

Sistema de transporte masivo sustentable tipo BRT a base de pilas de hidrógeno en la ciudad de Maracaibo, estado Zulia

Sustainable mass transportation system type BRT based on hydrogen cells in the city of Maracaibo, Zulia state

Germery P. Aldama-A.

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.
Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0008-2750-4432> | Correo electrónico: germaryaldama@gmail.com

Recibido:12-07-2024 Admitido:21-07-2024 Aprobado:01-08-2024

Resumen

Este estudio tiene como propósito proponer la implementación de un transporte público tipo BRT a base de pilas de hidrógeno en la ciudad de Maracaibo, Estado Zulia. La crisis climática que cada vez impacta más en la región obliga a buscar alternativas que reduzcan los aumentos de temperatura registrados los últimos años, es por esto por lo que se propone un sistema de transporte masivo que además de solucionar los problemas de movilidad de la ciudad, no use combustibles fósiles, eliminando al 100% la huella de carbono, con la finalidad de aplacar el efecto invernadero.

Palabras clave: BRT, transporte, hidrógeno.

Abstract

The purpose of this study is to propose the implementation of BRT-type public transportation based on hydrogen cells in the city of Maracaibo, Zulia State. The climate crisis that is increasingly impacting the region forces us to look for alternatives that reduce the temperature increases recorded in recent years, which is why a mass transportation system is proposed that, in addition to solving the city's mobility problems, do not use fossil fuels, eliminating 100% of the carbon footprint to appease the greenhouse effect.

Key words: BRT, transportation, hydrogen.

Planteamiento del problema

La movilidad y el transporte son uno de los pilares fundamentales de una ciudad, sin embargo, corresponden a uno de los sectores con el mayor consumo de energía, siendo su principal fuente los combustibles fósiles. Los sistemas de transporte convencionales generan un gran impacto ambiental debido a la emisión de gases de efecto invernadero, como es el dióxido de carbono (CO₂), contaminando de esta manera el entorno [1].

Una de las consecuencias más notorias a causa de este fenómeno es el incremento de la temperatura que se ha registrado los últimos años en diversas partes del mundo. Según el informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) predice que, “hay un 80 % de probabilidades de que la temperatura media anual del planeta supere transitoriamente en 1,5 °C los niveles preindustriales en al menos uno de los próximos cinco años” [2, tit.1].

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) expuso que, “en 2020, la concentración de CO₂ en la atmósfera aumentó 2,57 partes por millón (ppm) hasta alcanzar 4,14 ppm en diciembre, la concentración más alta jamás registrada. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero, aunque el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), también están provocando el calentamiento global” [3, Párr. 8].

Partiendo de esto, diversas instituciones han realizado investigaciones para encontrar soluciones viables a esta problemática, generando propuestas en diversos tópicos que permitan controlar o revertir el cambio climático. Una de estas alternativas es la implementación de pilas de hidrógeno en sistemas de transporte

masivo, como el metro o el BRT. La utilización de este elemento puede llegar a convertirse en la solución para la operación de un transporte público autónomo y sustentable.

Gracias a la información recolectada por Meteoblue, un servicio meteorológico creado en la Universidad de Basilea, Suiza, en cooperación con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos y los Centros Nacionales de Predicción Ambiental, en el caso de Venezuela el INAMEH (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), se documentó que en la ciudad de Maracaibo, estado Zulia, se han experimentado aumentos en la temperatura los últimos 15 años, teniendo el registro más alto en el 2015, con un aumento de la temperatura promedio de 1,9°C. A su vez, en los últimos 10 años la precipitación en la ciudad ha estado por debajo del promedio, representando que con el pasar de los años las condiciones de la ciudad se vuelven cada vez más secas, por ende, el incremento de la temperatura [4].

Por consiguiente, es importante tomar acción con propuestas que mejoren el cambio climático de la ciudad, por esta razón, considerando que el transporte público en Maracaibo es sumamente importante para la movilidad de sus habitantes y aunque sea muy utilizado, una gran parte no se encuentra en condiciones óptimas, ya sea por no hacerse el mantenimiento adecuado o los vehículos ya pertenezcan a modelos antiguos, además de la utilización de combustible fósil, se genera como consecuencia la emisión de gases de efecto invernadero, impactando de forma directa con el aumento de la temperatura de la ciudad. Por esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál sería el sistema de transporte que además de solventar los problemas de la movilidad de Maracaibo, mitigue las consecuencias del cambio climático para la reducción de la temperatura de la ciudad?

Justificación

El presente artículo científico tiene como finalidad plantear la propuesta de un nuevo sistema de transporte masivo sustentable en la ciudad, ya que además de disminuir al 100% los gases de efecto invernadero debido a que el subproducto de la combustión del hidrógeno es sólo H₂O (agua), también proporciona a la ciudad un transporte autónomo del servicio eléctrico nacional, como sería en el caso del metro, y libre de la problemática de combustible por la que en ocasiones pasa el país.

Al disminuir los gases de efecto invernadero habría un impacto directo en el clima de la ciudad, reflejándose en la disminución de la temperatura, ya que se contrarrestaría el efecto invernadero, siendo este uno de los mayores causantes del calentamiento global. Con esta alternativa se ofrece una solución tanto para la crisis climática, como para la optimización de la movilidad y el transporte público en la ciudad de Maracaibo.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Proponer un sistema de movilidad y transporte sustentable tipo BRT basado en la utilización de pilas de hidrógeno para la ciudad de Maracaibo, estado Zulia.

Objetivos específicos

Establecer las necesidades de movilidad y transporte en la ciudad de Maracaibo.

Caracterizar el sistema BRT como medio de transporte a base de pilas de hidrógeno.

Diseñar un sistema de movilidad y transporte sustentable con la implementación del sistema BRT basado en pilas de hidrógeno.

Metodología

A continuación, en la Figura 1 se muestran las fases en las cuales transcurre la investigación.

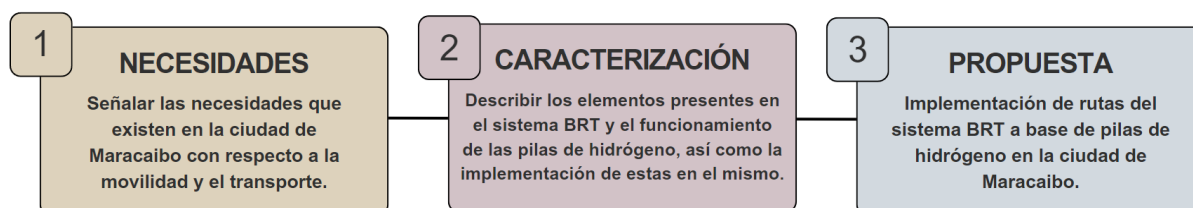


Figura 1. Flujograma de la metodología planteada

1. Necesidades de la movilidad y el transporte en la ciudad de Maracaibo

El transporte urbano es de vital importancia, ya que influye en el desarrollo económico y social de un país, debido a que es por medio de este que las personas se movilizan para poder cumplir con sus actividades cotidianas y laborales. Este constituye uno de los elementos básicos para la planificación urbana, pues permite que el usuario tenga acceso a un sistema que le permita movilizarse, descongestiona el tránsito y le da una mejor calidad de vida a los habitantes, siempre y cuando exista una buena planificación de rutas y de los sistemas implementados.

En Maracaibo se evidencia un grave problema en el sistema de transporte público urbano que se encuentra referido a uno de sus componentes más importantes, las unidades; ya que el modo principal de transporte de los marabinos son los automóviles por puesto, así como los autobuses. Estos carecen de un buen mantenimiento, además de ser modelos antiguos, generando de esta manera fallas en el motor que se reflejan en las emisiones de gases de efecto invernadero que estos producen debido a la combustión convencional. Por otra parte, las paradas no establecidas ocasionan congestión en el tráfico, colapsando de esta manera las vías y no hay un límite de pasajeros, por lo que, las unidades Por otra parte, las paradas, dificultando así la bajada de pasajeros y con este el aumento de los tiempos de espera [1].

2. Funcionamiento de la movilidad en Maracaibo.

En la ciudad de Maracaibo la movilidad con transporte público se da, sobre todo, en la zona oeste, centro y sur; en la zona este existen algunas rutas de transporte, aunque en menor proporción que en las anteriormente nombradas. Por otra parte, en la zona norte la movilidad se da en mayor parte por vehículos particulares [1, 5].

En la zona oeste se encuentra la Curva de Molina, de la cual salen la mayoría de las rutas de transporte público de Maracaibo, de manera tal que conecta la zona oeste con las demás zonas de la ciudad. Por ejemplo, la ruta Curva-San Martín-Milagro, la cual cubre el tramo de la Av. La Limpia hasta la Av. Universidad. Luego pasa por toda la Av. 5 de Julio para terminar en la Av. El Milagro. Otro ejemplo puede ser la ruta Limpia-Centro, la cual abarca toda la Av. La Limpia. Aunque existan todas esas rutas de transporte, también hay mucho tránsito de vehículos particulares, congestionando las vías en las horas de mayor tránsito. La Av. La Limpia también permite conectarse con vías como la Circunvalación 2, Av. Delicias, Av. El Milagro (pasando por el centro), así como llegar al casco central de la ciudad. El tráfico en esta incrementa entre las 7:30am y las 9:00am, cuando los usuarios agarran las rutas para llegar a sus trabajos, instituciones educativas, entre otras, así como entre las 6:00pm a 7:30pm, debido a que es cuando estos usuarios regresan a sus hogares.

La zona este es una de las zonas más comerciales, encontrándose negocios de todo tipo de rubro, así como la mayoría de las sedes de oficinas de la ciudad, por lo que gran parte del tráfico se moviliza a esta zona diariamente. Lo mismo ocurre con el centro de Maracaibo, siendo otra zona comercial, aunque dirigido más al comercio informal, además, acá se encuentran edificaciones dirigidas a la cultura y el turismo, como la Basílica, el Teatro Baralt, la Catedral, entre otros, por lo que también se puede ver un alto volumen de

tránsito. Expuesto esto se logra determinar que la zona oeste es la que presenta mayor movimiento en cuanto al transporte público, además, que la desorganización que hay en éste provoca más congestión del tránsito debido a que las paradas no están establecidas y las unidades no se encuentra en condiciones óptimas.

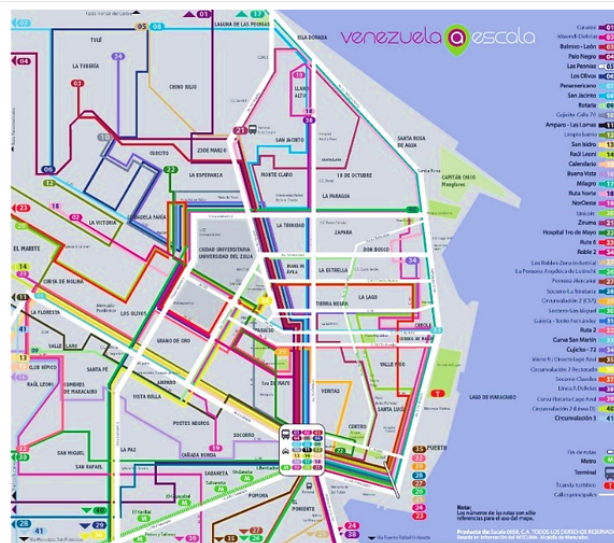


Figura 2. Rutas de Transporte Público Maracaibo [6]

3. Pila de hidrógeno

La pila de hidrógeno es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Parte de un combustible, es decir, el hidrógeno, y de un comburente, siendo este el oxígeno, para producir electricidad en forma de corriente continua y calor. Además, el subproducto que se genera de la combustión es agua (H_2O) completamente limpia, reduciendo de esta manera al 100% la huella de carbono. Sus principales componentes son [7]:

Ánodo: En el ánodo, el hidrógeno se oxida, liberando electrones.

Cátodo: El cátodo distribuye el oxígeno en la superficie del catalizador y conduce los electrones de vuelta.

Electrolito: Este material solo conduce iones cargados positivamente y bloquea los electrones.

Catalizador: Permite la reacción química entre el oxígeno y el hidrógeno, generando electricidad.

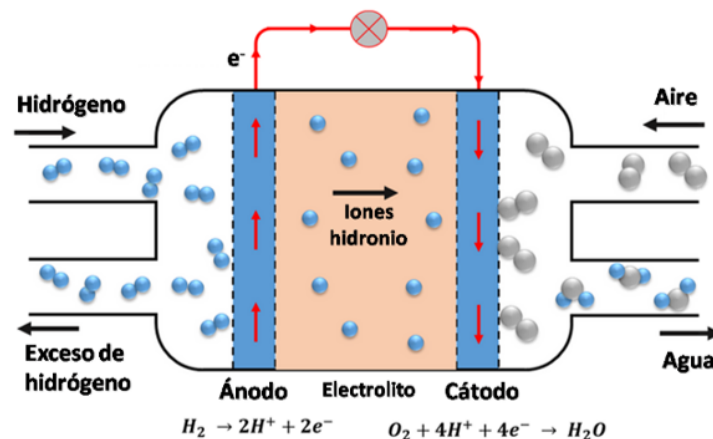


Figura 3. Pila de Hidrógeno [8]

4. Ventajas de la pila de hidrógeno

Tal como lo señala Alcalde [9] dentro de las ventajas del hidrógeno como combustible se tienen:

La producción de energía y calor de las pilas de hidrógeno no emite dióxido de carbono a la atmósfera.

Las pilas de hidrógeno demuestran ser más eficientes que otras fuentes de energía, como los motores de combustión interna.

El almacenamiento del hidrógeno producido aborda el reto de la intermitencia en las energías renovables: puede usarse cuando se necesite.

Permiten un tiempo de recarga ágil en comparación a las baterías eléctricas.

En un mundo que depende de dispositivos portátiles, las pilas de hidrógeno son fuentes fiables para alimentar estos objetos.

5. El hidrógeno como elemento

Según Alcalde, periodista especializado en ciencia, sociedad y medio ambiente, en su artículo para el National Geographic España del año 2023, explica que “a pesar de ser uno de los elementos más abundantes de la Tierra, el hidrógeno no es fácil de obtener, pues no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, sino que se genera a partir de otras sustancias que lo contienen, entre ellos el agua, el carbón y el gas natural” [9, Párr. 2].

La forma ideal de producirlo sería obtenerlo directamente del agua, una sustancia presente en el 70% del planeta, para lo cual sería necesario llevar a cabo un proceso denominado electrólisis, que consiste en la descomposición de las moléculas de agua (H_2O), en oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2). Sin embargo, generalmente es este un proceso costoso para el que se necesita mucha energía eléctrica que en la mayoría de los casos no procede de fuentes renovables para alimentar los electrolizadores [7].

Aun así, existe una vía más económica de generar hidrógeno que se basa en la manipulación del gas natural. Este proceso es conocido como reformado del gas natural, y podría ser una alternativa viable para la transición a energías sustentables. El problema radica en que este sistema no acaba con la dependencia energética, pues se basa en el combustible fósil para la obtención de este. “Para deshacerse de ese carbono remanente, los productores de hidrógeno recurren al método de captura y almacenamiento de carbono, una técnica que permite inyectar bajo tierra este exceso de este contaminante, lo cual daría como resultado el llamado hidrógeno azul” [9, Párr. 8], el cual emite menos carbono que el hidrógeno gris durante su producción.

6. Sistemas BRT

Este sistema está diseñado específicamente con infraestructura y servicios para mejorar el desplazamiento de los usuarios del transporte público. “Su principal objetivo es combinar la capacidad con la velocidad, algo parecido a un metro, pero en la superficie o algo parecido a un tren de pasajeros; pero con mayor flexibilidad, menor costo y con la simplicidad de un sistema de transporte público a base de autobuses” [5, párr. 2]. Algunas características de este sistema son las siguientes:

Puntos de paradas fijos con andenes.

Pago de la tarifa y validación del viaje fuera del autobús.

Autobuses articulados de gran capacidad.

Carriles exclusivos (o carriles segregados del tráfico mixto) para autobuses.



Figura 4. Sistema BRT

7. Aplicación de la pila de hidrógeno en el transporte

La electricidad se va generando a medida que el vehículo la requiere. Esto sucede porque, en vez de almacenar la energía en baterías acumuladoras, se implementan pilas de combustible que procesan constantemente el hidrógeno para producir la electricidad en demanda [6].

Este hidrógeno se almacena en tanques específicos, desde donde se canaliza a la pila de combustible y allí se añade el oxígeno para producir electricidad. Estos coches cuentan con un tubo de escape a través del que únicamente se libera vapor de agua. La batería reparte la energía a los motores eléctricos de los que disponga el coche y en la misma se guarda el sobrante de electricidad acumulado [7].

8. Sistema BRT a base de pilas de hidrógeno

En Francia implementaron el primer sistema de transporte masivo BRT 100% de hidrógeno del mundo, estos vehículos de 18 metros, los cuales tienen una capacidad de 145 personas, producen su electricidad a bordo utilizando una pila de combustible de hidrógeno. “La puesta en marcha de esta flota de ocho vehículos requirió la construcción de una estación de hidrógeno, inaugurada el 19 de septiembre de 2019, así como un taller de mantenimiento adaptado al uso de hidrógeno” [10, Párr. 6].

Construidos por el fabricante belga Van Hool, “estos vehículos producen su electricidad a bordo utilizando una pila de combustible de hidrógeno. Con su alcance de 240 km/día, no necesitan recargarse mientras están en servicio, ya que la carga se realiza de noche en la estación” [10, Párr. 4].

Accesibles para personas con movilidad reducida, “estos vehículos de 18 metros tienen una capacidad de 145 personas e incluyen 32 asientos cubiertos de cuero y grandes ventanales que brindan a los pasajeros mucha luz” [10, Párr. 5].



Figura 5. BRT con pila de hidrógeno en Francia [10]

Propuesta

En la búsqueda de alternativas que ayuden a mitigar el aumento de temperatura que ha registrado la ciudad de Maracaibo en los últimos años y siendo los gases de efecto invernadero una de las causas principales del calentamiento global, se presenta como una solución la implementación del sistema de transporte masivo BRT a base de pilas de hidrógeno en tres de las vías más importantes y utilizadas de la ciudad, siendo la Av. La Limpia, la Av. Bella Vista y la Circunvalación 2 junto con la prolongación de ésta.

El BRT deberá contar con 18 metros de longitud para una capacidad de 145 pasajeros, la pila de hidrógeno viene estandarizada en el modelo del vehículo, teniendo esta una vida útil de 15 años. Su duración por recorrido sin ser recargado por el combustible de hidrógeno es de aproximadamente 300km.

Las rutas por cumplir serán la Av. La Limpia, con 8km de longitud, la Av. Bella Vista, con 6km y la Circunvalación 2 con un total de 22km de longitud. Se puede escoger un tramo de la Circunvalación 2 para la optimización de la propuesta. Con un total de 40 paradas para los usuarios y con la utilización de tarjetas prepagadas por medio de un sistema automático en aplicación.

Rutas del sistema BRT a base de pilas de hidrógeno

En las siguientes figuras (figura 6 a la 10) se muestran las rutas establecidas para la implementación del sistema de transporte BRT, así como el diseño del mismo:



Figura 6. Av. La Limpia [11]



Figura 7. Av. Bella Vista [12]



Figura 8. Circunvalación 2 [13]

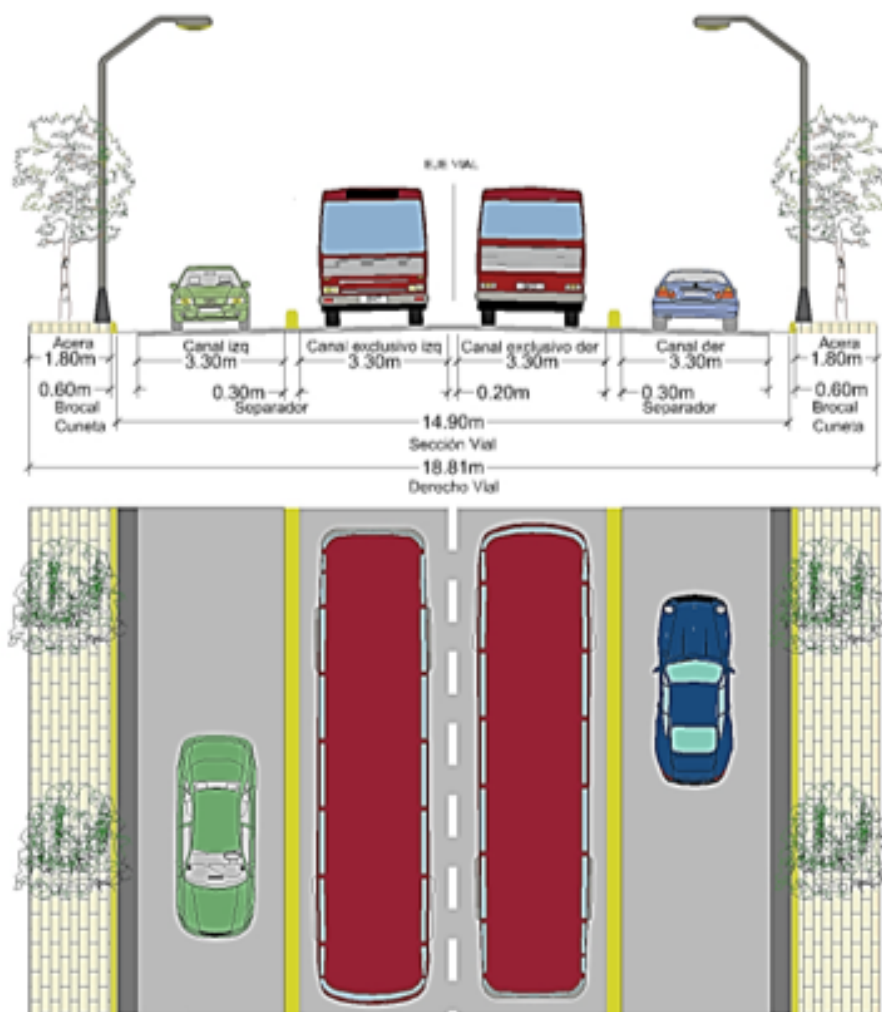


Figura 9. Propuesta Sistema BRT [5]

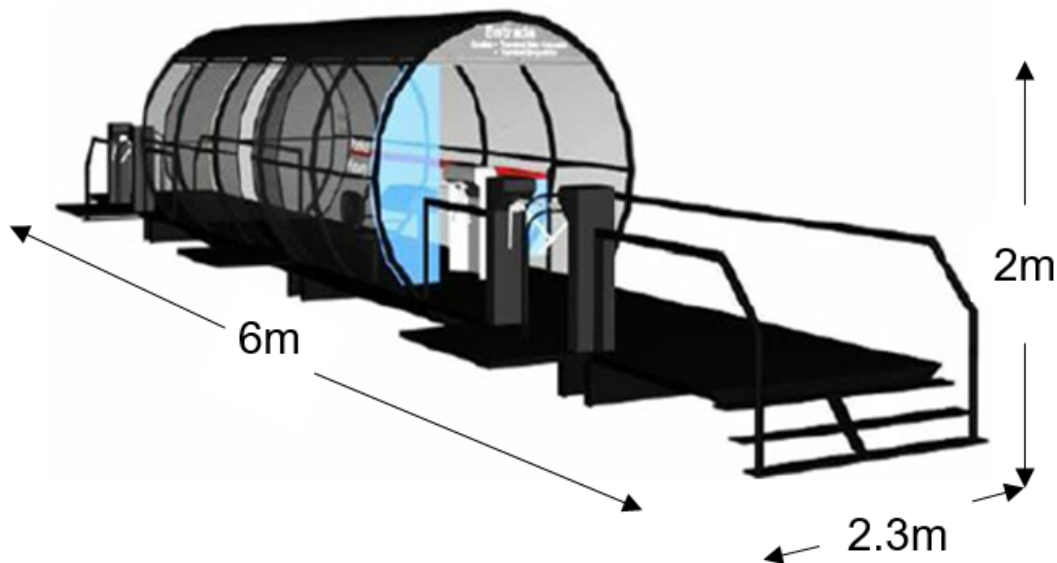


Figura 10. Diseño de parada para los usuarios [14]

Referencias bibliográficas

- [1] J. Urdaneta, B. Aponte, O. Pena y R. Silva, “Las unidades de transporte de pasajeros en el municipio Maracaibo y su incidencia en el servicio de transporte público urbano”, *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol.15, no.59, pp. 93-102, 2011.
- [2] Organización Meteorológica Mundial (OMM), “Informe sobre el cambio climático en el mundo”. *Grupo de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible*, 2024. [En Línea]. Disponible en: <https://unsdg.un.org/es/latest/stories/cambio-clim%C3%A1tico-hay-un-80-de-probabilidades-de-que-el-planeta-siga-calent%C3%A1ndose-los>
- [3] ONU. Programa para el medio ambiente, “El aumento de las temperaturas mundiales es alarmante”, *United Nations Environment Programme*, 2022. [En Línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-aumento-de-las-temperaturas-mundiales-es-alarmanete>
- [4] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, “INAMEH pronostica altas temperaturas los próximos días”, *INAMEH*, (s.f.). [En Línea]. Disponible en: <http://www.inameh.gob.ve/web/prensa/notic.php?n=2461> (1 febrero de 2024).
- [5] “¿Metrobús o BRT? Un sistema de transporte público que vino desde Brasil”, *Mapasin*, 2020. [En Línea]. Disponible en: <https://mapasin.org/blog/metrobus-o-brt-un-sistema-de-transporte-publico-que-vino-desde-brasil>
- [6] “Feliz cumple Maracaibo”, *Venezuela a escala*, 2011. [En Línea]. Disponible en: <http://vzlaaescala.blogspot.com/2011/09/feliz-cumple-maracaibo.html>
- [7] “¿Qué es la pila de hidrógeno y cómo funciona?”, *Mint*, 2024. [En Línea]. Disponible en: <https://mintforpeople.com/noticias/pila-hidrogeno/>
- [8] “Pilas de combustible de hidrógeno, limitaciones y una posible solución”, *Hive Blog*, 2021. [En Línea]. Disponible en: <https://hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/pilas-de-combustible-de-hidrogeno-limitaciones-y-una-posible-solucion>
- [9] S. Alcalde, “Ventajas e inconvenientes del hidrógeno como combustible alternativo”, *National Geographic España*, 2023. [En Línea]. Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo_14897

- [10] “Francia pone en marcha el primer BRT de hidrógeno del mundo”, *Interreg POCTEFA*, 2019. [En Línea]. Disponible en: <https://h2piyr.eu/es/francia-pone-en-marcha-el-primer-brt-100-de-hidrogeno-del-mundo/>
- [11] “Av. La Limpia de la ciudad de Maracaibo”, *Google Maps*, 2024. [En Línea]. Disponible en: https://www.google.com/maps/@10.6687328,-71.6544496,14z/data=!5m1!1e2?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDExNS4wIKXMDS0ASAFQAw%3D%3D
- [12] “Av. Bella Vista de la ciudad de Maracaibo”, *Google Maps*, 2024. [En Línea]. Disponible en: https://www.google.com/maps/@10.6607381,-71.6176488,14.75z/data=!5m1!1e2?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDExNS4wIKXMDS0ASAFQAw%3D%3D
- [13] “Av. Bella Vista de la ciudad de Maracaibo”, *Google Maps*, 2024. [En Línea]. Disponible en: https://www.google.com/maps/@10.6618036,-71.6585281,14.5z/data=!5m1!1e2?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDExNS4wIKXMDS0ASAFQAw%3D%3D
- [14] R.H.M. Godoi et al., “Risk assessment and spatial chemical variability of PM collected at selected bus stations”, *Researchgate*, 2013. [En Línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/258725463_Risk_assessment_and_spatial_chemical_variability_of_PM_collected_at_selected_bus_stations