



VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN LA ZONA METROPOLITANA DE MÉRIDA, YUCATÁN

Aldo B. Contreras-Terán¹, J. Fortuna-Espinosa², D.V. Ponce-Marbán¹, M.A. Smit¹

¹. Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, 97200 Mérida, Yucatán, México.

². Total Energy – Servicios de Consultoría de Hidrógeno, Guillermo Ortega Vargas, Manzana. 3, 25-4, Fraccionamiento los Héroes, Sección II, 50246, Toluca, México.

Hoy en día a pesar de los recursos energéticos con que cuenta México, éste requiere seguridad energética futura, mejorar la calidad del aire, disminuir gases de efecto invernadero y mejorar en la competitividad industrial y tecnológica. Para esto, el hidrógeno se visualiza como un prometedor vector de energía limpia.

En el caso de la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM), según la Dirección de Transporte del Gobierno del Estado de Yucatán en el documento del programa de modernización del transporte público de la ciudad de Mérida, el sistema de transporte público urbano se compone de una flota de aproximadamente 1,700 unidades con tecnología basada en combustibles fósiles, el sistema realiza aproximadamente 750,000 viajes que mueven a 352,262 habitantes cada día [1]; además aproximadamente el 34.3% de la movilidad de la ZMM se realiza en transporte público [2]. Como consecuencia, el sistema de transporte público local es una de las principales causas de las emisiones de NO_x, HC, CO y CO₂. Por esta razón, es importante mejorar la eficiencia del sistema de transporte local con alternativas tecnológicas más limpias.

Este trabajo es un primer paso hacia un mapa de ruta donde ha realizado un estudio de los diferentes aspectos técnicos, ambientales y económicos relacionados con la implementación de la tecnología del hidrógeno en el sector del transporte público en la ciudad de Mérida, Yucatán. Se definieron 3 escenarios para la implementación de un

sistema de producción de H_2 mediante electrolisis del agua a partir de 3 diferentes fuentes de energía eléctrica (red eléctrica convencional, eólica y solar fotovoltaica) basada en el potencial de los recursos de la ZMM, para plantas distribuidas con capacidad de producción de H_2 de 432 kg de H_2 al día, almacenamiento del H_2 en estado gaseoso en tanques de acero inoxidable y la compresión mediante compresor recíprocante con una salida de 35 MPa suficientes para alimentar los tanques de hidrógeno del autobús CITARO Fuel Cell Hybrid aquí propuesto cuyo esquema se puede ver en la figura 1 y sus principales características son las siguientes [3]: chasis: de piso bajo, 12 metros de longitud, 2,55 m de ancho y 3,7 metros de altura; 3 puertas (delantera-intermedia-trasera), capacidad de 70 pasajeros., autonomía: de 200 a 250 km por cada 35 kg de hidrógeno, tiempo de vida útil de seis años, velocidad máxima de 80 km/hr, tren motriz en la parte trasera (motor eléctrico-transmisión-eje), potencia de salida de la unidad de celdas de combustible 200 kW (2 stacks de celdas tipo PEM), banco de almacenamiento de H_2 de 7 tanques de hidrógeno comprimido a una presión nominal de 350 bar (35 Mpa) y 35 Kg de capacidad de almacenamiento (476 Nm^3), baterías Ion-Litio, cero emisiones contaminantes, no emisión de ruido, unidad de aire acondicionado y peso de 18 toneladas. La figura 1 muestra la ubicación de los componentes, el flujo del hidrógeno y el flujo de energía eléctrica la cual es alimentada a los motores eléctricos que van sobre las ruedas traseras y que le dan el movimiento al autobús.

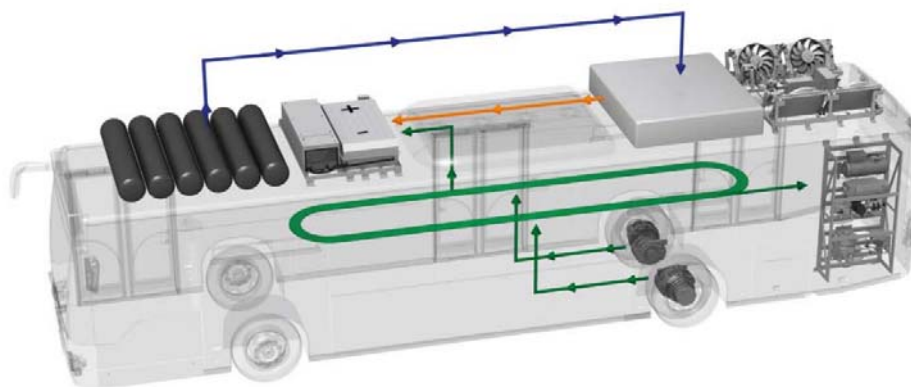


Figura 1. Diseño del autobús Citaro FuelCell Hybrid [56].

Un ejemplo de una estación de hidrógeno se muestra en la figura 2 que es la solución ideal para los autobuses de gran tamaño. A modo de ejemplo, esta estación cuenta con 4

puntos de llenado rápido y todo el equipamiento e interconexiones que permitan entregar el combustible de alta presión de la celda de combustible [4,5]. El tiempo de recarga por autobús es de 7 minutos, a las presiones mencionadas anteriormente [6].



Figura 2. Muestra la estación de servicio HySTAT™ 60 [4].

Como estrategia de implementación se considera el análisis de los casos específicos de la ruta del Circuito Metropolitano y de la ruta del circuito turístico de Turibus dentro de la ciudad de Mérida, Yucatán; se proponen estas rutas debido a que son de las más organizadas, además de contar con los datos técnicos necesarios para realizar el análisis de viabilidad técnico-económico. Las características del recorrido ruta del circuito metropolitano son tiene un recorrido relativamente largo, pues esta recorre los cuatro puntos cardinales de la ciudad, llegando a puntos clave para los usuarios como los centros comerciales o paradas donde los usuarios pueden transbordar de manera organizada.

La ruta del Circuito Metropolitano cuenta con 2 derroteros y una flota de 40 camiones (20 por derrotero) cada derrotero tiene una distancia de 63 km por lo cual cada camión recorre 3.15 km cada 9 minutos que es la frecuencia de salida entre cada camión a una velocidad promedio de aproximadamente 21 km/hr, con estas características cada camión tarda en recorrer un derrotero en 3 hrs aproximadamente, si tomamos en consideración una jornada laboral de 18 hrs, entonces cada camión realiza 6 viajes durante dicha jornada por lo cual un camión recorre aproximadamente 378 km al día [7].

La ruta del circuito de Turibus tiene una distancia de 20 km por derrotero y cada derrotero consta de 2 camiones, cada camión tarda en recorrer un derrotero en 1:45 hrs, esta ruta tiene una jornada laboral de 12 hrs, entonces cada camión realiza 7 viajes durante el día, por lo cual un camión recorre aproximadamente 140 km al día [53], la ruta del recorrido del Turibus 2 cuenta con 7 estaciones (plaza grande, museo de antropología, Itzimna, gran plaza, monumento a la bandera, parque de las Américas, zona hotelera) en las cuales se puede bajar o transbordar [8].

Los escenarios están basados en el número de autobuses a sustituir en las rutas seleccionadas y la vida útil del autobús, en el caso de la ruta del circuito metropolitano se considera la sustitución de los 40 autobuses entonces se divide entre los 6 años de la vida útil del autobús lo cual arroja que se deben sustituir 6.66 autobuses por año, a partir de este dato se generaron los escenarios 1 y 2, en el caso del escenario 3 se considero la opción adicional de analizar la implementación en el sector del servicio turístico de Mérida (Turibus).

El escenario 1 de implementación de plantas distribuidas y autobuses de hidrógeno se refiere a la implementación gradual de 1 planta de hidrógeno cada año a partir del año 2012 hasta llegar a 6 plantas en 2017, y por parte de los autobuses implementar 7 autobuses en 2013, 7 en 2014, 8 en 2015, 7 en 2016 , 7 en 2017 y 4 en 2018 año en el que se alcanza a sustituir la flota de 40 camiones de la que consta el circuito metropolitano, lo cual implica que en el año 2024 se termina la vida útil de los últimos autobuses adquiridos en 2018. Para el año 2025 solo se considera la venta del hidrógeno puesto que ya no hay autobuses en operación, y así cerrar el periodo de análisis económico del proyecto.

El escenario 2 se refiere a la implementación de 6 plantas de hidrógeno en 2012 y mantenerlas en funcionamiento hasta 2025, y por parte de los autobuses implementar 5 autobuses en 2013, 5 en 2014, 5 en 2015, 5 en 2016 , 5 en 2017 , 5 en 2018 y 10 en 2019, año en el que se alcanza a sustituir la flota de 40 camiones de la que consta el circuito metropolitano, lo cual implica que en año 2025 se termina la vida útil de los últimos autobuses adquiridos en 2019.

El escenario 3 se refiere a la implementación de 1 planta de hidrógeno en 2012 manteniéndola en funcionamiento de 2013 hasta 2025, y dos autobuses en ruta del

autobús turístico o Turibus de la ciudad de Mérida, Yucatán a partir de 2013 los cuales terminarían su vida útil en 2019, en ese año se vendería la planta de hidrógeno.

En el análisis de reducción de emisiones por la implementación de la tecnología del hidrógeno en el STPU de la ZMM se determinó el número de emisiones que se arrojan al ambiente por la aplicación de autobuses de hidrógeno y producción de energía mediante fuentes renovables de energía, contar con factores de emisiones por tipo de gas y supuestos técnicos, los cuales se muestran en la tabla 1 [9, 10].

Tabla 1. Principales supuestos para la cuantificación de emisiones contaminantes de los diferentes gases de escape de las unidades móviles.

Parámetro	valor	unidades
Número de pasajeros autobús H₂	70	Unidades
Factor de emisiones de CO	1	gr/pasajero por km
Factor de emisiones de HC	0.5	gr/pasajero por km
Factor de emisiones de NO_x	0.9	gr/pasajero por km
Factor de emisiones de CO₂	70	gr/pasajero por km
Factor eléctrico de conversión CO₂ equivalente por MWh	0.4698	CO ₂ equi/MWh
Factor de conversión de gramos a toneladas	1000000	ton

Se ha estimado la reducción de emisiones contaminantes y de efecto invernadero por implementación de autobuses de celdas de combustibles a hidrógeno, los cuales son monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de carbono (CO₂) respectivamente. Además se cuantifico la reducción de CO₂ por la generación de electricidad mediante fuentes renovables de energía.

La calidad del aire en las ciudades, está principalmente determinada por el transporte urbano, con una tendencia clara a seguir aumentando debido a que en muchas ocasiones hay falta de un sistema integral y eficiente de transporte público [11]. El modelo de autobús a implementar no emite ningún tipo de gas contaminante, pues el subproducto de las celdas de combustible es solamente vapor de agua [3], habrá una reducción de emisiones considerable tanto de gases de efecto invernadero (CO₂) así como de otros gases contaminantes (HC, CO, NO_x) que no se consideren de efecto invernadero pero que perjudican seriamente la salud humana y el medio ambiente.

Entonces tomando las características del transporte público y los factores de emisiones se puede estimar la cantidad de emisiones en el STPU en la ZMM por autobús.

El valor máximo de mitigación de emisiones para el escenario uno y dos se alcanzaría en el año 2018 y 2019 para los diferentes gases y es de aproximadamente 386 ton de CO, 193 ton de (HC), 348 ton de NO_x y de 27.04 kTon de CO₂. Entonces se puede visualizar que la reducción de emisiones obedece a la estrategia de implementación gradual de autobuses según cada escenario propuesto, pero aunque el comportamiento de las graficas es similar se tienen diferentes cantidades para los diferentes gases ya que tienen diferentes factores de emisión y además diferentes potenciales de riesgos.

Del estudio realizado respecto a la operación diaria y las características técnicas de la planta de hidrógeno, se determinaron los requerimientos de agua y energía eléctrica. La cantidad anual de agua necesaria para operar la planta y producir hidrógeno para los diferentes escenarios de implementación. Se considera una tasa de conversión de utilización de agua 0.0118 m³/kg H₂.

De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua, el volumen concesionado para la producción de energía eléctrica en el estado de Yucatán es de 9,100,000 m³/año por lo que la cantidad máxima de agua requerida por las 6 plantas de producción de H₂ es de 11,164 m³/año lo cual representa un 0.122%, lo que significa que la cantidad de agua para esta aplicación tiene una mínima participación sin afectar el sistema de suministro de este recurso [12].

La demanda de energía eléctrica requerida por el sistema ha sido calculada para los diferentes escenarios. La demanda mínima requerida es de 8.28 GWh/año para una planta de producción de H₂ a implementar y la máxima es de 49.66 GWh/año para seis plantas de H₂.

Con el fin de hacer una comparación de la energía eléctrica demanda por la producción de H₂, se ha calculado el porcentaje de utilización por planta de Hidrógeno implementada con respecto a la capacidad de energía producida en la planta Mérida III, como se puede observar en la figura 3.12 que el porcentaje máximo de utilización sería de 1.70% para seis plantas de hidrógeno a implementar, lo cual no implica un fuerte impacto en caso se tome la energía eléctrica de la red convencional la cual está contemplada y forma parte de del análisis en este proyecto.

Además se ha estimado la reducción de emisiones por la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía. Una vez calculada la demanda de energía

eléctrica y la selección y especificación de los diferentes componentes de la cadena es importante complementar que bajo el caso hipotética de poner la granja eólica y fotovoltaica en Sisal se requieren para satisfacer la demanda de energía de una planta de hidrógeno aproximadamente 4 granjas eólicas una superficie de aproximadamente 4.1 hectáreas y para la demanda máxima de energía eléctrica que está dada por la implementación de 6 plantas de hidrógeno se requerirían aproximadamente 26 granjas eólicas lo que representa 24.96 hectáreas; y para el caso de las granjas fotovoltaicas se requerirían 8 y una superficie de 8.53 hectáreas para una planta de hidrógeno y finalmente se requerían 49 granjas fotovoltaicas que ocuparían una superficie aproximada de 51.17 hectáreas para 6 plantas de hidrógeno.

La reducción máxima de las emisiones por uso de energía renovable en lugar de energía fósil para la producción de H₂ es de alrededor de 23.33 kton de CO₂eq/año que se pueden evitar por la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía para los diferentes escenarios. En la figura 3 se muestra el total de emisiones de CO₂eq que pueden ser evitadas por la utilización del hidrógeno en el STPU y la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía. Por lo tanto, puede lograrse una reducción total por año de 47 kton de CO₂eq.

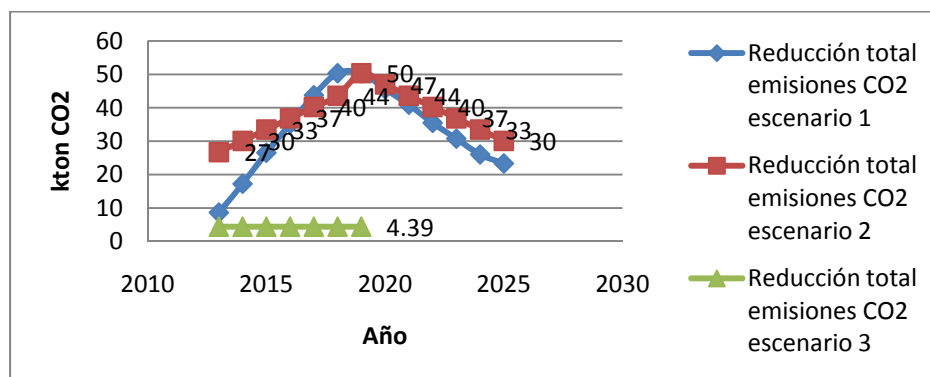


Figura 3. Total de emisiones mitigadas de CO₂eq autobuses de celdas de combustible de hidrógeno y fuentes renovables de energía para los diferentes escenarios de implementación.

Finalmente si comparamos las emisiones de CO₂ anuales del sistema de transporte en la ZMM que son de aproximadamente 543,140.98 ton de CO₂ contra las emisiones máximas que se podrían mitigar que son en el orden de aproximadamente 27,042.12 ton de CO₂ al sustituir los 40 autobuses de la ruta del metropolitano actuales por los autobuses de celdas de hidrógeno propuestos, entonces esto representaría un solo 4.98% del total, lo

cual no implica un porcentaje representativo en términos de efectos de mitigación de CO₂, aunque si representaría un beneficio para la ruta dado que tendría mucha aceptación por parte de los usuarios debido a la tendencia actual sobre los servicios a partir de energías limpias, además se estaría incentivando el uso del hidrógeno como combustible limpio en la ZMM lo cual podría motivar el desarrollo de la aplicación de la tecnología del hidrógeno en diversas aplicaciones. Bajo los supuestos técnicos y ambientales de este trabajo se tiene que se podría lograr una reducción de CO₂ de hasta 47 kton por año mediante la implementación de autobuses de celdas de combustible a hidrógeno y producción de hidrógeno con fuentes renovables de energía.

Respecto a los resultados del análisis económico se tiene que la estimación de la inversión inicial requerida para una planta de producción y suministro de hidrógeno para el año 2012 con un sistema de energía conectado a la red eléctrica es de 45,765,308.65 MXN, para un sistema con fuente de energía eólica de 86,065,278.87 MXN y para un sistema con fuente de energía solar fotovoltaica de 116,304,057 MXN y el costo del autobús con celdas de combustibles a hidrógeno es de 21,220,211.52 MXN.

Entonces, como se muestra en la figura 4 y bajo los supuestos económicos de este trabajo se ha estimado que los costos producción y suministro por kg de H₂ en el periodo 2012-2025 para un sistema de electrólisis en sitio con suministro de la red eléctrica será de 84.85 a 77.23 MXN/kg H₂ es decir se reduce en un 8.98%; con energía eólica de 112.52 a 58.22 MXN/kg H₂ donde la reducción es del 50.07%, y para un sistema con energía solar fotovoltaica de 289.70 a 117.36 MXN/kg H₂ donde la reducción es del 59.49%.

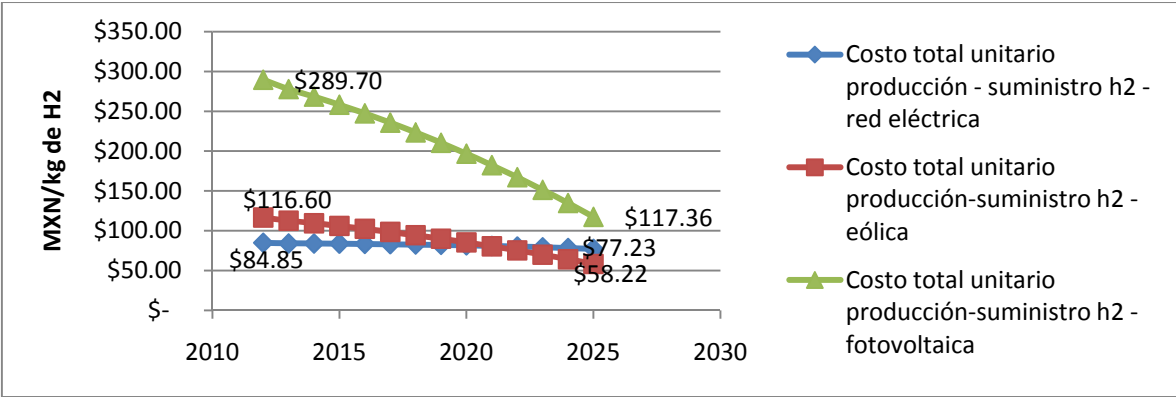


Figura 4. Reducción del costo de producción y suministro de H₂ para diferentes fuentes de energía eléctrica MXN/kg H₂.

Finalmente, mediante el Valor Presente Neto (VPN) y un análisis de sensibilidad se determinó la viabilidad económica de la implementación de la tecnología del hidrógeno en el sistema de transporte público urbano en la ZMM. Los resultados del VPN para cada escenario y tipo de tecnología de fuente de energía se pueden ver en la tabla 2. Tanto el escenario 1 como el escenario 2 no son viables económicamente y tampoco el arreglo en el escenario 3 respecto al sistema con fuente de energía solar fotovoltaica.

Tabla 2. Valor Presente Neto de los diferentes sistemas de producción suministro y conversión de hidrógeno por electrolisis en sitio con diferentes fuentes de energía eléctrica

	red eléctrica	eólica	fotovoltaica
Parametro	VPN (MXN)	VPN (MXN)	VPN (MXN)
Escenario 1	-\$1,239,982,509.22	-\$1,517,860,750.01	-\$2,431,254,868.95
Escenario 2	-\$1,286,623,987.99	-\$1,630,110,297.56	-\$2,900,651,137.27
Escenario 3	\$161,089,005.86	\$47,172,040.22	-\$76,396,763.44

Conclusiones

Aunque existen varios impactos positivos y directos, económicos y sociales, tales como la generación de empleo, promoción de la investigación y desarrollo de tecnologías limpias, y el impacto ambiental, se tiene la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, gases contaminantes y reducción de ruido debido a la utilización de combustible y tecnologías limpias, se necesitaría masificar la implementación de la tecnologías del hidrógeno para obtener los beneficios sobre todo ambientales lo cual no es posible en este momento debido a los altos costos de producción, suministro y conversión del hidrógeno esto a causa las características técnicas de eficiencia de los equipos, su corto tiempo de vida útil y la desventaja frente a la madurez de la tecnologías basadas en combustibles fósiles.

Cabe destacar que en la actualidad, en México no existen las bases legales, normativas y reguladoras para llevar a cabo un proyecto de esta modalidad, bajo el esquema de generación renovable. Sin embargo, debido a la visible apertura del sector eléctrico nacional hacia las energías renovables esta modalidad no debe ser descartada.

Se puede concluir que en este momento la aplicación de la tecnología del hidrógeno con enfoque en el sistema de transporte público en Mérida no es económicamente viable dados los altos costos en la cadena de producción, suministro y conversión del hidrógeno.

Aunque debido a la ventaja de ser Mérida un destino turístico existen las condiciones favorables para implementar la tecnología del hidrógeno mediante proyectos piloto en rutas turísticas pequeñas como el Turibus, ya que de acuerdo a los resultados económicos y bajo los supuestos de este trabajo la implementación en esta ruta es económicamente viable para los casos de la producción de hidrógeno mediante sistemas conectados a la red eléctrica convencional y fuente de energía eólica y a un corto plazo.

Referencias

- [1] Dirección de Transporte, Gobierno del Estado de Yucatán, *Programa de modernización del transporte público de la ciudad de Mérida*, Mérida, Yucatán , 2009.
 - [2] CINVESTAV Mérida-SEDESOL-Gobierno del Estado de Yucatán-Hueltron S.A de C.V, Estudio integral de viabilidad y transporte urbano para la ciudad de Mérida, Yucatán, 2002.[En línea]. Available: http://www.mda.cinvestav.mx/oumid/HTML/Indicadores/4_MANEJO%20AMBIENTAL_HTML/IE11_RESUMEN.html. [Último acceso: Mayo 2011].
 - [3] Mercedes Benz, Citaro Fuel Cell Hybrid technical data brochure,[En línea]. Available:http://www2.mercedesbenz.co.uk/content/unitedkingdom/mpc/mpc_unitedkingdom_website/en/home_mpc/bus/home/new_buses/models/regular_service_busses/citaro/FuelCELL_Hybrid.html. [Último acceso: Septiembre 2011].
 - [4] Hydrogenics Corporation, Catálogo en español de estaciones de servicio de hidrógeno HySTAT, [En línea]. Available: http://www.hydrogenics.com/hydro/brochure/Industrial_Brochure_SP/files/assets/downloads/publication.pdf . [Último acceso: Septiembre 2011].
 - [5] Hydrogenics Corporation; Cargnelli, Joe;, *Entwicklungen bei hydrogenics*,Workshop,Ulm, Germany, 2008.
 - [6] M. Pérez Bрева, *Plan de marketing para la sustitución de la flota de autobuses de Barcelona por autobuses de Hidrógeno*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2007, p. 91.
 - [7] H.Ayuntamiento de Mérida, Mapa de la ruta del Circuito Metropolitano, [En línea]. Available: http://www.merida.gob.mx/transporte/descargas/circuito_metro.zip. [Último acceso: Octubre 2011].
 - [8] H.Ayuntamiento de Mérida, Información del servicio del Turibus, [En línea]. Available: http://www.merida.gob.mx/Turismo/contenido/especiales/turibus/pop_turi.htm. [Último acceso: Septiembre 2012].
 - [9] J. Racero Moreno, *Il Jornada de movilidad sostenible*, 9 Febrero 2010.[En línea]. Available:http://www.meridasostenible.org/jornadas/Jornadas_Movilidad/II%20jornada/Racero_Merida.pdf. [Último acceso: Mayo 2011].
 - [10] Programa GEI México, Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energética (ATPAE), *Estimación del factor de emisión eléctrico para inventarios de emisiones corporativas de GEI*, México, 2008.
 - [11] SEMARNAT, *Emisiones atmosféricas del transporte*, [En línea]. Available: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/Calidad%20del%20aire/Transporte/EMISIONES%20ATMOSFERICAS/Doc0.htm>. [Último acceso: Junio 2011].
 - [12] CONAGUA, *Usos del Agua, Estadísticas del agua en México*, 2011. [En línea]. Available: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>. [Último acceso: Octubre 2012].
-