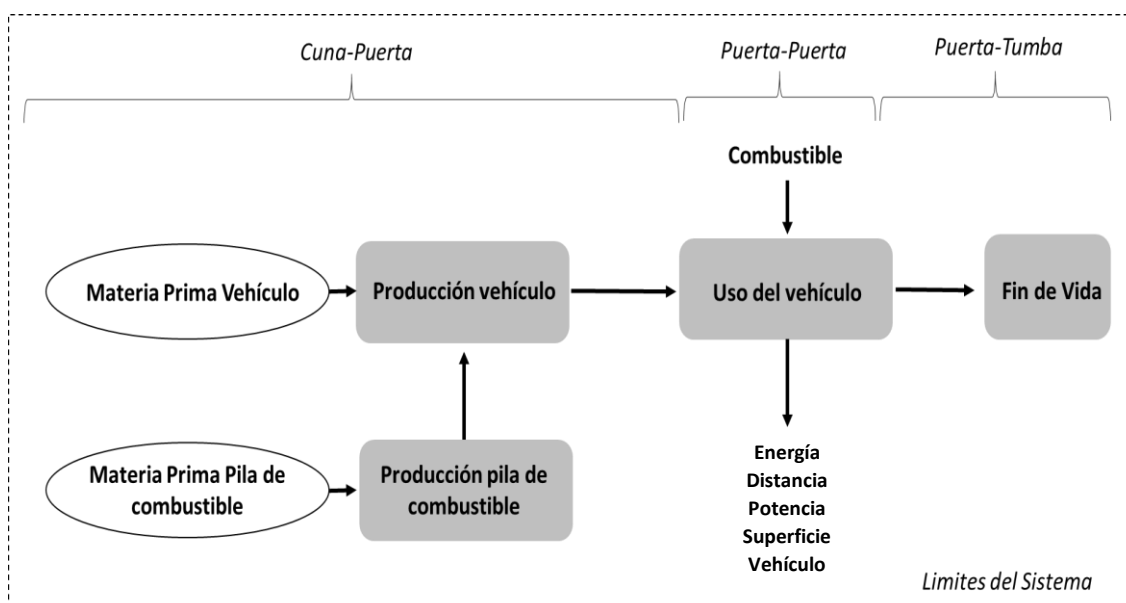


Figura 7. Límites del sistema estudiados

4.6.4 Bases de datos

Dentro de un análisis de ciclo de vida, el análisis de inventario es el proceso de recogida de datos para cuantificar las entradas y salidas del sistema estudiado y de acuerdo con la unidad funcional definida en la fase anterior. El presente trabajo no se ha centrado en realizar un análisis de inventario, pero si en analizar las herramientas más destacadas a la hora de hacer estos análisis para la tecnología de pilas de combustible en vehículos.

De los estudios analizados alrededor de un 70% realizan análisis de ciclo de vida completo para el análisis de las pilas de combustible para vehículos ya muchos son estudios ambientales. Para la realización de los inventarios normalmente se seleccionan datos genéricos de una base de datos, para ello se puede utilizar una hoja de cálculo que permita también a partir de estos datos hacer la evaluación de impactos, o bien utilizar programas específicos de software presentes en el mercado (Baumann & Tillman, 2004).

Como base de datos Ecoinvent es la base de datos más utilizada, un 25% de los artículos que analizan ciclo de vida hacen referencia a su uso. El otro 75% no lo especifica de forma precisa.

Entre los software de ACV disponibles en el mercado se encuentran Gabi, Simapro, Bousted Consulting, LCAit, Euklid, KCL ECO, WISARD, Umberto, TEAM y SUMMA (Instituto nacional de medioambiente. Software de análisis de vida). Como se pudo comprobar en la Figura 8. Los únicos softwares que aparecen en las revisiones de los artículos que realizan análisis de ciclo de vida son Simapro, Gabi, TEAM y una serie de softwares desarrollados internamente para el análisis de las nuevas tecnologías del vehículo, siendo el más utilizado SIMAPRO, ya que este compara y analiza complejos productos descomponiéndolos en todos sus materiales y procesos.

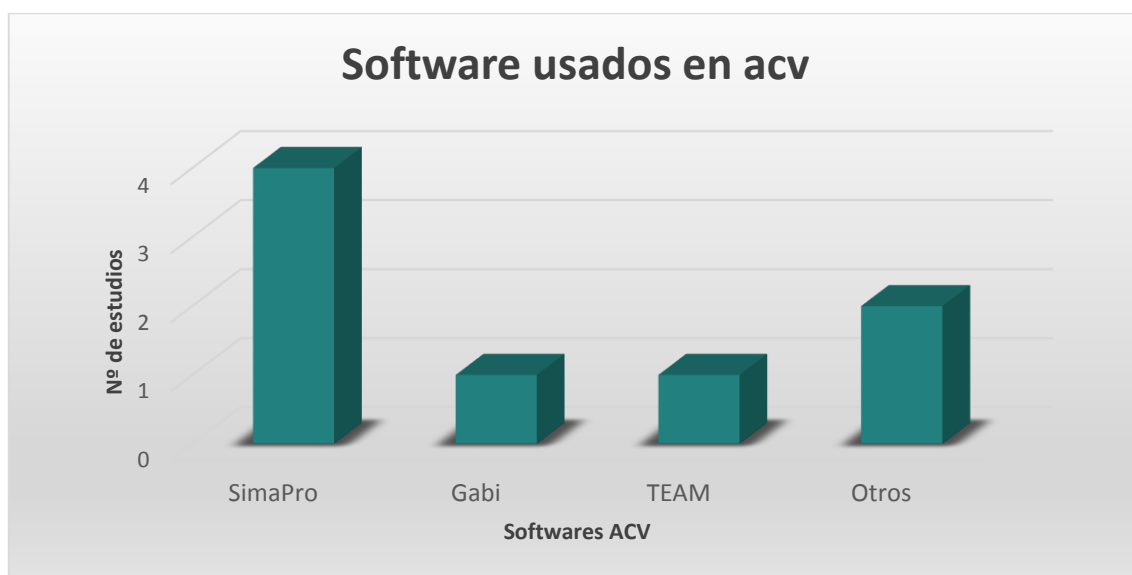


Figura 8. Cuantificación de los softwares más utilizados

Para poder proceder a la evaluación de los impactos ambientales, anteriormente las categorías de impacto deben ser determinadas. Para la determinación existen varios tipos de metodologías entre las que destacan: Eco Indicator, CML, Impact 2002 y Recipe.

Las metodologías destacadas en los artículos revisados que realizan análisis de ciclo de vida y que evalúan el impacto final son: CML y Recipe como se observa en la Figura 9.

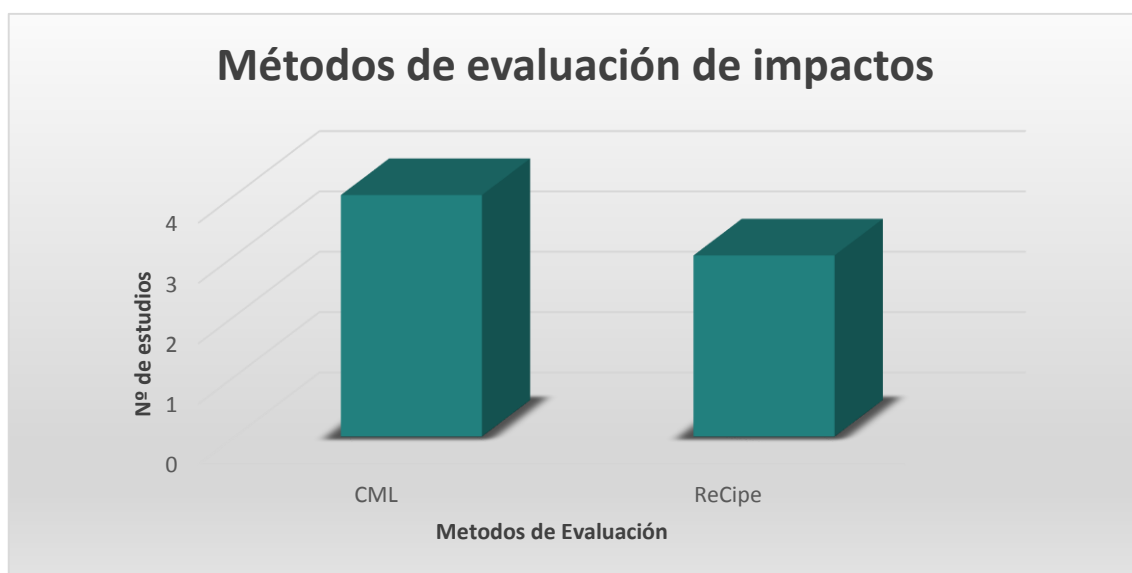


Figura 9. Cuantificación de los métodos de evaluación de impactos más utilizados

- La metodología de CML 2000, es la metodología más utilizada y que suele considerarse más completa (CML - Department of Industrial Ecology, 2016) basada en “midpoints”, con un horizonte temporal infinito y en un entorno global excepto

para la acidificación aplicable solo para Europa y para el smog fotoquímico adaptado para la trayectoria europea. Los *midpoints* que incluye en la metodología son, entre otros: degradación de los recursos abióticos, uso del suelo, ecotoxicidad (Wolf et al., 2012).

- ReCiPe es un método de evaluación de impacto que comprende indicadores de categoría armonizados en el punto medio y el nivel de punto final. Es una mejora en CML 2000 y Eco-indicator 99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicator 99 es su facilidad de interpretación. Esta metodología integra el enfoque orientado al problema ambiental y el orientado al daño. Comprende, por tanto, dos grupos de categorías de impacto: uno de puntos intermedios, que incluye 18 categorías (Cambio climático, Disminución de la capa de ozono, Toxicidad humana, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de materia particulada, Radiación ionizante, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce, Eutrofización marina, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad de agua dulce, Ecotoxicidad marina, Ocupación de terreno agrícola, Ocupación de terreno urbano, Transformación de terreno natural, Disminución de cantidad de agua dulce, Disminución de recursos minerales y Disminución de combustibles fósiles) y otro de puntos finales que incluye 3 categorías (salud humana, ecosistemas y aumento del coste de recursos) (Wolf et al., 2012).

Cabe destacar que, en la categoría de cambio climático, la mayoría de los métodos analizados, utilizan las indicaciones propuestas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

4.6.5 Análisis de impactos ambientales

Este análisis se ha hecho en base a determinar que impactos son los más estudiados y comprender y evaluar la magnitud y la importancia de los impactos ambientales potenciales del sistema estudiado.

Cabe destacar que 7 de los 24 artículos revisados no hacen referencia a ninguna de las categorías ambientales evaluadas ya bien porque no han sido puntos clave en los objetivos de sus estudios o por que han analizado contaminantes potenciales específicos.

La Figura 10 muestra las categorías de impacto ambiental consideradas en los estudios revisados que realizan análisis de ciclo de vida. El potencial de calentamiento global (GWP) y el potencial de acidificación (AP) son las categorías de impacto más analizadas.

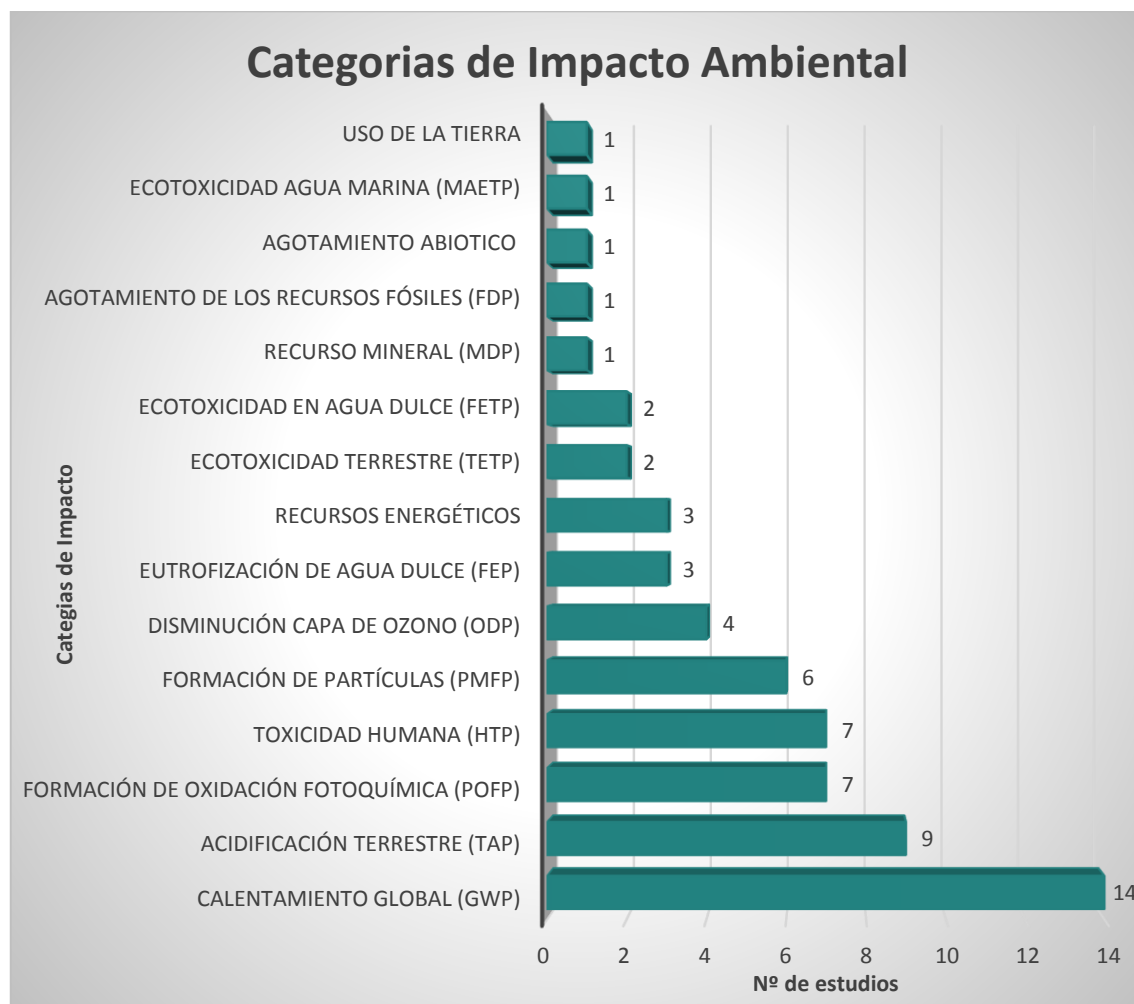


Figura 10. Impactos ambientales estudiados en los análisis

Una disminución del calentamiento global está presente en la mayoría de los artículos revisados, los cuales hacen referencia a que los vehículos a hidrógeno derivados del gas natural, el viento o el carbón reduciría el impacto del calentamiento global de los gases de efecto invernadero (GEI) en 14%, 23% y 1%, respectivamente (Veziroglu & MacArio, 2011).

En relación a las pilas de electrolito polimérico (PEMFC) que son las más estudiadas en el presente trabajo, muchos de los artículos revisados hacen referencia a que el impacto del ciclo de vida y los resultados de costes para las pilas de combustible del tipo PEMFC muestran que el catalizador representa una gran proporción de las emisiones globales en el calentamiento global, la acidificación terrestre, la toxicidad humana, la formación

fotoquímica oxidante y la formación de partículas y que las principales causas son las emisiones procedentes de la extracción de platino (Miotti et al., 2017) (Pehnt, 2001) (Sørensen, 2011) (Simons & Bauer, 2015).

Se estima que asumiendo un 75% de reciclaje de los materiales de los catalizadores entre el 25-30% del calentamiento global y entre el 65-70% de acidificación es causada en la etapa de producción del vehículo (Pehnt, 2003). Se atribuye que, por kW de potencia del sistema, las emisiones de GEI procedentes de la producción de PEMFC y EoL (end of life) disminuirán en un 30% desde alrededor de 37 kg CO₂ eq. / kW en 2012 hasta 25 kg CO₂ eq. /kW en 2020. La membrana es también un importante contribuyente a las emisiones de GEI (Simons & Bauer, 2015).

En relación a las PEMFC y en comparación con automóviles de combustión interna, si bien el uso de hidrógeno a partir de la electrólisis con energía fotovoltaica reduce las emisiones de GEI en casi un 40% en comparación con el ICEV (vehículo de combustión interna), el uso de hidrógeno de la electrólisis operada con la mezcla eléctrica europea media da como resultado un aumento de las emisiones de GHG de casi el 80% (Simons & Bauer, 2015).

La comparación de vehículos de combustible con vehículos de combustión interna es uno de los principales objetivos de los artículos revisados, en cuanto a esta comparación se manifiesta que las emisiones totales de GEI del automóvil de celda de combustible de PEMFC son aproximadamente 2,6 veces más bajas que el automóvil ICE, lo cual se debe a que no hay emisiones de GEI de automóvil de celda de combustible PEMFC en comparación con el automóvil ICE durante la etapa de uso del vehículo del ciclo del vehículo (Hussain et al., 2007).

Algunos artículos hablan de que la reducción del impacto ambiental no es tan notoria con la tecnología de pila de combustible. Los FCVs podrían reducir la emisión total de GHG en comparación con las GVs (gasoline vehicles) excepto la opción de hidrógeno de la electrólisis usando la electricidad de la red. Los FCV que utilizan el hidrógeno de la electrólisis podrían reducir la emisión de GHG donde está disponible la electricidad renovable para la producción del hidrógeno, aunque sea ineficiente producir el hidrógeno vía la electrólisis (Hwang, 2013).

La utilización de metanol o hidrógeno como combustible también causa diferencias importantes en los impactos medioambientales. Las emisiones de gases de efecto invernadero más bajas se observan en el vehículo de hidrógeno que corresponde a 0,057 kg de CO₂ eq / km, en cambio el potencial de calentamiento global más alto se obtendría para el vehículo metanol con un valor de 0,30 kg CO₂ eq / km según el artículo (Bicer & Dincer, 2017). Además, el vehículo de metanol tiene el potencial máximo de agotamiento del ozono, ya que es producido por métodos basados en fósiles que tienen una enorme cantidad de sustancia de carbono. Los estudios indican que los vehículos de hidrógeno generan menos impactos medioambientales en comparación con los vehículos de metanol (Bicer & Dincer, 2017).

5. CONCLUSIONES

- Canadá, Alemania y China son los países con más publicaciones sobre la evaluación ambiental mediante análisis de ciclo de vida aplicada a la tecnología de pilas de combustible para vehículos. El aumento de número de estudios sobre esta tecnología demuestra el continuo interés y participación de la comunidad científica e ingenieril de todo el mundo en su desarrollo, destacando el volumen de estudios de los años 2003 y 2016, con un promedio anual en el periodo estudiado de 2 artículos científicos.
- De los tres tipos de pilas que se estudian en la bibliografía, las pilas de combustible de intercambio protónico (PEM) son las más analizadas para el sector de la automoción, un 88% de los artículos revisados tienen en cuenta este tipo de pila. Se observa que durabilidad de estas pilas está en torno a una distancia recorrida de 122.000 km y una durabilidad de en torno a 32.000 horas. En comparación con los otros tipos de pila estudiadas las pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) para vehículos pueden alcanzar un rango parecido al de las pilas de combustible (PEM) en términos de distancia recorrida y que la durabilidad de las pilas alcalinas (AFC) también tienen rangos parecidos al de las pilas de combustible (PEM). Un 26% de los artículos revisados no tienen en cuenta ni la durabilidad de la pila de combustible ni la distancia que puede ser recorrida con este tipo de tecnología, a pesar de ser un parámetro clave para el análisis ambiental.
- Los dos combustibles principales para pilas en vehículos son el hidrógeno y el metanol. Se observa que el hidrógeno con un 60% de los artículos revisados utilizan, analizan o tienen en cuenta este como combustible, diferenciándose en gran medida con el metanol que estaría en torno al 13% de los artículos. La vía de obtención principal de obtención del hidrógeno sería un mediante reformado de gas natural seguido de la vía de la electrólisis despuntando frente a la gasificación de biomasa.
- Al evaluar los estudios de análisis de ciclo de vida se ha comprobado que hay gran diversidad de objetivos particulares, aunque ha sido posible establecer una lista concreta que les agrupe. Entre objetivos es posible señalar: los artículos que se centran en la comparación de vehículos de pila de combustible con vehículos de

combustión interna, artículos que su finalidad es la realización de evaluación de ciclo de vida de automóviles con pila de combustible, otros que su propósito sería la determinación de los factores que afectan a la vida útil, así como análisis de impactos ambientales y estudios de mejora para desarrollos futuros.

- En cuanto a la definición de unidad funcional, las unidades funcionales asociadas a los estudios revisados se han reunido en diferentes grupos para poder cuantificarlas. Estos grupos atienden a unidades de potencia, unidades de distancia, unidades de superficie, unidades de energía y tipo de vehículo.
- Un análisis de los límites del sistema nos muestra que de los estudios analizados que realizan análisis de ciclo de vida un 75% de ellos siguen principalmente un enfoque de la cuna a la tumba (*cradle to grave*), algunos de ellos excluyendo la etapa de eliminación, mientras un 18% de los estudios van de la cuna a la puerta (*cradle to gate*) en el que no incluye el uso final y el 8% restante no especifica de forma taxativa en sus estudios los límites del sistema.
- En referencia a las bases de datos utilizadas en los estudios revisados que realizan análisis de ciclo de vida se observa que como base de datos *Ecoinvent* es la base de datos más utilizada, un 25% de los artículos que analizan ciclo de vida hacen referencia a su uso. Entre los softwares de ACV disponibles en el mercado *SIMAPRO* sería el más utilizado.
- Para la realización de la evaluación de impactos ambientales el método CML es el más utilizado, ya que suele considerarse uno de los más completos, si bien es cierto que este método está actualmente un poco desfasado, ya que su última actualización se llevó a cabo en el año 2001. Por ello, el uso de otros métodos sería recomendable para futuros estudios.
- El análisis de impacto ambiental nos indica que el potencial de calentamiento global (GWP) y el potencial de acidificación (AP) son las categorías de impacto más analizadas.

6. RECOMENDACIONES DE TRABAJO FUTURO

- Estudiar vías de uso final de las pilas y de los vehículos para evitar la incineración o vertedero y potenciar el reciclado para una disminución de los impactos ambientales.
- Sería recomendable para estudios futuros la utilización de métodos más actualizados que los usados en estos estudios para la evaluación de impactos ambientales.
- Estudiar la posibilidad de sustituir el platino como catalizador en algunos tipos de pila ya que genera grandes impactos ambientales o si el platino puede ser recuperado y reutilizado.

7. BIBLIOGRAFIA

- Ahmadi, P. & Kjeang, E. Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian provinces. *Int. J. Hydrogen Energy* 40, 12905–12917 (2015).
- Ahmadi, P. & Kjeang, E. Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles. *Int. J. Energy Research*, 40:2105–2116 (2016).
- Asensio, J. A., Peña, J., Pérez-coll, D., Ruiz-, J. C., Marrero-lopez, D., Nuñez, P., ... Barcelona, B. Pilas de combustible de membrana polimérica. *Afinidad LXVIII*, 554, 246–258, (2011).
- Barbir, F., & Yazici, S. Status and development of PEM fuel cell technology. *Int. J. Energy Research*, 32:369–378 (2008).
- Barreras, F. & Lozano, A. Hidrógeno. Pilas de combustibles de tipo PEM. *Año Internacional de la energía Sostenible para todos* 6 (2012).
- Bauen, A. & Hart, D. Assessment of the environmental benefits of transport and stationary fuel cells. *J. Power Sources* 86, 482–494 (2000).
- Baumann, H. & Tillman, A.M. The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application. Part 2, Cap. 4, 97-126 (2004).
- Bicer, Y. & Dincer, I. Comparative life cycle assessment of hydrogen, methanol and electric vehicles from well to wheel. *Int. J. Hydrogen Energy* 42, 3767–3777 (2017).
- BP Statistical Review of World Energy. *BP Statistical Review of World Energy*, (June), 1–48 ,(2016). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.172>
- Bueno, J.A. *Las alternativas al petróleo como combustible para vehículos automóviles*. Fundacion Alternativas. Nº: 106 (2007).
- Carpio, M. M. El Desplome 2014-2015 De Los Precios Del Crudo: Causas Y Previsiones a Corto Plazo. Fundación Para La Sostenibilidad Energética Y Ambiental. 1–17 (2015).
- Contadini, J. F., Moore, R. M. & Mokhtarian, P. L. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicles. A Methodology Example of Input Data Treatment for Future Technologies. *Int. J. LCA* 7, 73–84 (2002).
- Dong, J., Liu, X., Xu, X., & Zhang, S. . Comparative life cycle assessment of hydrogen pathways from fossil sources in China. *International Journal Of Energy Research*, 40:2105–2116 (2016).
- Duclos, L. *et al.* Environmental assessment of proton exchange membrane fuel cell platinum catalyst recycling. *J. Clean. Prod.* 142, 2618–2628 (2017).
- Ekdunge, P. & Råberg, M. The fuel cell vehicle analysis of energy use, emissions and cost. *Int. J. Hydrogen Energy* 23, 381–385 (1998).
- Evangelisti, S., Tagliaferri, C., Brett, D. J. L. & Lettieri, P. Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. *J. Clean. Prod.* 142, 4339–4355 (2017).
- Folkesson, A., Andersson, C., Alvfors, P., Alakúla, M. & Overgaard, L. Real life testing of a Hybrid PEM Fuel Cell Bus. *J. Power Sources* 118, 349–357 (2003).
- Garraín, D., Lechón, Y. & Rúa, C. de la. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC) in

- Automotive Applications: Environmental Relevance of the Manufacturing Stage. *Smart Grid Renew. Energy* 2, 68–74 (2011).
- Handley, C., Brandon, N. P. & Van Der Vorst, R. Impact of the European Union vehicle waste directive on end-of-life options for polymer electrolyte fuel cells. *J. Power Sources* 106,
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G. & Strümmann, A. H. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *J. Ind. Ecol.* 17, 53–64 (2013).
- Hoogers, G. History. *Fuel cell Technology Handbook*. Cap 2.5, 2.7, 33–46 (2002).
- Hussain, M. M., Dincer, I. & Li, X. A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2294–2299 (2007).
- Hwang, J. J. *et al.* Lifecycle performance assessment of fuel cell/battery electric vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy* 38, 3433–3446 (2013).
- Hwang, J.-J. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 19, 220–229 (2013).
- Labbe, J.-F., & Dupuy, J.-J. Platinum Group Metals Market Panorama (In French), p. 2012 (Orleans, France) (2014).
- Liu, Y., Lehnert, W., Janßen, H., Samsun, R. C. & Stolten, D. A review of high-temperature polymer electrolyte membrane fuel-cell (HT-PEMFC)-based auxiliary power units for diesel-powered road vehicles. *J. Power Sources* 311, 91–102 (2016).
- McLean, G., Niet, T., S, P.-R. & Dijilali, N. An assessment of alkaline fuel cell technology. *Int. J. Hydrogen Energy* 27, 507–526 (2002).
- Mehmeti, A., McPhail, S. J., Pumiglia, D. & Carlini, M. Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications. *J. Power Sources* 325, 772–785 (2016).
- Mehta, V. & Cooper, J. S. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *J. Power Sources* 114, 32–53 (2003).
- Miotti, M., Hofer, J. & Bauer, C. Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 94–110 (2017).
- Mock, P. & Schmid, S. A. Fuel cells for automotive powertrains-A techno-economic assessment. *J. Power Sources* 190, 133–140 (2009).
- Neelis, M. L., Van der Kooi, H. J. & Geerlings, J. J. C. Exergetic life cycle analysis of hydrogen production and storage systems for automotive applications. *Int. J. Hydrogen Energy* 29, 537–545 (2004).
- O'Hayre, R., Cha, S. W., Colella, W. & Prinz, F.B., Overview of Fuel Cell Types. *Fuel cell Fundamentals*. Cap. 8. 269–302, (2016).
- Pehnt, M. Assessing Future Energy and Transport Systems: The Case of Fuel Cells. Part 2: Environmental Performance. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8, 365–378 (2003).
- Pehnt, M. Life-cycle assessment of fuel cell stacks. *Int. J. Hydrogen Energy* 26, 91–101 (2001).
- Pei, P., Chang, Q. & Tang, T. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime. *Int. J. Hydrogen Energy* 33, 3829–3836 (2008).
- Pei, P. & Chen, H. Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in

- vehicle applications: A review. *Appl. Energy* 125, 60–75 (2014).
- Sarkar, J. & Bhattacharyya, S. Operating characteristics of transcritical CO₂ heat pump for simultaneous water cooling and heating. *Arch. Thermodyn.* 33, 23–40 (2012).
- Schüfer, A., Heywood, J. B. & Weiss, M. A. Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment. *Energy* 31, 1728–1751 (2006).
- Simons, A. & Bauer, C. A life-cycle perspective on automotive fuel cells. *Appl. Energy* 157, 884–896 (2015).
- Stolen, D. & Emonts, B. Hydrogen for Storage of Renewable Energy. *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*. Volume 2. Part 3, 565 (2006).
- Sørensen, B. Total life-cycle assessment of PEM fuel cell car. Paper 3-1189, Proceedings of the 15th World Hydrogen Energy Conference, Yokohama, (2004).
- The International Standards Organisation. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. *Iso 14040* 2006, 1–28 (2006).
- Veziroglu, A. & Macário, R. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns. *Int. J. Hydrogen Energy* 36, 25–43 (2011).
- Wagner, U., Eckl, R. & Tzscheuschler, P. Energetic life cycle assessment of fuel cell powertrain systems and alternative fuels in Germany. *Energy* 31, 2726–2739 (2006).
- Wang, C., Zhou, S., Hong, X., Qiu, T. & Wang, S. A comprehensive comparison of fuel options for fuel cell vehicles in China. *Fuel Process. Technol.* 86, 831–845 (2005).
- Weiss, M. A., Heywood, J. B., Schafer, A. & Natarajan, V. K. Comparative Assessment of Fuel Cell Cars. 34 .MIT LFEE 2003-001 RP. Cambridge, United States: Laboratory for Energy and the Environment (LFEE) (2003).
- Wolf, M.-A., Pant, R., Chomkhamisri, K., Sala, S., & Pennington, D. *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*. European Commission. JRC references reports. (2012).
- Zamel, N. & Li, X. Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada. *J. Power Sources* 155, 297–310 (2006).
- CML - Department of Industrial Ecology (2016). (Última visita Junio 2017). [Disponible en: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>].
- EL ECONOMISTA (2016). (Última visita Junio 2017). [Disponible en: <http://www.eleconomista.es/ecomotor/motor/noticias/8042892/12/16/Alemania-apuesta-por-el-hidrogeno-como-alternativa-a-los-combustibles-fosiles-e-invierte-250-millones.html>].
- EUROPEAN COMMISSION, Acción por el Clima (2017). (Última visita Junio 2017). [Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policias/international/negotiations/paris_es].
- EUROPEAN COMMISSION PRESS RELEASE DATABASE (2017) . Paquete de primavera del Semestre Europeo 2017: la Comisión formula recomendaciones específicas por país (Última visita Junio 2017). [Disponible en: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-17-1311_es.htm].
- Instituto nacional de medioambiente. Software de análisis de vida. (Última visita Junio 2017). [

Disponible en: <http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/software-de-analisis-de-ciclo-de-vida-gabi-y-simapro>].

ANEXOS

Tabla A1. Listado de los artículos revisados

Titulo	Autores
Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric vehicles	Troy R. Hawkins, Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez and Anders Hammer Strømmanhttp
Integrated environmental and economic assessment of curret and future fuel cell vehicles	Marco Miotti, Johannes Hofer and Christian Bauer
Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles	Pouria Ahmadi and Erik Kjeang
Environmental assessment of proton exchange membrane fuel cell platinum catalyst recycling	Lucien Duclos , Maria Lupsea , Guillaume Mandil, Lenka Svecova, Pierre-Xavier Thivel and Val erie Laforest
A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles	M.M. Hussain, I. Dincer and X. Li
Life-cycle assessment of fuel cell stacks	Martin Pehnt
Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC) in Automotive Applications: Environmental Relevance of the Manufacturing Stage	Daniel Garraín, Yolanda Lechón, and Cristina de la Rúa
A comprehensive comparison of fuel options for fuel cell vehicles in China	Congwei Wanga, Shuailin Zhoua, Xuelun Honga, Tong Qiub and Shudong Wang
Total life-cycle assessment of PEM fuel cell car	Bent Sørensen
Assessing Future Energy and Transport Systems: The Case of Fuel Cells Part 2: Environmental Performance	Martin Pehnt
Assessment of the environmental benefits of transport and stationary fuel cells	A. Bauen and D. Hart
Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian provinces	Pouria Ahmadi and Erik Kjeang
Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications	Jenn-Jiang Hwang
A review of high-temperature polymer electrolyte membrane fuel-cell (HT-PEMFC)-based auxiliary power units for diesel-powered road vehicles	Yongfeng Liu, Werner Lehnert, Holger Janßen, Remzi Can Samsun and Detlef Stolten
A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime	Pucheng Pei, Qianfei Chang and Tian Tang

Energetic life cycle assessment of fuel cell powertrain systems and alternative fuels in Germany	U. Wagner, R. Eckl and P. Tzscheutschler
An assessment of alkaline fuel cell technology	G.F. McLean, T. Niet, S. Prince-Richard and N. Djilali
Exergetic life cycle analysis of hydrogen production and storage systems for automotive applications	M.L. Neelisa, H.J. van der Kooia and J.J.C. Geerlingsb
Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns	Ayfer Veziroglu and Rosario Macario
The fuel cell vehicle analysis of energy use, emissions and cost	Per Ekdunge and Monika Raberg
Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment	Andreas Schäfera, John B. Heywood and Malcolm A. Weiss
Impact of the European Union vehicle waste directive on end-of-life options for polymer electrolyte fuel cells	C. Handley, N.P. Brandon and R. van der Vorst
Real life testing of a Hybrid PEM Fuel Cell Bus	Anders Folkesson, Christian Andersson, Per Alvfors, Mats Alaküla and Lars Overgaard
Fuel cells for automotive powertrain: A techno-economic assessment	Peter Mock and Stephan A. Schmid
Comparative life cycle assessment of hydrogen pathways from fossil sources in China	Jun Dong, Xiaotong Liu, Xinhai Xu and Shuyang Zhang
Comparative Assessment of Fuel cell cars	Malcom A. Weiss, John B. Heywood, Andreas Sachäfer and Vinod K. Natarajan
Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review	Pucheng Pei and Huicui Chen
A life-cycle perspective on automotive fuel cells	Andrew Simons and Christian Bauer
Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles	Sara Evangelisti, Carla Tagliaferri, Dan J.L. Brett and Paola Lettieri
Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada	Nada Zamel and Xianguo Li
Comparative life cycle assessment of hydrogen, methanol and electric vehicles from well to wheel	Yusuf Bicer and Ibrahim Dincer
Review and analysis of PEM fuel cell desing and manufacturing	Viral Mehta and Joyce Smith Cooper
Lifecycle performance assessment of fuel cell/battery electric vehicles	Jenn-Jiang Hwang, Jenn-Kun Kuo, Wei Wub, Wei-Ru Chang, Chih-Hong Lin and Song-En Wanga

Tabla A2. Unidades Funcionales definidas en los estudios

Descripción	Tipo de UF
'unit of end-use'	'unit of end-use'
1 kilómetro conducido bajo condiciones de la media Europea	Distancia
1 km conducido por un vehículo de pila de combustible	Distancia
1 km conducido por un vehículo	Distancia
1 km recorrido	Distancia
person km	Distancia
person km	Distancia
Vehículo con un rango de conducción de por vida de 20 000 km	Distancia
20000 KM distancia recorrida	Distancia
Transporte de un km en un vehículo de pasajeros de tamaño compacto en un ciclo de trabajo definido	Distancia
KWh de energía primaria (PE) por kWh de energía final (FE), automóvil de tamaño mediano operado en el nuevo ciclo de conducción europeo (NEDC)	Energía
La unidad funcional es 1 kWhe (= 3600 kJ) producida por el sistema	Energía
Transporte de energía final en MJ	Energía
Una membrana de electrolito polimérico (PEM) FCS con una potencia nominal de 80 kW y un depósito de hidrógeno de 5,6 kg de capacidad utilizable para vehículos ligeros	Potencia
Material requerido para la fabricación de cada kW de PEMFC	Potencia
Todos los vehículos examinados en este estudio están diseñados para ser equivalentes funcionales del sedán típico de la familia estadounidense mid-size 75 W / kg	Potencia
1 kW de potencia de pico del sistema PEMFC	Potencia
Producción de un sistema de pilas de combustible de un kWel	Potencia
Fabricación y reciclaje de un MEA que disponga de 25 cm² de área activa (50 cm² de capa de electrodo)	Superficie electrodo
Vehículos basados en el Ford AIV	Vehículo
Un vehículo de pasajeros ligero (LDPV), automóvil que tiene una clasificación de peso bruto del vehículo (GVWR) de menos de 3850 kg	Vehículo
Típico sedán familiar de tamaño medio de los EE.UU	Vehículo
Volvo 850, coche familiar	Vehículo