

Tema: ACV de la utilización de hidrógeno de fuentes renovables en buses con celdas de hidrógeno vs buses a motores diésel en la Ciudad de Rosario, Argentina

Leonardo Iannuzzi¹, Jorge Antonio Hilbert², Electo Silva Lora³

Mayo- 2019

1 Ing. Leonardo Iannuzzi, Consultor en Sostenibilidad. Cel +54-911-5175-4965. Mail: leoianuzzi@hotmail.com

2 MSc. Jorge Antonio Hilbert, INTA-Instituto de Ingeniería Rural-Profesional Asesor de Nivel Internacional en Gestión de Actividades de Innovación-Argentina, Dirección Cel: +54 9 11 4143 4394- E mail: hilbert.jorge@inta.gob.ar; jorgeantoniohilbert@gmail.com

3 Doctor Ingeniero Mecánico Electo Silva Lora, Núcleo de Excelencia en Generación Termoeléctrica y Distribuida Instituto de Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Itajubá-Brasil, Cel: +55-35-36291321-Mail: electo@unifer.edu.br

Palabras clave: ACV, Cultivos Energéticos, Hidrógeno Renovable, Transporte Sustentable, Movilidad Sustentable, Bioeconomía

Sinopsis

El propósito del estudio es realizar un análisis de ciclo de vida ambiental y energético de alternativas tecnológicas y algunas de sus variantes, comparando la situación actual en la ciudad de Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina, de autobuses de motor de combustión interna frente a autobuses con motor eléctrico alimentado por celdas de combustible tipo PEM, cuyo combustible es gas hidrógeno comprimido. El ACV abarca desde la obtención de la materia prima hasta el uso de los combustibles en los buses. En el caso de la producción de hidrógeno, se analizan diferentes procesos productivos derivados de fuentes renovables y no renovables. Las fuentes renovables para producción de hidrógeno son cultivos energéticos de álamo densificado de rápido corte, desechos industriales de pallets de madera y silaje de maíz.

El ACV es limitado a 4 grupos de impactos ambientales y considera los requisitos de la Norma Internacional ISO 14040. Consumo de combustible del autobús con un 90% de fósil de gasóleo y un 10% de biodiesel es de 44 litros de gas oil/100 km. Consumo del motor eléctrico con celda de combustible de hidrógeno tipo PEM: 9 kg H₂ /100 km. Indicadores de ACV seleccionados: Kg de CO₂eq /100 km, agua consumida en litros /100 km, suelo utilizado en m²/100 km y energía total consumida en GJ/100 km. Se determina la huella de carbono del combustible en el mismo ACV en gCO₂ eq/MJ y el índice de retorno energético del mismo ACV. Se asigna a la producción de hidrógeno el 100% de las cargas ambientales y energéticas de su proceso de producción y del 0% al resto de los coproductos. Factor de emisión para la red eléctrica argentina en el punto de consumo: 0,4 kg CO₂eq/KWh. ACV de Hidrógeno renovable y no renovables para su uso en buses en Rosario, Argentina

Se determinó por primera vez la huella de carbono del gas oil fósil de Argentina que hasta ahora no estaba disponible. Con el factor de emisión de la red eléctrica argentina y una carga energética y ambiental del 100% para la producción de hidrógeno derivado de cultivos energéticos, las emisiones de CO₂eq fueron significativamente más bajas, en el orden del 70% para un autobús alimentado a hidrógeno respecto de uno que consume el 90% de gas oil y 10% de biodiesel.

1 Introducción

La búsqueda de una movilidad urbana más sustentable.

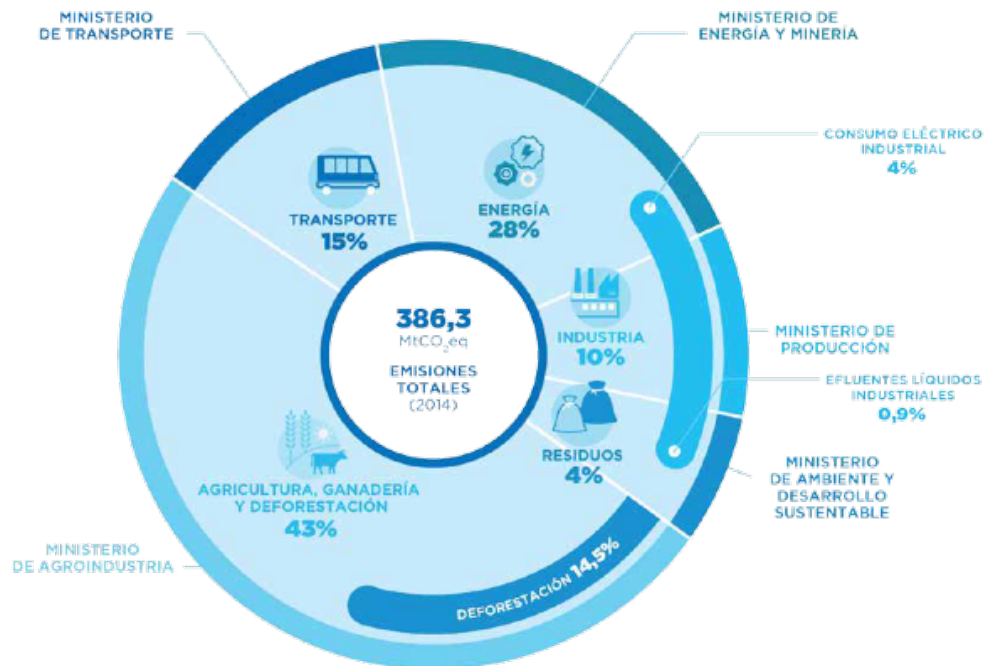
El uso de vehículos públicos de pasajeros del tipo urbano denominado localmente en Argentina como “colectivos” o más universalmente denominados “buses”, utilizan actualmente combustible gasoil fósil (90%) mezclado con un corte obligatorio de biodiesel (10%).

Los impactos ambientales directos más habituales provocados en el entorno urbano por el uso de ese tipo de combustibles fósiles son la contaminación atmosférica y sonora a nivel local, y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a escala global debido a la emisión, principalmente de dióxido de carbono¹, uno de los gases emitidos por la actividad humana que provocan gran parte del denominado Calentamiento Global y su correspondiente aceleración del fenómeno de Cambio Climático.

Como puede apreciarse en la siguiente Figura 1 y según lo publicado en el año 2017 en el Reporte Anual de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Argentina con datos de 2014, las emisiones GEI de fuentes móviles vinculadas al transporte terrestre de cargas, transporte público de pasajeros y vehículos particulares, representa el 15,5% del total de emisiones GEI con 56,15 Mt CO₂ eq de un total de 386,3 Mt CO₂ eq declaradas.

¹ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina (2017). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.

Figura 1: Inventario Anual de Emisiones por sectores y actividades industriales de Argentina



Fuente: Tomado del Informe Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Argentina, Año 2017.

Una solución propuesta de camino intermedio a algunos de los problemas ambientales locales en las ciudades de Argentina y globales en otras ciudades del Mundo provocadas por el consumo de combustibles fósiles, es el reemplazo total de los combustibles fósiles por biocombustibles o la mezcla de ambos en diversas proporciones, tal es el caso del biodiesel mezclado con gas oil y el bioetanol mezclado con las naftas o gasolinas, el cual no implica cambios significativos en la tecnología de los vehículos y sus motores de combustión interna. Si bien en el proceso de combustión o uso de los biocombustibles, no se logra una reducción significativa de la emisiones contaminantes y de los GEI propias de la salidas de un escape de los motores de combustión interna, el uso de biocombustibles genera una reducción neta cada vez más importante a lo largo del ciclo de vida de los procesos de su obtención hasta, e inclusive su consumo, dado que la fuente de generación de dichos combustibles son cultivos energéticos, en cuyo ciclo de vida de producción y uso, poseen menos nivel de emisión neta de GEI que el ciclo de vida similar de un combustible fósil (Hilbert et al)².

² Ing. Agr. Jorge Antonio Hilbert, Ing. Ind. Sebastián Galbusera.(2014). Evolución de la reducción de emisiones producida por el corte obligatorio y la exportación de biodiesel argentino. INTA Ediciones Informes Técnicos de Bioenergía Año 3, N° 6. ISSN 2250-8481

Otra alternativa al transporte: El hidrógeno

Existen antecedentes recientes a escala piloto en 12 ciudades europeas del uso del hidrógeno comprimido como fuente de energía limpia aplicado a buses eléctricos alimentados por celdas de combustible tipo PEM (Protonic Exchange Membrane) como es el caso del proyecto CHIC³ denominado Clean Hydrogen in European Cities, cuyo objetivo es lograr una movilidad urbana de “Cero Emisiones” en el proceso de transporte público de pasajeros. Las 12 ciudades elegidas se muestran en el mapa de la Figura 2 siguiente.

Figura 2: Distribución geográfica de las 12 ciudades que participan del Proyecto de Clean Hydrogen Cities.



Fuente: Tomado de New Bus Refuelling for European Hydrogen Bus Depots.⁴

³ Proyecto CHIC de la Unión Europea. <http://chic-project.eu/>

⁴ www.newbusfuel.eu y www.fuelcellbuses.eu

Con base a dicha iniciativa, se pretende analizar la viabilidad en Argentina de un proyecto similar y la sostenibilidad ambiental para la producción de hidrógeno derivado de cultivos energéticos y su consumo en buses alimentados eléctricamente por celdas de combustible versus el consumo de gas oil mezcla en buses de motor de combustión interna, para la Ciudad de Rosario.

Las preguntas en consideración que se discuten son las siguientes:

¿El cambio tecnológico propuesto para el transporte urbano puede realmente ser mejor que el sistema de transporte existente y a la vez brindar soluciones ambientales sustentables?

¿De ser así, qué condiciones y en qué marco_o escenario debiera darse dicho cambio tecnológico, si se decidiera avanzar en algún momento con el mismo?

2 Desarrollo

El presente estudio desarrolla un análisis de ciclo de vida (ACV) ambiental y energético de ocho alternativas tecnológicas y algunas de sus variantes, comparando la situación vigente en la Ciudad de Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina entre el consumo del combustible líquido gas oil mezcla con 90% fósil y 10% biodiesel utilizado en buses de motores de combustión interna versus el consumo hipotético en la misma ciudad en buses con motor eléctrico alimentado con celdas de combustible del tipo membranas de intercambio protónico o de sus siglas en inglés PEM (protonic exchange membrane), cuyo combustible es hidrógeno gas comprimido.

El alcance de los análisis del ciclo de vida considerados abarcan desde la obtención de la materia prima hasta el consumo del combustible en buses teniendo en cuenta seis etapas:

- Etapa 1: Obtención de la materia prima
- Etapa 2: Transporte y adecuación de la materia prima
- Etapa 3: Transformación de la materia prima, obtención del combustible y adecuación del combustible para su uso en buses
- Etapa 4: Transporte del combustible
- Etapa 5: Suministro del combustible
- Etapa 6: Consumo del combustible por el bus

Las características de las ocho tecnologías a comparar y sus principales procesos industriales considerados en el ACV, se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Descripción general de las alternativas tecnológicas comparadas y sus procesos

TEC	Descripción general de las tecnologías de comparación y sus procesos
T1	Buses alimentados a Gas Oil Mezcla 90% fósil y 10% biodiesel. El proceso de mezcla se realiza en el sitio de despacho de una refinería. Biodiesel derivado de aceite de soja. Gas oil fósil derivado de petróleo crudo. Despacho del gas oil mezcla desde refinería a estación de servicio.
T21	Bus alimentado a hidrógeno comprimido. Producción de hidrógeno mediante gasificación de biomasa sólida. Fuente de Materia Prima: Cultivo energético de rápido corte derivado de álamo densificado. El hidrógeno se comprime y licúa criogenizado en la planta. Se despacha en camiones, se regasifica y se carga a 350 bar de presión en los tanques de hidrógeno del bus.
T22	Bus alimentado a hidrógeno comprimido. Producción de hidrógeno mediante gasificación de biomasa sólida. Fuente de Materia Prima: residuo industrial de madera de pallets reciclado. El hidrógeno se comprime y licúa criogenizado en la planta. Se despacha en camiones, se regasifica y se carga a 350 bar de presión en los tanques de hidrógeno del bus.
T31	Bus alimentado a hidrógeno comprimido. Producción de biogás y reformado de biogás para obtención de hidrógeno. El hidrógeno se comprime y licúa criogenizado en la planta. Se despacha en camiones, se regasifica y se carga a 350 bar de presión en los tanques de hidrógeno del bus.
T4A	Bus alimentado a hidrógeno comprimido. Producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua en una única planta industrial. El hidrógeno se comprime y licúa criogenizado en la planta. Se despacha en camiones, se regasifica y se carga a 350 bar de presión en los tanques de hidrógeno del bus.
T4B	Bus alimentado a hidrógeno comprimido. Producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua en la misma estación de servicio de dispensado del hidrógeno. El hidrógeno se carga comprimido en el bus a 350 bar.
T5A	Bus alimentado a hidrógeno comprimido. Producción de hidrógeno mediante reformado del gas natural en una única planta industrial. El hidrógeno se comprime y licúa criogenizado en la planta. Se despacha en camiones, se regasifica y se carga a 350 bar de presión en los tanques de hidrógeno del bus.
T5B	Bus alimentado a hidrógeno comprimido. Producción de hidrógeno mediante reformado de gas natural en la misma estación de servicio de dispensado del hidrógeno. El hidrógeno se carga comprimido en el bus a 350 bar.

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Figura 3 se presenta un esquema fotográfico y conceptual de las tres fuentes de biomasa utilizada para la producción de hidrógeno de fuentes renovables de energía y su comparación con el origen del gas oil y del biodiesel.

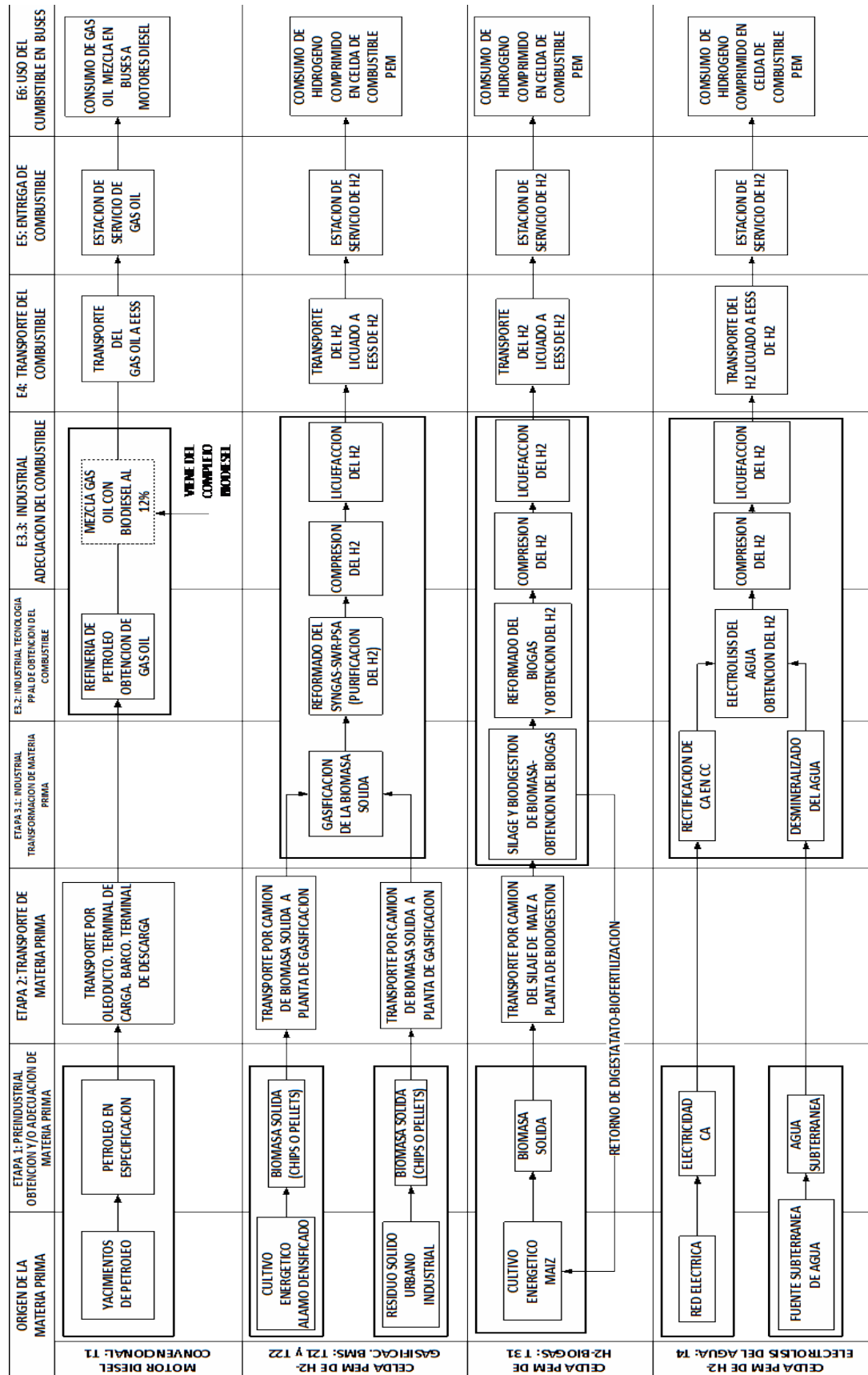
Figura 3: Origen de biomasa utilizada para la producción de hidrógeno de fuentes renovables de energía y su comparación con el hidrógeno producido a partir del gas oil y del biodiesel.

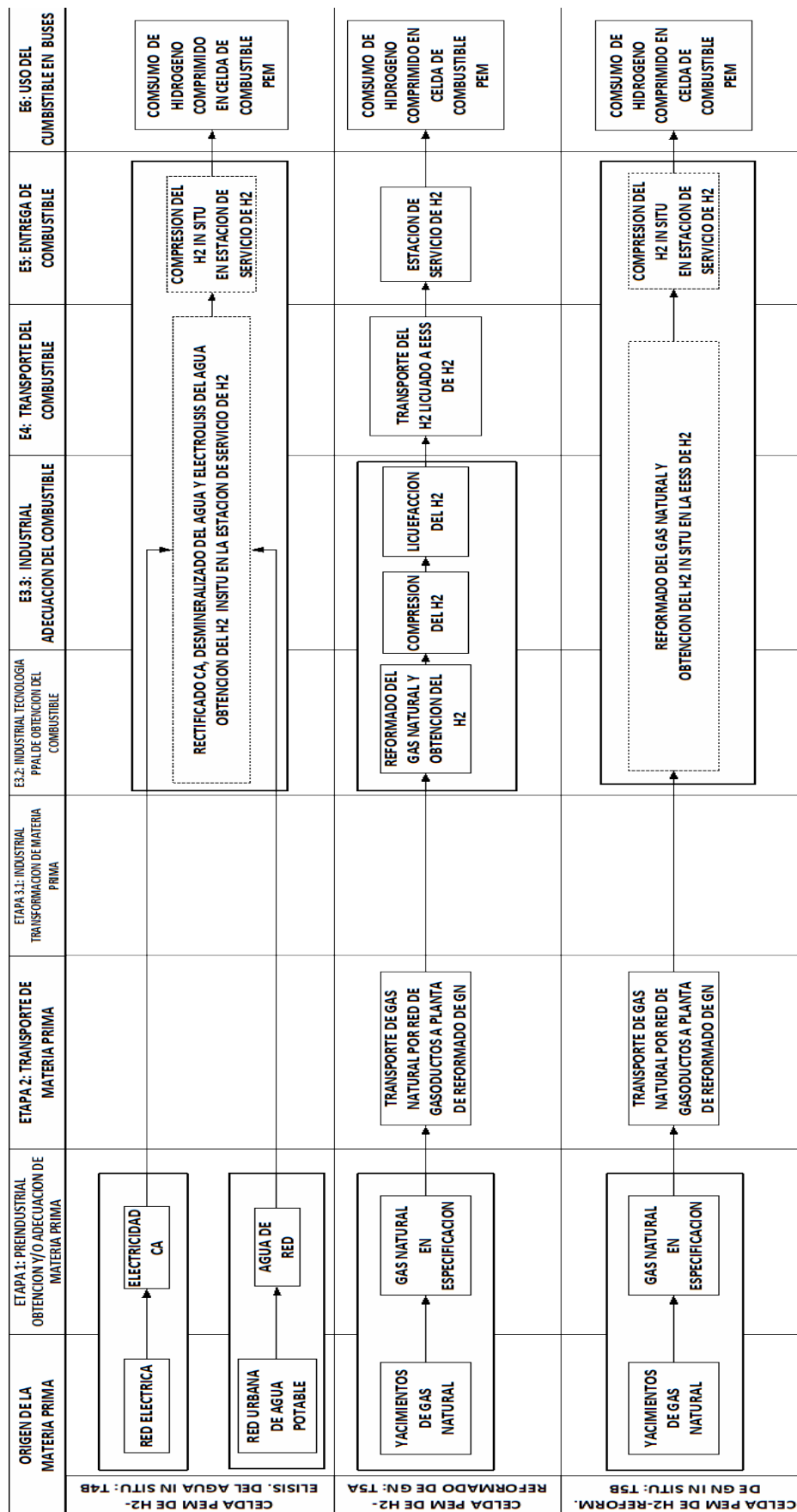
Etapa	Tecnologías	Bus a GOM MCI	Bus CC Tipo PEM a H2.Cultivos Energét.
1	Origen, obtención y adecuación de la materia prima		
2	Transporte de materia prima		
3	Obtención del combustible		
4	Transporte de combustible		
5	Suministro de combustible		
6	Consumo de combustible		

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se detalla la secuencia de las 6 Etapas de 8 Sistemas de Producción y Uso de combustibles considerados en el ACV de cada uno de ellos.

Figura 4: Alternativas tecnológicas para la movilidad de buses, etapas del ACV de cada una de ellas, para la Ciudad de Rosario, Provincia de Santa Fe.





Fuente: Elaboración propia

Para la producción de hidrógeno se analizaron a su vez diversos procesos productivos derivados de fuentes renovables y no renovables. Las fuentes renovables de energía fueron cultivos energéticos de álamo densificado de rápido corte, cultivo y silaje de maíz y una fuente de biomasa derivada de residuos industriales de chips de pallets de madera reciclados.

El ACV considera la metodología y los requisitos establecidos en las normas ISO 14040 e ISO 14044. Todo el proceso de análisis y cálculo de las alternativas de ACV a comparar e indicadores ambientales surgen de información de la Ciudad de Rosario basados en la demanda de combustible y los kilómetros recorridos por 742 buses a motor diésel con datos del año 2013; así como de estimaciones extrapoladas de otros estudios internacionales para la producción de hidrógeno y datos reales de visita a campo de consumo de hidrógeno obtenidos en Abril de 2018 del proyecto CHIC de la Unión Europea desarrollado por el Instituto de Innovación Tecnológica (IIT) ubicado en la Ciudad de Bolzano, Italia.

Para el cálculo de las huellas ambientales del Gas Oil de Argentina, se utilizó información real de campo, suministrada por la empresa YPF S.A. durante consultas efectuadas en el año 2018, sobre la base de datos interna denominada APA.

Para los ACV considerados, los principales criterios y datos de demanda fueron:

- La Unidad Funcional (UF) de comparación entre tecnologías corresponde a 100 km recorridos por los buses.
- El consumo específico de combustible para la unidad funcional del bus:
 - Motor de Combustión interna alimentado con 90% Diésel oil Fósil y 10% de biodiesel: 44 litros de diésel oil/100 km. PCI 42,7 MJ/kg
 - Motor eléctrico con Celda de Combustible de Hidrógeno tipo PEM: 9 kg H₂/100 km. PCI 120 MJ/Kg

Se eligieron y determinaron los siguientes indicadores del ACV a partir de la unidad funcional: UF=100 kilómetros recorridos por el bus:

- Kg de CO₂ Equivalente GEI como una medida del Cambio Climático /100 km
- Agua consumida en Litros/100 km
- Suelo utilizado en m²/100 km
- Energía Total consumida en GJ/100 km

Se determinó también la huella de carbono del combustible en el mismo ACV como g CO₂ eq/MJ y g CO₂/kg de combustible.

Se asignó a la producción del hidrógeno el 100% de las cargas ambientales y energéticas de su proceso de obtención, es decir factor de asignación o coeficiente de asignación igual a 1 y cero al resto de los coproductos. Es de anotar, que dependiendo de la tecnología analizada se generan coproductos industriales principales: dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno o solamente oxígeno.

Se calculó el EROI o Índice de Retorno Energético del ACV entre la energía entregada por el combustible obtenido y la energía necesaria para su obtención.

Se analizaron varios escenarios del Factor de Emisión de la Red Eléctrica Argentina (FE REA) en el punto de consumo, consolidando resultados en el factor de emisión actual de 0,4 Kg CO₂ eq/KWh y en el hipotético de 0,1 Kg CO₂ eq/KWh.

Adicionalmente, se generaron gráficos de la huella de carbono de los combustibles utilizados y las emisiones evitadas dentro del ACV con FE REA 0,4 y 0,1 kg CO₂ eq/KWh. Las emisiones evitadas derivadas de fuentes de biomasa para producción de hidrógeno corresponden fundamentalmente al CO₂ biogénico capturado por los cultivos energéticos.

El presente estudio permitió considerar escenarios de ACV no sólo para la producción de hidrógeno derivado de biomasa o de cultivos energéticos, sino vislumbrar la potencial producción de coproductos; particularmente gases de uso industrial tales como el dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno también derivados de la biomasa. Lo anterior, abre la posibilidad de expandir el análisis de viabilidad y la frontera de la bioeconomía derivada de cultivos energéticos basados en procesos biogénicos de captura de dióxido de carbono y en consecuencia de baja emisión de gases de efecto invernadero en análisis de ACV simples o consecuenciales.

Los resultados permiten demostrar que el uso de la Metodología de Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta fundamental para la toma de decisiones sobre la viabilidad ambiental de propuestas de cambios tecnológicos, especialmente para la introducción de fuentes de energías renovables.

Se encontró que, independizados los procesos unitarios, la conveniencia ambiental y energética de producción de hidrógeno para buses derivado de biomasa depende fuertemente del escenario considerado en términos de factor de emisión de la red eléctrica, del criterio de asignación utilizado, del coeficiente de asignación propio de dicho criterio de asignación y de la productividad de biomasa de los cultivos energéticos.

Asimismo, se pudo establecer que en un escenario actual del factor de red eléctrica argentina (0,4 Kg CO₂ eq/KWh) y una carga energética y ambiental o factor de asignación del 100% para

el hidrógeno, los buses cuyo combustible sería hidrógeno renovable producido en las cercanías de la Ciudad de Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina, cumplen con el criterio de la Directiva Europea 28/2009 de sustentabilidad mediante una significativa reducción neta de gases efecto invernadero, respecto de un combustible fósil a reemplazar igual o mayor a 70% de reducción.

Los procesos industriales de producción de hidrógeno y adecuación del mismo apto para consumo en buses representan aproximadamente el 97% de la carga energética total del ACV para procesos derivados de biomasa y 92% para el resto de los procesos (electrólisis del agua y reformado de gas natural).

3. Resultados

3.1 Resultados de Comparación de los 8 ACV analizados

A continuación, se exponen los resultados de los indicadores ambientales y energéticos comparativos de las tecnologías consideradas en dos escenarios consolidados: Escenario 1, real, del ACV con Factor de Emisión de la Red Eléctrica Argentina de 0,4 kg CO₂ eq/KWh (promedio actual años 2013 al 2017) y el Escenario 2, hipotético, con el Factor de Emisión de la Red Eléctrica Argentina de 0,1 kg CO₂ eq/KWh.

Como análisis complementario se caracterizan energéticamente las Etapas de cada tecnología para producción de H₂.

Escenario 1: Comparación de resultados de ACV con Factor de Emisión de la Red Eléctrica Argentina de 0,4 kg CO₂ eq/kwh (Actual). 100% Carga energética y ambiental otorgada al H₂.

Grafico 1. Emisión Neta Kg CO₂eq/100 Km recorridos

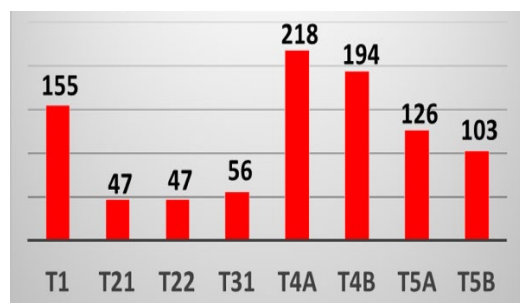


Gráfico 2. gCO₂eq/MJ del Combustible

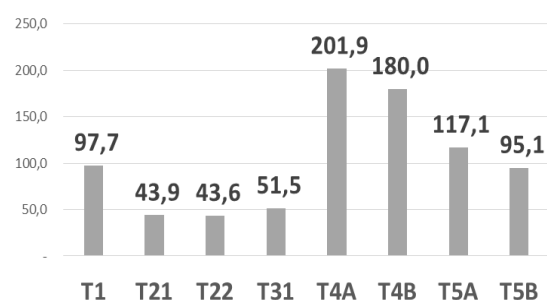


Grafico 3. Emisión neta de CO₂eq Totales de todo el ACV en toneladas

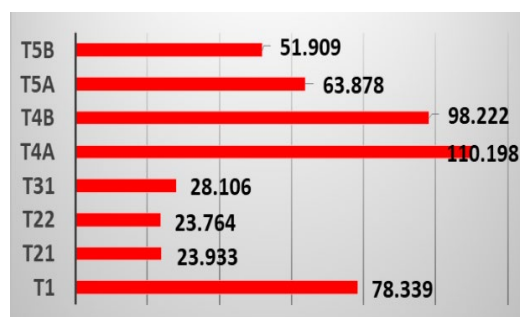


Grafico 4. Emisiones de CO₂eq Evitadas en todo el ACV en toneladas

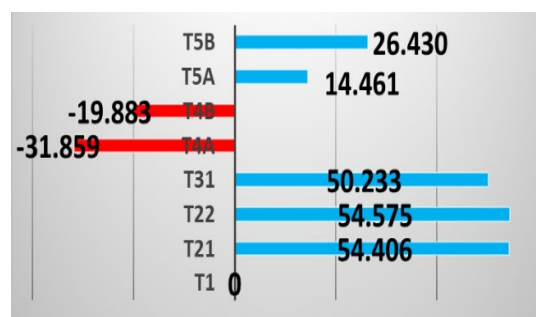


Grafico 5. Agua consumida en Litros/Km recorridos

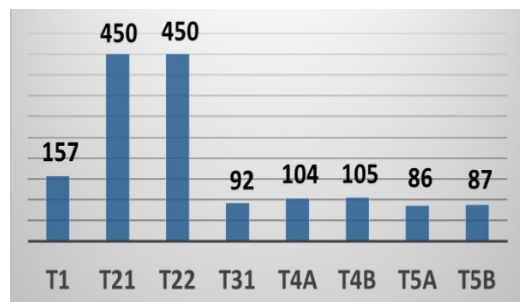


Grafico 6. Suelo utilizado en m²/100 Km recorridos

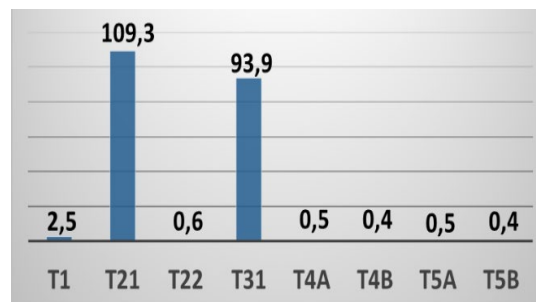


Grafico 7. Energía Consumida en GJ/100Km recorridos

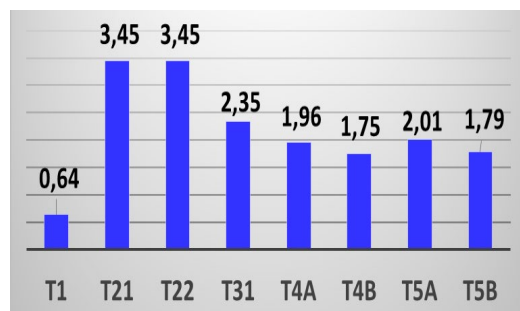
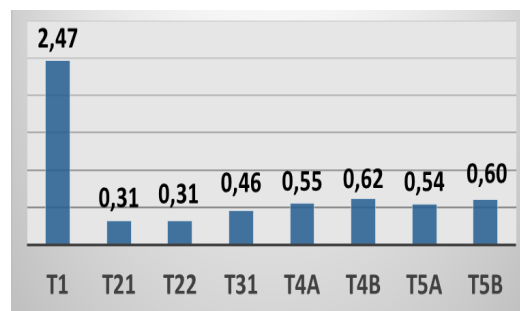
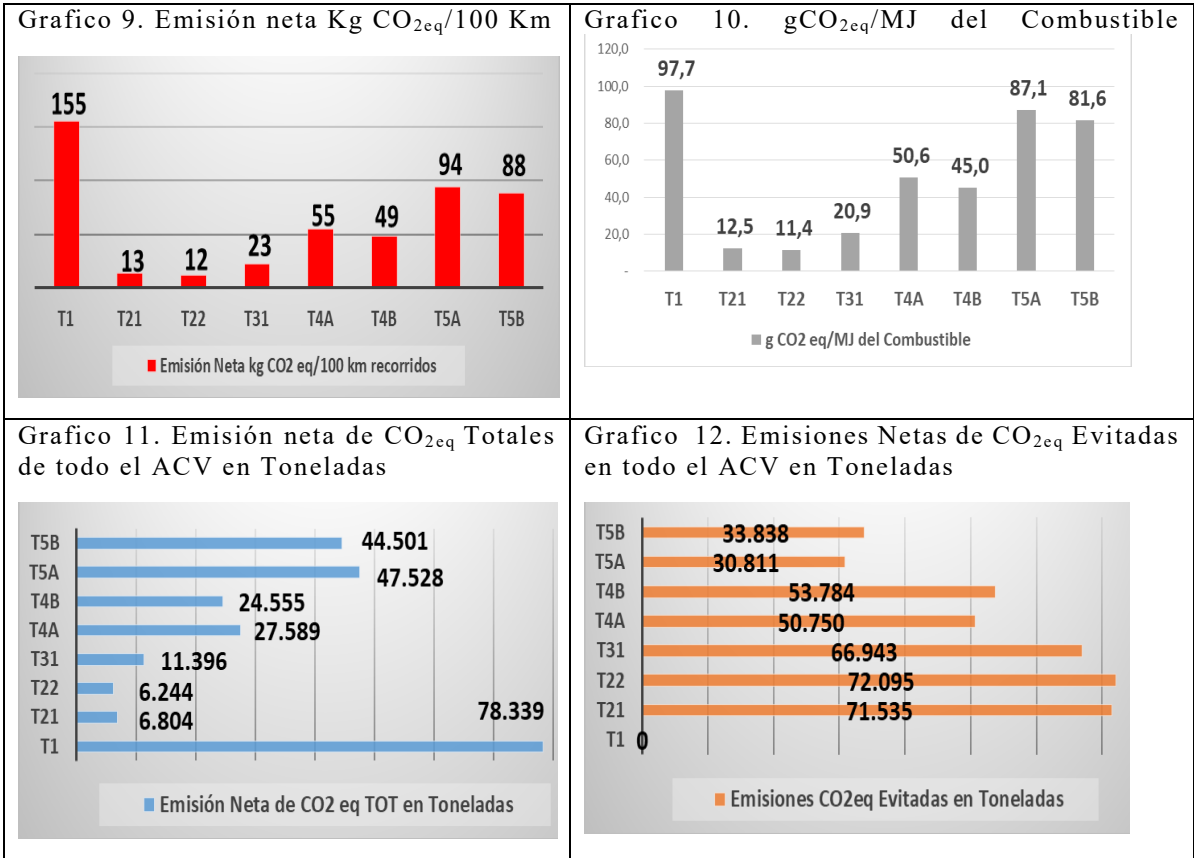


Grafico 8. Índice de retorno energético EROI



Escenario 2: Comparación de resultados de ACV con Factor de Emisión de la Red Eléctrica Argentina de 0,1 kg CO₂ eq/kwh (Hipotética). 100% Carga energética y ambiental asumida por el H₂.

Los gráficos asociados a emisiones de gases de efecto invernadero, son los que se modifican respecto del Escenario 1. Los otros indicadores: Agua, Suelo, Energía, EROI del Escenario 2, permanecen invariables respecto del Escenario 1.



3.2 Caracterización energética por Etapas de los 7 ACV de producción de H₂

Se presenta a continuación para cada tecnología de producción de hidrógeno y sus ACV analizados, las componentes de consumo energético por cada Kg de Hidrógeno; separados a su vez en términos de consumo de energía eléctrica y térmica (calor y combustible gas oil), a lo largo de las 5 etapas previas al consumo del combustible (desde la materia prima, su transformación y el suministro desde la estación de servicio):

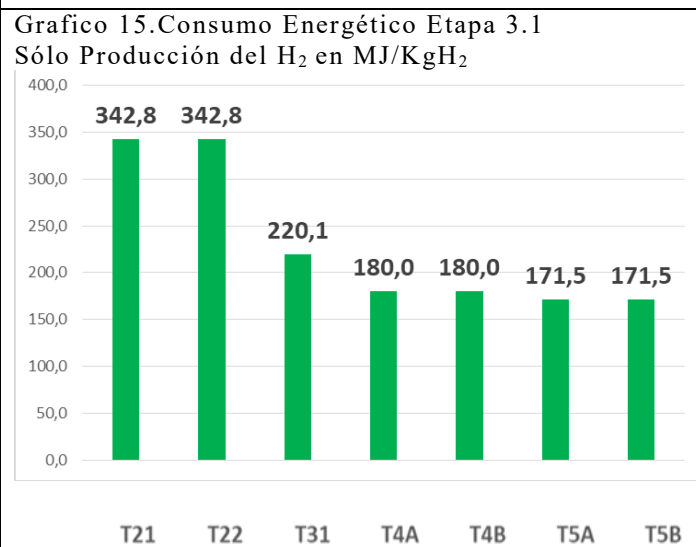
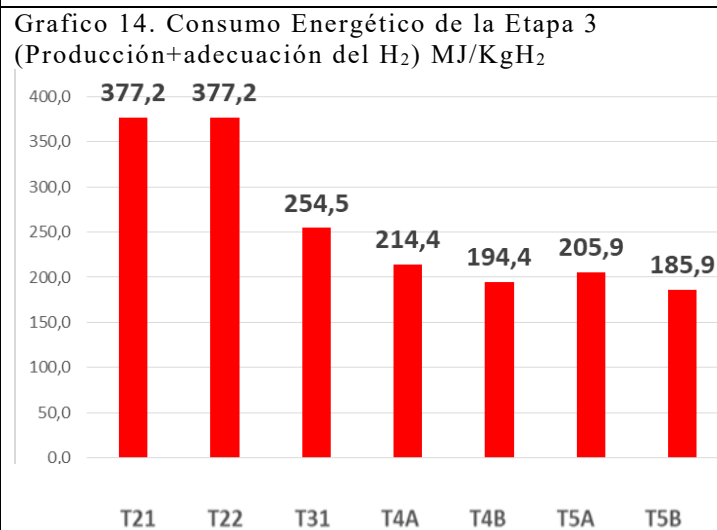
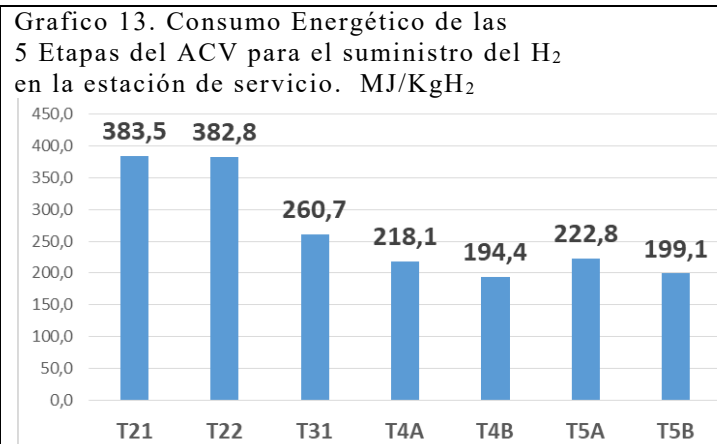
Tabla 2 Balance Energético: Comparación de Tecnologías de producción de Hidrógeno. Energías consumidas por Kg de H₂ y en porcentaje producido hasta la etapa considerada, independientemente del Escenario analizado.

x Kg H2	T21	T22	T31	T4A	T4B	T5A	T5B
UNIDAD	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
CONSUMO ENERGETICO HASTA LAS 5 ETAPAS	383,5	382,8	260,7	218,1	194,4	222,8	199,1
CONSUMO ENERGETICO EE HASTA LAS 5 ETAPAS	45,2	46,2	44,1	218,0	194,4	43,4	19,8
CONSUMO ENERGETICO TERMICO+TTE HASTA LAS 5 ETAPAS	338,3	336,6	216,6	0,1	0,0	179,4	179,3
ETAPA 3 COMPLETA (PRODUCCION+ADECUACION DEL H2)	377,2	377,2	254,5	214,4	194,4	205,9	185,9
ETAPA 3 COMPLETA MATERIA PRIMA	335,6	335,6	214,0	0,0	0,0	166,3	166,3
ETAPA 3 COMPLETA ENERGIA ELECTRICA	41,6	41,6	40,5	214,4	194,4	39,5	19,5
ETAPA 3.1 COMPLETA	342,79	342,8	220,1	180,0	180,0	171,5	171,5
ETAPA 3.1 EE	7,2	7,2	6,1	180,0	180,0	5,1	5,1
ETAPA 3.1 MATERIA PRIMA	335,59	335,6	214,0	0,0	0,0	166,3	166,3

%	T21	T22	T31	T4A	T4B	T5A	T5B
CONSUMO ENERGETICO HASTA LAS 5 ETAPAS	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
CONSUMO ENERGETICO EE HASTA LAS 5 ETAPAS	11,8%	12,1%	16,9%	99,9%	100,0%	19,5%	10,0%
CONSUMO ENERGETICO TERMICO+TTE HASTA LAS 5 ETAPAS	88,2%	87,9%	83,1%	0,1%	0,0%	80,5%	90,0%
ETAPA 3 COMPLETA (PRODUCCION+ADECUACION DEL H2)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
ETAPA 3 COMPLETA MATERIA PRIMA	89,0%	89,0%	84,1%	0,0%	0,0%	80,8%	89,5%
ETAPA 3 COMPLETA ENERGIA ELECTRICA	11,0%	11,0%	15,9%	100,0%	100,0%	19,2%	10,5%
ETAPA 3.1 COMPLETA	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
ETAPA 3.1 EE	2,1%	2,1%	2,8%	100,0%	100,0%	3,0%	3,0%
ETAPA 3.1 MATERIA PRIMA	97,9%	97,9%	97,2%	0,0%	0,0%	97,0%	97,0%

Fuente: Elaboración propia

A continuación en los Gráficos 13, 14 y 15, puede apreciarse la demanda de energía hasta la etapa considerada en cada tecnología analizada.



Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones y Discusión

4.1 Conclusiones

- 1) Se obtuvieron por primera vez en Argentina datos preliminares para un ACV del tipo simple o lineal (no consecucional) para la producción y uso del hidrógeno en buses, de fuentes renovables y no renovables.
- 2) Se generó con motivo del presente estudio de ACV información de la huella de carbono preliminar de gran parte de la producción de diésel oil de Argentina, que hasta el momento no estaba disponible y del uso del hidrógeno renovable para buses.
- 3) La conveniencia ambiental y energética de producción de hidrógeno para buses derivado de biomasa depende fuertemente del escenario considerado en términos del factor de emisión de la red eléctrica argentina y del criterio de asignación utilizado.
- 4) En un escenario actual del factor de red eléctrica argentina (0,4 Kg CO₂ eq/kwh) y una carga energética y ambiental o factor de asignación del 100% para el hidrógeno, los buses cuyo combustible sería hidrógeno renovable producido en las cercanías de la Ciudad de Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina, **cumplen con el criterio de la Directiva Europea 28/2009 de sustentabilidad mediante una significativa reducción neta de gases efecto invernadero, respecto de un combustible fósil a reemplazar igual o mayor a 70% de reducción.**
- 5) Los procesos industriales de producción de hidrógeno y los procesos de adecuación para el suministro y consumo, representan entre el **92% al 98% de la carga energética total** del ACV según la tecnología de hidrógeno analizada; con lo cual son relevantes los resultados de la otra Unidad Funcional resultante: MJ/kgH₂ y gCO₂eq/Kg H₂ del hidrógeno suministrado en el punto de consumo. En todos los casos analizados, la logística de materia prima y del transporte de hidrógeno en un radio de influencia del orden de 50 km del consumo del mismo no es tan relevante energéticamente y en términos de emisiones GEI generadas.
- 6) Relacionado con la conclusión anterior, para el caso de los balances energéticos e independientemente del Escenario estudiado, en los ACV de todas las tecnologías analizadas para el suministro de hidrógeno apto para consumo en las estaciones de servicio, la etapa de producción de hidrógeno es la más demandante en términos energéticos: entre el **80% al 90%** del total de la energía demandada de cada ACV dependiendo de la tecnología considerada y la configuración de su suministro en las estaciones de servicio.

- 7) Para el caso de los balances energéticos e independientemente del Escenario estudiado, en todas las tecnologías analizadas de ACV para el suministro de hidrógeno apto para consumo en las estaciones de servicio, la etapa de adecuación representa entre el 9% al 11% del total de la demanda energética para su suministro.
- 8) Entre las tecnologías renovables, la tecnología de reformado del biogás es menos demandante energéticamente que las de gasificación de la biomasa sólida en un 47%.

4.2 Discusión

Se somete a discusión todas las implicancias técnicas, económicas y sociales sobre qué podría pasar si Argentina cambiara todo su parque automotor de buses, camiones y vehículos livianos basados en motores de combustión interna a motores eléctricos de celdas de combustible alimentados a hidrógeno renovable. Se hace a continuación una extrapolación con los resultados obtenidos respecto de la reducción de emisiones, la demanda de materia prima y de suelo.

Estas estimaciones están calculadas sobre la componente transporte, del total de emisiones GEI declaradas por Argentina ante Naciones Unidas en el Reporte de Emisiones⁵ del Año 2017 (el cual es referido a cálculos del año 2014) .

Todo lo expuesto a continuación es para el período de un año

Total de emisiones GEI reportadas por Argentina (2014): 368 Millones de T CO₂ eq

Total de emisiones GEI reportadas por Argentina referidas al transporte: 55,2 Millones de T CO₂ eq Estas emisiones corresponden aproximadamente a 13 Millones⁶ de vehículos para el mismo año 2014 (Incluye: Buses, vehículos livianos y camiones)

Total de emisiones GEI equivalentes evitadas por el uso de Hidrógeno renovable derivado de biomasa: 38,64 Millones de T CO₂ eq (70% de ahorro).

Gas Oil fósil equivalente ahorrado/evitado: 13,2 Millones de toneladas (Aproximadamente 10 años de producción de GO Fósil equivalente de toda Argentina referidos al nivel de producción de 2017).

⁵ <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/files/inventario-nacional-gei-argentina.pdf>

⁶ <http://www.adefa.org.ar/es/estadisticas-anuarios>

Demanda de Hidrógeno producido por la Gasificación de Biomasa proveniente de álamo densificado de rápido corte

Estimaciones derivadas de una Red Eléctrica con FE 0,4 Kg CO₂ eq/KWh

Total de hidrógeno renovable requerido: 3,2 Millones de toneladas

Total de Biomasa Seca (BMS) requerida para la producción de hidrógeno: 58,6 Millones de Toneladas de BMS

Total de suelo necesario ocupar para la producción de hidrógeno renovable: 3,2 Millones de hectáreas. (En procesos circulares de 3 grupos anuales de 1,07 Millones de Ha)

Demanda de Hidrógeno producido mediante el Reformado de Gas Natural

Estimaciones derivadas de una Red Eléctrica con FE 0,4 Kg CO₂ eq/KWh

Total de hidrógeno (no renovable) requerido: 12,15 Millones de toneladas

Total de Gas Natural (GN) requerido para la producción de hidrógeno: 40,6 Millones de toneladas. 58 Millones de Nm³ de GN

Demanda de Hidrógeno producido mediante la Electrólisis del Agua

Estimaciones derivadas de una Red Eléctrica hipotético de FE 0,1 Kg CO₂ eq/KWh

Total de hidrógeno renovable requerido: 3,5 Millones de toneladas

Total de Energía Eléctrica requerida para la producción de hidrógeno: 173.111 GWh

Potencia instalada aproximada: 25.000 MW. (Factor de planta: 0,8 con un total de 8760 horas anuales de operación).

Bibliografía

Libros

Prabir Basu, Dalhousie University and Greenfield Research Incorporated-Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction. Second Edition. Practical Design and theory p (2013). Academic Press is an imprint of Elsevier 32 Jamestown Road, London NW1 7BY, UK, 525 B Street, Suite 1800, San Diego, CA 92101-4495, USA

M. Laborde y F. Rubiera. La energía del hidrógeno. Buenos Aires 2010, 191 páginas. ISBN 978-987-26261-0-5, CYTED

M. Laborde, E. Lombardo, F. Bellot Noronha, J. Soares Boaventura Filho, J.L. García Fierro, M.P. González Marcos. Potencialidades del hidrógeno como vector de energía en Iberoamérica. Buenos Aires 2010, 90 páginas. ISBN: 978-987-26261-1-2, CYTED.

Publicaciones

Evolución de la reducción de emisiones producida por el corte obligatorio y la exportación de biodiesel argentino. Ing. Agr. Jorge Antonio Hilbert, Ing. Ind. Sebastián Galbusera. INTA Informes Técnicos Bioenergía Año 3 N° 6. ISSN 2250-8481. Año 2014.

Jamie Ally (2015) Tesis for the degree of Doctor of Philosophy of Engineering Murdoch University Perth, Research Supervisor: Dr. Trevor Pryor, Murdoch, Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Hydrogen Fuel Cell, Natural Gas, and Diesel Bus Transportation Systems in Western Australia, University,. Western Australia, November, 2015.

Stella Carballo (SIG), Jonatan Manosalva (SIMAPRO), Nicole Michard (Huella hídrica), Estudios técnicos especiales, Dirección del estudio Jorge A. Hilbert.

Consultor Sebastian Galbusera (calculadores), Leila Schein Universidad de Lujan, Coordinación del proyecto: Victor Castro, Corina Yacobelli, Colaboración personal técnico empresas. Cargill · Juan Pablo Pane, · Juan Font, COFCO: Montenegro María Gabriela, LDC · Santiago Sanguinetti, Veronica Vicco, Corina Yacobelli, Vicentin: Carolina Zürcher. T6: Guillermo Garcia. Calculo de la reducción de emisiones del biodiesel Argentino. Estudio realizado por INTA para CARBIO. En el presente documento se resume el análisis de la cadena productiva de biodiesel y subproductos a partir de soja por CARBIO. Equipo INTA: Equipo CARBIO: Julio 2018.

Pamela L. Spath, Margaret K. Mann, Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming, National Renewable Energy Laboratory, Revised February 2001 . NREL/TP-570-27637

Ana Susmozas, Diego Iribarren, Javier Dufour 2013, Life-cycle performance of indirect biomass gasification as a green alternative to steam methane reforming for hydrogen production. a Systems Analysis Unit, Instituto IMDEA Energía, 28935 e Móstoles, Spain b Department of Chemical and Energy Technology, ESCET, Rey Juan Carlos University, 28933 e Móstoles, Spain. International Journal of Hydrogen Energy

The Future of Hydrogen Economy Bright or Black, Abril 2003. Ulf Bossel et al. www.efcf.com/reports, Fuel Cell Seminar.

Páginas web y archivos web de interés-Buses a Hidrógeno

<http://www.fch.europa.eu/project/new-bus-refuelling-european-hydrogen-bus-depots>

<http://www.fuelcellbuses.eu/> Proyecto de la Unión Europea para la producción de Hidrógeno a gran escala para alimentación de buses con celdas de hidrógeno

Bibliografía relacionada a la producción de biomasa y álamos densificados

Cerrillo, T.; Facciotto, G.; Bergante, S. 2008. Biomass production of different willow's combinations - preliminary results. In: Proceedings of the '16° European Conference & Exhibition, From Research to Industry and Markets'. Valencia, Spain 2-6 June 2008. 567-569

FAO-ONU Comisión del Alamo. Manual del Alamo y el Sauce. <http://www.fao.org/forestry>

Komlenovic, N; Krstinic, A; Kajba, D and I. Bach. 1996. Selection of arborescent willow clones suitable for biomass production in Croatia- Environmental and social issues in poplar and willow cultivation and utilization. Proceedings - International Poplar Commission, Sess.20. Budapest (Hungary), 1-4 Oct 1996.

Producción de biomasa de diferentes combinaciones de especies de sauces. Primeras evaluaciones en Italia y en Argentina aplicables a Cultivos de Corta Rotación (CCR). Gianni Facciotto¹, Teresa Cerrillo², Lorenzo Vietto¹, Sara Bergante¹, Laura Rosso¹ 1 Unità di Ricerca per le Produzioni Legnose Fuori Foresta, Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura (Research Unit for Intensive Wood Production) C.R.A. – PLF. St. Frassineto Po 35 – 15033 Casale Monferrato (AL) – Italia E-mail gianni.facciotto@entecra.it; lorenzo.vietto@entecra.it; plf@entecra.it 2 EEA Delta del Paraná, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Paraná de las Palmas y Canal Laurentino Comas, Campana, Buenos Aires, Argentina. E-mail: tcerrillo@correo.inta.gov.ar

Smart, L; T.A. Volk, T; Lin, J; Kopp, R.F.; I.S. Phillips, I.S.; Cameron, L.; White E.H. and L.P. Abrahamson. 2005. Genetic improvement of shrub willow (*Salix* spp.) crops for bioenergy, bioproducts, and environmental applications. *Unasylva*. 56:51-55.

Short Rotation Crops, <http://www.shortrotationcrops.org/>

Producción de Gas Oil en Argentina

Sistema APA de Colección de datos de insumos, materia prima, energía y productos y coproductos. YPF S.A. Oficinas Centrales de CABA. Abril 2017 a Abril de 2018.

CV Resumido de los Autores

1 Leonardo Iannuzzi, Ing Civil, Especialista en Ingeniería Ambiental y Maestría en Energías Renovables. Cel +54-911-5175-4965. Mail: leoianuzzi@hotmail.com

Consultor en Sostenibilidad. Auditor Líder Internacional en Sistemas Integrados de Gestión: ISO 9001:2015-ISO 14001:2015-OHSAS 18001:2007 e ISO 45001:2018. Experiencia internacional en 18 países.

2 MSc. Jorge Antonio Hilbert, INTA-Instituto de Ingeniería Rural-Profesional Asesor de Nivel Internacional en Gestión de Actividades de Innovación-Argentina, Dirección Cel: +54 9 11 4143 4394- E mail: hilbert.jorge@inta.gob.ar; jorgeantoniohilbert@gmail.com

Más de 170 publicaciones y trabajos científicos. Doctorando en Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de General Sarmiento Categorización CONEAU “B”- Res. N° 1178/11 2014

3 Doctor Ingeniero Mecánico Electo Silva Lora, Responsable del Núcleo de Excelencia en Generación Termoeléctrica y Distribuida Instituto de Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Itajubá-Brasil, Cel: +55-35-36291321-Mail: electo@unifer.edu.br

Posdoctor e Investigador. Doctorado en Construcción de Generadores de Vapor y Reactores, San Petersburgo, Rusia. Maestría en Usinas Termoeléctricas, Odessa, Ucrania. Ingeniero Mecánico, Odessa, Ucrania. Ing Químico Universidad de Sherbroke, Canadá