



Prototipo de Bicicleta para Transporte Urbano Individual Sostenible *Bike Prototype for Sustainable Individual Urban Transportation*

Gabriel Jaime Correa Henao, PhD

Universidad Católica Luis Amigó
Medellín, Colombia
gabriel.correahe@amigo.edu.co

Álvaro Andrés Ramírez-Piñeros, MSc.

Medellín, Colombia
alvar_ra@yahoo.com

(Recibido el 27-01-2017. Aprobado el 02-02-2017)

Estilo de Citación de Artículo:

G. Correa-Henao, A. Ramírez-Piñeros, "Prototipo de Bicicleta para Transporte Urbano Individual Sostenible", Lámpsakos, no. 17, pp 40-51, 2017
DOI: <http://dx.doi.org/10.21501/21454086.2055>

Resumen: La movilidad en las ciudades centra la atención de las políticas promulgadas por gobiernos locales en países de todo el mundo, teniendo en cuenta el crecimiento exponencial de automóviles y motocicletas con motores de combustión interna durante el siglo XXI. En esa medida, la adaptación de las infraestructuras que permitan la circulación de dichos medios de transporte (calles, avenidas, autopistas, puentes, etc) ha sido muy limitada. Como consecuencia, algunas propuestas para aportar en la optimización del transporte de los ciudadanos al interior de las ciudades, consideran una mayor promoción de los medios de transporte público, así como el impulso en modalidades de transporte sostenibles y económicas, como las bicicletas. En este artículo se presenta un caso de estudio derivado del diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de bicicleta construida con materiales amigables con el medio ambiente, cuyo impulso responde a la combinación de potencia generada por la fuerza humana y una rueda eléctrica motorizada, adaptable a diferentes condiciones geográficas vigentes en la ciudad de Medellín, Colombia.

Palabras Clave: Bicicleta Urbana, Sostenibilidad Energética, Movilidad Ciudadana

Abstract: Nowadays inner-city transportation focuses the attention of local government policies among countries around the world, due to the exponential growth of vehicles with internal combustion engines (automobiles, motorcycles)

during the XXI century. Nevertheless, adaptation of infrastructure that allow circulation of such transportation vehicles (avenues, streets, bridges, highways, etc) has been very limited. As a result, some proposals have arisen in order to promote citizen's transportation optimization in the cities, including a better promotion of public transport, as well as encouragement of economic and sustainable ways of urban moving, for example bicycles. In this paper, authors show a case-of-study derived from a project containing both design, construction and commissioning of a bike prototype made up of environmental friendly materials, whose locomotion is based on the power combination of both human force and a motorized electric wheel, adaptable to different geographic conditions existing in the City of Medellín, Colombia.

Keywords: Urban Bikes, Energetic Sustainability, City Transportation.

1 INTRODUCCIÓN

Los ciudadanos de la ciudad de Medellín reciben con preocupación la noticia según la cual el aire que se respira en dicha localidad es uno de los más contaminados de Colombia, como consecuencia de la combinación de factores meteorológicos, dentro de la orografía montañosa, así como la emisión de gases contaminantes desde fuentes estacionales (industrias) y móviles (parque automotor) [1]. Durante el año 2016, las autoridades ambientales han emitido alarmas periódicas con el reporte de mediciones de 2.5

ppm de material contaminado en el aire de la ciudad, en donde la polución de los vehículos representa cerca del 80% de los contaminantes que se miden en la calidad de éste [2].

Estas condiciones han propiciado la acción de las autoridades para crear un plan de descontaminación aplicable a los municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, cuyas políticas contemplan la promoción de construcciones sostenibles, así como la producción y consumo responsable, lo cual involucra planes de movilidad empresarial, reacción ante episodios de contingencia ambiental, integración del transporte público, asesoría al transporte de carga, reforestación arbórea y pacto común por la calidad del aire, además de la gestión de un modelo de gobierno abierto para entregar información a la ciudadanía. Dichas políticas están consignadas en el plan Metrópoli [3], vigente a la fecha, donde se plantea la necesidad de privilegiar las inversiones en optimización y eficiencia de los sistemas de transporte público y masivo, al igual que la difusión y estímulo de medios alternativos de transporte, como los sistemas de bicicleta.

Precisamente, la coordinación en la ejecución de dichas políticas de planeación entre las diferentes entidades gubernamentales, constituye una fuente de innovación para mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad de Medellín y los demás municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, al punto que en el año 2012 se otorgó el premio mundial de ciudad más innovadora a Medellín [4]. Se destaca también la construcción de vías exclusivas para el transporte en bicicleta, así como la implementación de sistemas de bicicletas públicas para el transporte intraurbano [5], [6], actualmente vigente en los municipios de Medellín y Sabaneta.

En concordancia con la problemática descrita previamente, y conscientes de la necesidad de generar soluciones creativas, innovadoras y adecuadas para el contexto local, los autores documentan en este artículo su experiencia para el diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de bicicleta para el transporte individual urbano, que se puede adaptar al contexto local, teniendo en cuenta las condiciones de la ciudad de Medellín, relacionadas con su geografía, clima, limitaciones de infraestructura y tráfico vehicular. Para el efecto, se presenta el procedimiento de diseño y construcción de una bicicleta con materiales amigables con el medio ambiente (guadua/bambú), con componentes y accesorios

disponibles comercialmente. Adicionalmente, el prototipo de bicicleta incluye la disposición de una rueda motorizada eléctrica, cuya respuesta de torque se adapta a la frecuencia y fuerza de pedaleo del usuario, optimizando el consumo eléctrico y garantizando la mejor asistencia para cubrir distancias con trayectos inclinados, propios de la geografía de la ciudad de Medellín.

La primera parte de este artículo presenta una revisión en torno a las políticas de estímulo para el uso de los medios alternativos de transporte urbano individual (aplicable a la ciudad de Medellín y su área Metropolitana) y la importancia de asumir la construcción del prototipo de bicicleta. La segunda parte del artículo proporciona una descripción del diseño y construcción del prototipo de bicicleta, su tecnología y materiales, así como la documentación del proceso constructivo. La tercera parte del artículo presenta un análisis de datos sobre el desempeño del prototipo en diferentes condiciones de uso en la ciudad de Medellín, así como las oportunidades que puede representar como método de transporte, frente a los medios tradicionales (vehículos con motor de combustión interna). Algunas conclusiones y futuros trabajos relacionados con esta área de investigación se presentan al final del artículo.

2 LA BICICLETA COMO MEDIO DE TRANSPORTE URBANO

2.1 Diagnóstico Internacional

La movilidad en bicicleta se promueve actualmente en diferentes países occidentales, como un modelo efectivo de transporte en áreas urbanas. Desde mediados del siglo XX, la planeación urbana en la mayoría de países ha enfatizado en la transformación de las ciudades para facilitar el uso de los vehículos privados; como resultado, el uso masivo y la tasa de crecimiento del uso del automóvil ha alcanzado valores máximos en las primeras décadas del siglo XXI, cuyos valores (vehículos por 1000 habitantes) pueden observarse en la Figura 1 [7], destacándose el caso de países como Estados Unidos (797), Australia (736), Italia (679), Canadá (662), España (593), Japón (591), Francia (578), Alemania (572), Reino Unido (519), Argentina (314), Rusia (293), México (275), Brasil (249), Suráfrica (165), Colombia (148), China (128), India (18). El caso particular de los países BRICS, aunque se cuentan entre los mayores productores mundiales de automóviles, su tasa per-cápita de automóviles por habitante aún es relativamente equilibrada.

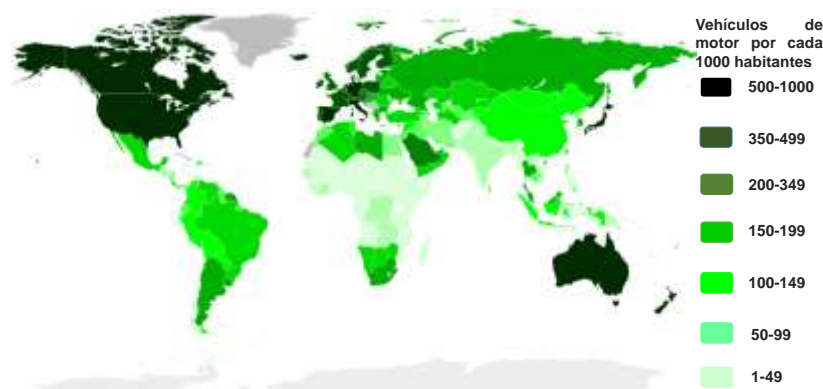


Fig 1. Número per-cápita de vehículos de motor de combustión interna por cada 1000 habitantes, sin incluir motocicletas. Fuente: [7]

Bajo este panorama, los cambios requeridos para incrementar la capacidad de vías, avenidas y autopistas utilizadas por vehículos privados es cada vez más cara y exige mayores sacrificios ambientales, económicos y sociales [8]. En áreas densamente pobladas, con distancias cortas, el automóvil constituye un modo de transporte ineficiente e insostenible. Sin embargo, en muchos casos el transporte público no puede satisfacer las necesidades de movilidad de los ciudadanos, debido a su complejidad, variedad y limitación de rutas.

Este tipo de problemáticas constituye una de las mayores preocupaciones de la ciudadanía y gobiernos en zonas urbanas. Lo anterior, ha impulsado la generación de planes de movilidad sostenible, los cuales suelen adaptarse a las condiciones particulares de cada ciudad. Estas acciones tienen un denominador común: los usuarios quienes como peatones o ciclistas acceden a estos medios, con características de transporte intermodal que tiene como eje a la bicicleta. Promover el uso de la bicicleta genera beneficios sociales al mejorar la salud pública por la actividad física; ambiental al disminuir la contaminación atmosférica y acústica y económica al favorecer costos de viaje de los usuarios y mantenimiento de infraestructura; entre otros [9].

Numerosos estudios en el ámbito de la planeación urbano-regional sugieren la implementación de políticas que permitan masificar el uso de la bicicleta como medio de transporte en las ciudades. Algunas investigaciones han generado recomendaciones para implementar modelos de préstamos de bicicletas urbanas, dentro de un esquema de movilidad intermodal a partir de la experiencia de ciudades como Amsterdam [10], [11], París [12], [13], Madrid [14] y Barcelona [15], [16]. De esta manera, es posible formular nuevos aplicativos que permiten optimizar la instalación de puntos operativos para los modelos de bicicletas públicas [17], los cuales también se replican en ciudades asiáticas [18]. Actualmente, el modelo de préstamo de bicicletas urbanas está ampliamente difundido en numerosas ciudades europeas, con

un gran éxito [19]. Algunas ciudades norteamericanas (Vancouver, Toronto, Portland, Austin, etc) también están empezando a implementar dicho modelo, con resultados aceptables [20], [21], así como en centros urbanos en China [22].

2.2 Entorno Local

En el ámbito latinoamericano, algunas ciudades también han acogido el modelo de masificación del transporte mediante el uso de la bicicleta. Específicamente el uso de bicicletas públicas se ha institucionalizado en algunas ciudades mediante programas como: Encicla en Medellín y su Área Metropolitana (Colombia), Samba en Río de Janeiro, Bike Sampa en São Paulo, Bike en Brasilia, MaisBici en Curitiba (Brasil), Ecobici en Buenos Aires (Argentina), Bike en Santiago (Chile) y Ecobici en México D.F, con resultados muy satisfactorios, dado que en cada sistema se reportan más de 5000 viajes individuales diariamente [23], [24].

La promoción de la bicicleta como medio de transporte, también se ha acompañado de la adaptación de infraestructura para uso exclusivo de la misma. Esta característica siempre ha estado presente en las ciudades europeas, cuyo ejemplo se ha reproducido en ciudades de todo el mundo [8], [10]. En el ámbito latinoamericano se destacan los casos de ciudades como Curitiba (Brasil) y Bogotá (Colombia), donde se ha brindado prioridad al transporte masivo y a los medios no motorizados [25]. Específicamente en Colombia, las políticas de planeación urbana fueron adoptadas inicialmente en la ciudad de Bogotá, donde se dio prioridad a la infraestructura vial exclusiva para bicicletas, conocida como ciclo-ruta. Dichas políticas posteriormente fueron acogidas en otras ciudades intermedias colombianas, con la finalidad de incentivar el uso de las bicicletas [6], [9].

Particular atención toma el plan de desarrollo adoptado por la ciudad de Medellín 2016-2019 [26], el cual dedica la dimensión estratégica “Movilidad sostenible: una tarea de todos”, a partir

de recomendaciones y experiencias articuladas de gobiernos previos [3], [9], así como a la participación ciudadana en torno a la solución de sus necesidades de transporte y movilidad. Dicha dimensión se concibe teniendo en cuenta las realidades de la ciudad, en cuanto a su crecimiento poblacional, su integración regional, sus limitaciones geográficas, las características de las vías, y el aumento del parque automotor (automóviles y motocicletas), que en sólo 7 años creció un 61%. Por esa razón, se ha establecido el desarrollo e integración de la infraestructura existente con los diferentes sistemas de la ciudad de manera que su funcionamiento sea sostenible, incluyente, fluido y cómodo para los ciudadanos, al tiempo que se proporciona a los ciudadanos el acceso a los sistemas de transporte que se caractericen por ser seguros, de calidad y sostenibles, dirigidos a la población de Medellín y su área metropolitana. En ese sentido, se fortalece el sistema de movilidad multimodal y del transporte público como vía de mejoramiento de las condiciones de accesibilidad de la población para el disfrute de la ciudad, así como la gestión integral para la movilidad no motorizada [26].

Para finales del año 2016, la ciudad de Medellín cuenta con 21 Km de Carriles exclusivos para bicicletas o ciclorrutas [26], las cuales están concentradas especialmente en la zona plana del valle de Aburrá, y en los barrios perimetrales al centro de Medellín (La Candelaria, Laureles, Belén, Los Colores, etc). Aunque un porcentaje significativo de la población tiene su residencia en dichas áreas, existe un amplio porcentaje de comunas ubicadas en las laderas de las montañas que rodean a la ciudad de Medellín, donde se estima que residen más de 1 millón de habitantes. Las características del terreno montañoso, la distribución urbana de los barrios y las dificultades para trazar las vías en los barrios de ladera (El Poblado, Robledo, San Javier, Manrique, Aranjuez, Castilla, Belén, Santa Cruz, Santo Domingo, Buenos Aires, La Milagrosa, entre otros), conllevan a dificultades en la consideración de la bicicleta como medio de transporte. En dichos barrios, se impone el transporte público con autobuses, colectivos, así como las motocicletas y los vehículos particulares [9]. En algunos barrios, también se puede acceder a través del Metrocable (Línea J, Línea H, Línea E y Línea K) o a través del Tranvía.

3 PROPUESTA DE PROTOTIPO DE BICICLETA PARA CONDICIONES DE MOVILIDAD EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN

Las características propias de la ciudad de Medellín, y sus condiciones geográficas particulares, dado que está enclavada en los terrenos montañosos de la cordillera de los Andes,

pueden constituir una restricción para garantizar una movilidad sostenible para todos sus habitantes. Por tal motivo, se deben considerar oportunidades de mejora que generen bienestar social, económico y ambiental al momento de proponer ideas innovadoras [27], especialmente cuando se aplican al sector de la movilidad.

3.1 La Bicicleta como Medio de Locomoción

La realización de un prototipo de bicicleta adaptable a las condiciones de la ciudad de Medellín, se fundamenta en las siguientes características:

- Se trata de un medio de transporte que no genera emisiones.
- El uso de la bicicleta reporta mejora en la salud de sus usuarios.
- Es compatible con vías, rutas y andenes actualmente disponibles en la ciudad de Medellín, a pesar de las limitaciones vigentes en infraestructura.
- Los diseños de bicicletas son aceptados internacionalmente y suelen contar el beneplácito de sus usuarios.
- Los marcos de bicicleta y sus componentes están disponibles comercialmente, en diferentes gamas de precios, adaptados a los gustos de sus usuarios.
- Las bicicletas se pueden ajustar ergonómicamente a la necesidad de cada usuario.
- Las bicicletas se pueden personalizar fácilmente, según los gustos y necesidades de sus usuarios.
- La bicicleta constituye un medio de transporte aceptado en zonas urbanas (a pesar que aún no es ampliamente incluido).
- Los deportes que involucran el uso de las bicicletas (ciclismo ruta, ciclismo de montaña, ciclismo pista, downhill, BMX, etc) tienen alto grado de popularidad y son practicados cada vez por más personas en todo el mundo.
- Según se ha enunciado en secciones previas, los gobiernos de varias ciudades del mundo consideran que el uso de la bicicleta constituye una oportunidad para facilitar la movilidad masiva, con inversiones mínimas, facilitando la calidad de vida en los centros urbanos para todos sus habitantes.
- La movilidad urbana fundamentada en bicicletas goza gran aceptación.
- La masificación de la movilidad mediante el uso de bicicletas constituye un renglón económico en crecimiento, y constituye una

oportunidad de nuevos negocios en los ámbitos locales y nacionales.

- La industria de fabricación de bicicletas y sus componentes genera mínimos impactos ecológicos en las regiones donde se asientan [28].

En regiones montañosas, el uso de la bicicleta puede verse restringido, debido a la limitación de las personas que requieran pedalear para vencer la fuerza de gravedad, al desplazarse por vías con variación en su altimetría. La bicicleta eléctrica no contamina, no emiten monóxido de carbono, tampoco óxido de nitrógeno. Este medio de transporte no usa combustibles fósiles, por lo tanto no genera emisiones, y evita la contaminación acústica, esto lo convierte en una de las mejores opciones a la hora de un desplazamiento limpio y ecológico [29]

3.2 Prototipo para Movilidad Urbana

Las oportunidades enunciadas previamente, permiten dilucidar las características de un prototipo para movilidad, que está constituido por una bicicleta con pedaleo asistido:

- Personalización: Se construirá un prototipo de bicicleta con pedaleo asistido que consta de un marco, ruedas y demás componentes, los cuales deben estar disponibles comercialmente, y adaptarse al gusto del usuario, con un diseño sobrio.
- Costos asequibles: El prototipo de bicicleta con pedaleo asistido completo y terminado debe costar menos de 2500 dólares, equivalente al costo de bicicletas en gamas medias y altas.
- Materiales: Se eligen materiales de fácil consecución, sobrios y amigables con el medio ambiente. El prototipo debe ser liviano (≤ 15 Kg) y estructuralmente resistente, de manera que soporte el uso diario y que se adapte a los espacios disponibles para tránsito y parqueo.
- Pedaleo asistido: Esta característica ha permitido popularizar el uso de las bicicletas como medio de transporte, dado que facilita el pedaleo por parte del usuario. Tradicionalmente, se han utilizado motores de combustión interna de 1HP, adaptados en las bicicletas, pero en los últimos años, también se ha extendido la combinación de motores eléctricos con baterías. Para el prototipo de movilidad, se exige una componente de pedaleo asistido silenciosa con mínimo gasto energético y de carga eléctrica rápida. En el pedaleo asistido, al momento que el usuario

activa los pedales de la bicicleta, la acción es captada por un sensor inductivo, que envía una señal al control del conjunto batería-motor. Este proceso es inmediato, de manera que el motor responde a la fuerza aplicada sobre los pedales al instante. Si no se ejerce fuerza de pedaleo con el sistema conectado el motor permanece inactivo [29].

- Adaptación al Medio Local: Dadas las características geográficas de la ciudad de Medellín, se exige que el prototipo facilite el pedaleo por parte del usuario, facilitando el ascenso por vías empinadas, propias de las montañas.

3.3 Construcción del Prototipo

El prototipo de bicicleta se construye con las siguientes características de diseño y funcionalidad

3.3.1 Fabricación del Marco

El marco de la bicicleta soporta toda la estructura de la misma. En la actualidad, los ciclistas profesionales suelen adaptar marcos construidos en fibra de carbono, cuyo peso oscila entre 1kg y 5kg, y son ideales para bicicletas de alta gama para competición. El valor de dichos marcos puede superar los 2000 dólares por unidad.

Para el prototipo propuesto, se diseña un marco de bicicleta con medidas personalizadas, para uso en rutas, siguiendo recomendaciones de tutoriales comerciales [30]

- Distancia de Entrepierna = 90cm
- Distancia de Antebrazo = 49cm
- Distancia del Tronco = 55cm
- Tipo de Rueda = 700cm * 28"
- Equivalente comercial de las medidas del marco = 19" a 20"

Para el prototipo propuesto, se prefiere la construcción del marco en material de bambú o guadua, pues constituye un elemento ligero, fuerte, fácil de trabajar manualmente y renovable. El bambú es una gramínea (pasto) que crece rápidamente con cientos de variedades y diferentes propiedades físicas. A diferencia de la madera, el bambú está compuesto por fibras muy largas y fuertes a lo largo de todo su tallo. Esta estructura es muy similar a la fibra de vidrio y fibra de carbono unidireccional. Por esta razón se dice que el bambú es un "compuesto natural" [31], [32].

El bambú es un material muy fuerte. Su fuerza con relación al peso es equivalente a la del acero. Siendo un material tubular su uso es ideal para propósitos estructurales. Los marcos para bicicletas en bambú son más flexibles que los

fabricados en acero o aluminio, absorben muy bien las irregularidades y vibraciones del terreno. Las varillas de bambú se pueden flectar sin fracturarse ni astillarse. El bambú es un material renovable, que cumple con los requerimientos para la fabricación marcos de bicicletas, con mínima huella ecológica en su utilización [32]

La Figura 2 proporciona una vista del marco tipo Gallardo BEAT elaborado totalmente a mano, en bambú seleccionado manualmente de parcelas colombianas con medidas entre 38mm y 45mm de diámetro, inserto del tubo del asiento en fibra de carbono y uñas en acero inoxidable. Los triángulos del marco se elaboran con bambú de 22mm de diámetro. Las uniones en hilo de fique natural con fibra de carbono y recubierto con poliuretano [32]. El marco pesa aproximadamente 4Kg y su costo oscila en 400 dólares, lo que lo convierte en una interesante alternativa económica frente a los marcos de fibra de carbono presentes en las bicicletas de alta gama.



Fig 2. Vista del marco de bambú tipo Gallardo BEAT, con medida comercial equivalente de 19" a 20". Fuente: Autores

3.3.2 Componentes y Ensamble de la Bicicleta

A nivel comercial están disponibles todos los elementos requeridos para realizar el ensamblaje y puesta en operación de la bicicleta, entre los que se pueden contar los componentes señalados en la Tabla 1.

Tabla 1. Listado de componentes requeridos para el ensamble del prototipo de bicicleta. Fuente: Autores

Componentes a la Vista	Componentes Ocultos	Componentes Adicionales
Llantas (par)	Neumáticos (par)	Abrazadera del poste del asiento
Rines (par)	Protector neumáticos (par)	Centro en acero
Radios y Rines	Caja de dirección (Oversized externa)	Tornillos bielas (par)
Tenedor (llantas 700x30 ó 700x28)	Cinta manubrio o grips	Guayas frenos (par)
Plato y Pacha de 9 velocidades		Terminales o topes para guayas (par)
Frenos de ruta		
Pedales		

Asiento	Fundas guayas (3 metros)	Potencia
Cadena	Uniones	Terminales o topes para fundas (x4)
Manubrio	Extensoras	Manillares de freno
Poste sillín	Manzana delantera	Luces de Seguridad
	Manzana trasera	

El conjunto de componentes y elementos tiene un valor estimado de 200 dólares, cuya adquisición se realiza a partir de la oferta comercial vigente. El ensamblaje de la bicicleta se realiza con los procedimientos estándar. En la Figura 3 se aprecia el resultado final en diseño y funcionalidad del prototipo de bicicleta, con un peso total de 9Kg.








Fig 3. Vista del prototipo de bicicleta totalmente ensamblado y comisionado. Fuente: Autores

Al momento de realizar la prueba de la bicicleta, ésta ha demostrado un desempeño excepcional en viajes individuales urbanos, gracias a su resistencia, diseño y peso ligero.

3.3.3 Pedaleo Asistido

Teniendo en cuenta las distancias, diseño de vías y geografía existente en la ciudad de Medellín, la movilidad urbana exige la apropiación de innovaciones para el prototipo de bicicleta, con el fin de facilitar una mejor adaptación al entorno y a los usuarios. Con el propósito de finalizar la construcción de la bicicleta urbana, es necesario guiar la toma de decisiones respecto a la tecnología actualmente disponible, aplicable al modelo de movilidad requerido en una ciudad como Medellín y su área metropolitana. La tabla 2 proporciona un marco comparativo de los actuales desarrollos, y que están disponibles comercialmente. Dicha tabla también contiene los conceptos consignados por comunidades de usuarios, manifestando su concepto sobre instalación y mantenimiento [33], [34]

Tabla 2. Cuadro comparativo de tecnologías disponibles para pedaleo asistido en bicicletas urbanas. Fuente: Autores con información de [33]–[38].

Característica/ Tipo de Rueda	Copenhagen	Centinel Hycore	FlyKly	Kit de conversión genérico	Bicicleta eléctrica genérica
Símbolo					
Potencia Motor	350W	360W	250W	350W	350W
Costo aproximado	1000USD	700USD	1000USD	900USD	1800USD
Cableado	Sin cables	Sin cables	Sin cables	Cableada	Cableada
Conectividad	Bluetooth	Bluetooth	Bluetooth	No disponible	No disponible
Posición y Tamaño	Trasera (26"-28")	Trasera (28")	Trasera (20"-28")	Frontal o Trasera (16"-28")	Trasera (20"-28")
Tipo Motor	Paso a paso sin escobillas	Paso a paso sin escobillas	Paso a paso sin escobillas	Paso a paso sin escobillas	Paso a paso sin escobillas
Tipo Batería	48V/6Ah/300Wh	24V/7Ah/168Wh	36V/6Ah/200Wh	36V/9Ah/300Wh	36V/13Ah/468Wh
Autonomía en terreno plano	55Km	55Km	40Km	24-32Km	44-88Km
Peso	6Kg	8Kg	3Kg	7.5Kg	26.3Kg (completa)
Velocidad máxima	32Km/h	25Km/h	25Km/h	32Km/h	32Km/h
Tiempo Carga 120V/220V ac	4 h	4 h	3 h	6 h	6 h
Batería desmontable	No	Si	No	Si	Si
Sensores de torque	Si	Si	Si	No	No
Carcasa rotativa y engranajes	No	Si	No	Disponible	No
Freno regenerativo	Si	No	Si	No	No
Compatibilidad con pacha de 9 velocidades	Si	Si	Si	Si	Si
Facilidad de instalación	Alta	Alta	Alta	Baja	Baja
Mantenibilidad	Baja	Alta	Baja	Media	Baja
Adaptación en pendientes	Alta	Baja	Baja	Media	Media
Modo de Operación	Asistencia de pedaleo	Asistencia de pedaleo y aceleración	Asistencia de pedaleo	Asistencia de pedaleo y aceleración	Asistencia de pedaleo y aceleración

De acuerdo con cuadro el comparativo de la tabla 2 se dice que las bicicletas pueden tener autonomía de entre 30 a 80 km en terreno plano, con velocidades que varían entre los 25 a 50km/h según el modelo. Las ruedas para pedaleo asistido generan suficiente potencia para impulsar a un ciclista a una velocidad máxima de 60Km/h, pero se han implementado desarrollos de seguridad en cada rueda para respetar la normativa de velocidad exigida por autoridades en Europa y en Norteamérica, por cuanto el motor se desconecta cuando llega a 32Km/h.

Obsérvese que la mayoría de soluciones tecnológicas se adaptan favorablemente en terrenos planos, pero la construcción del prototipo de bicicleta requiere mayor innovación para permitir la cobertura de distancias en trayectos con

pendientes pronunciadas. Se requiere la adaptación de características como buena potencia del motor ($\geq 350W$), alta capacidad de la batería ($\geq 6Ah$), ejes rotativos con pivote para torque, sensor de torque, facilidad de instalación y compatibilidad con pacha trasera en la bicicleta. Dichas características se incorporan al modelo de bicicleta presentado en la Figura 3, a través de la adaptación de una rueda eléctrica motorizada, de control adaptativo en función del torque requerido en el pedaleo [39]. Mediante el acoplamiento de elementos mecánicos y eléctricos se busca reducir el esfuerzo físico que ejerce el ciclista y es una opción viable para avanzar en terrenos empinados y solventar deficiencias de rendimiento físico del usuario. Dicha autonomía dependerá del tipo de bicicleta, peso de la bicicleta, peso del ciclista, tipo

de batería instalada y potencia del motor eléctrico [29].

Para el prototipo se elige el acoplamiento con una Rueda Copenhagen, correspondiente a un elemento de tracción para bicicleta que puede ser adaptada fácilmente [35]. Su éxito se basa en que todos los componentes (motor, baterías y sistema de engrane interno) se embalan en un solo armazón que se encuentra en la rueda trasera, además cuenta con sensores de localización y monitoreo de condiciones ambientales, que proporcionan datos para aplicaciones móviles relacionadas con el ciclismo. Sin cables externos o baterías a la vista, la rueda se convierte en un dispositivo que transforma fácilmente cualquier bicicleta normal en un híbrido eléctrico inteligente [35], [39]. La Figura 4 presenta el esquema de composición interna de la Rueda Copenhagen.



Fig 4. Composición de la Rueda Copenhagen. Fuente: [35], [39]

Al tratarse de un bloque ensamblado y calibrado, se hace muy difícil que el usuario pueda abrir una Rueda Copenhagen, por cuanto su mantenibilidad es baja, pero la comunidad de usuarios destaca la buena confiabilidad en el funcionamiento de la rueda. Dentro hay un motor sin engranajes de 350 W con desempeño similar al motor paso a paso, que permite impulsar hacia adelante, de manera suave y silenciosa. El armazón está instalado con una configuración de transmisión directa lo que significa que no tiene rueda libre. En la Figura 5 se observa el prototipo de bicicleta urbana con el dispositivo de pedaleo asistido correctamente instalado.



Fig 5. Vista del prototipo de bicicleta con asistencia de pedaleo instalada. Fuente: Autores.

El sistema también cuenta con un mecanismo electrónico de frenado dinámico, que recupera parte de la energía que se pierde cuando se frena y se almacena en la batería, para que después se pueda liberar. Cuando el ciclista empieza a pedalear hacia atrás, la energía cinética del frenado es capturada por la máquina eléctrica rotativa, la cual genera energía eléctrica almacenable en la batería [35]. Esta Rueda Copenhagen utiliza tecnología KERS -Kinetic Energy Recuperación System- [29].

4 PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA DEL PROTOTIPO DE BICICLETA

La evaluación del prototipo se enfoca específicamente en la realización de pruebas en condiciones dinámicas, en trayectos específicos de la ciudad de Medellín, con observación en las condiciones de planimetría comunes en la ciudad. Básicamente se consideran dos escenarios de prueba, tanto en terreno semiplano (Avenida el Poblado), como en terreno de montaña (Lomas de San Julián, El Tesoro y Los Balsos), cuyos perfiles se presentan en la Figura 6. Las características antropométricas del ciclista se resumen en una persona con estatura de 1,88m, peso de 83Kg y edad menor de 40 años, con buena salud física y mental. La relación de transmisión en la bicicleta con pedaleo asistido, se ajusta según sean las necesidades de cada recorrido.



Planimetría trayecto 1 semiplano 1480-1568msnm (Ciudad del Río - Avenida el Poblado - Envigado).



Planimetría trayecto 2 montañoso 1480-2170msnm (Ciudad del Río – Loma San Julián - Loma El Tesoro - Loma Los Balsos – Av. Palmas).

Fig 6. Perfiles topográficos de los trayectos para prueba del prototipo de bicicleta. Fuente: Autores.

En la prueba dinámica el trayecto 1 (semiplano), el punto de partida se ubica en altura planimetría de 1480msnm y finaliza en 1568msnm, con pendiente

promedio del 3% y longitud de 9.3Km, en tanto que en el trayecto 2 (montaña), el punto de partida se ubica en altura planimetría de 1480 y finaliza en

2170msnm, con pendiente promedio del 10% y longitud de 11Km.

Los trayectos de prueba se monitorean mediante la aplicación móvil “My Superpedestrian Wheel”, la cual es compatible con sistemas IOS y Android [35]. El usuario puede controlar el pedaleo asistido a través de la aplicación móvil, incluyendo el ajuste del motor, el modo de asistencia (alto, normal), el bloqueo de la rueda, así como la captura de información sobre las condiciones del trayecto y revisión de recorridos, que puede compartirse con

una comunidad de usuarios para interacciones sociales. La aplicación también estima la cantidad de calorías consumidas por el ciclista.

En la Figura 7 se proporciona información sobre el monitoreo que se realiza al pedaleo asistido en instantes específicos de los recorridos de prueba en ambos trayectos, con énfasis en el desempeño del recorrido en puntos de máxima pendiente de ambas rutas (5% y 15% respectivamente). También se puede visualizar el recorrido realizado en cada uno de los trayectos.

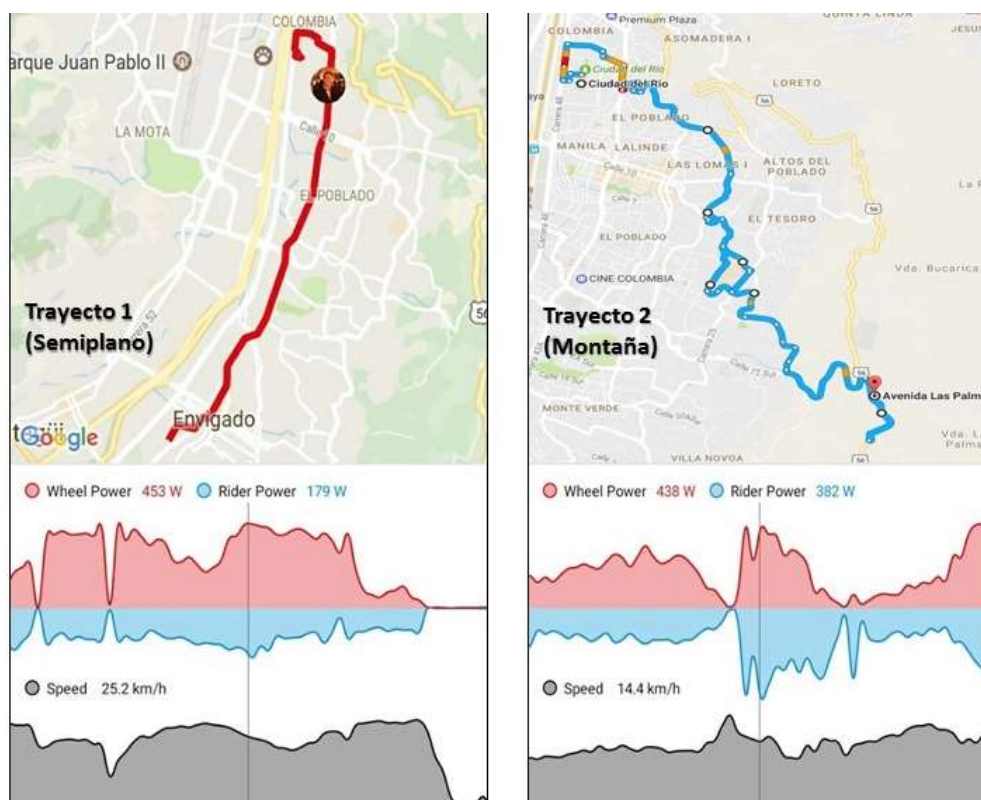


Fig 7. Monitoreo al pedaleo asistido en puntos de máxima pendiente de los trayectos de prueba (5% y 15%). Fuente: Autores con datos de aplicación “My Superpedestrian Wheel” [35]

Por su parte, la Tabla 3 proporciona un compendio de las mediciones más significativas al momento de realizar la prueba del prototipo de bicicleta con pedaleo asistido, en los trayectos previamente descritos.

Tabla 3. Resumen de las condiciones de prueba del prototipo de bicicleta con pedaleo asistido. Fuente: Autores.

Descripción	Trayecto 1	Trayecto 2
Recorrido	Ciudad del Río – Av. El Poblado - Envigado	Ciudad del Río – Loma El Tesoro - Los Balsos
Altitud	1480 a 1568msnm	1480 a 2170msnm
Pendiente Promedio	3%	10%

Duración	32min	47min
Distancia	9.3Km	11Km
Velocidad Promedio	17Km/h	14Km/h
Profundidad Descarga Batería	25%	90%
Calorías consumidas por ciclista	124cal	393cal

Aunque la potencia nominal del motor paso a paso es de 350W, el mismo puede proporcionar mayor potencia durante instantes de exigencia de mayor torque, especialmente en terrenos con mayor pendiente. Lo anterior implica un considerable consumo energético, y menor autonomía de la

batería. En caso que las pendientes sean muy extensas, se percibe pérdida de rendimiento en la asistencia de torque, por cuanto la experiencia de usuario con el prototipo de bicicleta, ha permitido deducir que pendientes sean muy pronunciadas (>15%) en trayectos largos (>500m), el ciclista deberá tomar pausas breves para permitir la estabilización en las capacidades de asistencia de la rueda motorizada. Lo anterior, dado que los sensores en el interior de la rueda Copenhage permiten detectar y regular la temperatura, limitando el rendimiento en caso de sobrecalentamiento.

La exigencia al límite del prototipo de bicicleta con pedaleo asistido, ha sido registrada según los valores presentados en la Tabla 4. Obsérvese el notable esfuerzo del pedaleo asistido (motor+usuario) en condiciones de pendiente extrema. Particularmente, el punto de máxima pendiente del trayecto 2 se ha recorrido con la realización de breves pausas, para permitir la recuperación de eficiencia del motor, y de las condiciones físicas del ciclista, pues se ha requerido 3 veces más torque que en el trayecto semiplano (54N*m vs. 17N*m).

Tabla 4. Datos puntuales de desempeño del prototipo de pedaleo asistido en condiciones de máxima pendiente. Fuente: Autores con datos de aplicación "My Superpedestrian Wheel" [35]

Descripción	Trayecto 1	Trayecto 2
Ubicación	Av. Poblado con Calle 15	Av. Palmas con Loma Los Balsos
Pendiente Máxima	5%	15%
Longitud Trayecto	150m	850m
Potencia Motor	453W	438W
Potencia Usuario	179W	382W
Torque Usuario	17N*m	54N*m
Consumo Energético	59Wh/Km	62Wh/Km

Vale la pena destacar que en el recorrido de regreso en el trayecto 2, en condiciones de bajada, se realizó frenado dinámico en la Rueda Copenhage, lo cual permitió transformar la energía cinética de la velocidad de descenso, para transformarla en energía eléctrica almacenada en la batería. En dicho recorrido, se logró una recarga en la capacidad de la batería equivalente al 10%.

El prototipo de bicicleta que incluye la rueda Copenhage permite marcar el inicio de un nuevo tipo de transporte que es asumible, eficiente, inteligente y adaptable para una ciudad enclavada

en las montañas, como es el caso de Medellín y municipios aledaños.

5 CONCLUSIONES

En esta contribución técnica se han recopilado algunas experiencias públicas relacionadas con la utilización de medios de transporte individual (e.g. bicicleta), lo cual ha inspirado la construcción de un prototipo de bicicleta con materiales ecológicamente sostenibles (e.g. bambú), integrada con tecnologías de locomoción mediante pedaleo asistido. De esta manera, la construcción del prototipo de bicicleta urbana permite adaptarse a las condiciones geográficas de ciudades de montaña, como ocurre en algunos centros urbanos de un país como Colombia. Se evidencia que bicicleta presentada en esta contribución técnica proporciona una alternativa útil e innovadora para el transporte individual en una ciudad como Medellín, la cual se encuentra en proceso de adaptación de su infraestructura y medios de movilidad

Al incorporar una tecnología de pedaleo asistido, con respuesta de torque adaptable a la fuerza de pedaleo del usuario, se optimiza el consumo energético y con cobertura de distancias con trayectos inclinados, propios de la geografía de una ciudad como Medellín. En ese sentido, se ha documentado la construcción de un prototipo de una bicicleta de costos inferiores a los 1800 dólares, que integra características de diseño esbelto, con materiales resistentes a las condiciones ambientales y a los esfuerzos mecánicos, con un peso liviano del conjunto equivalente a 15Kg, y una tecnología de asistencia de pedaleo potente con autonomía suficiente para asumir recorridos en terrenos inclinados con pendientes aproximadas al 10%, los cuales son comunes en la ciudad de Medellín y en municipios aledaños.

La elección de la tecnología para pedaleo asistido ha tenido en cuenta variables de decisión como el precio, adaptabilidad al marco, potencia, características eléctricas y mecánicas, monitoreo y control electrónico, así como su compatibilidad con las condiciones de operación en zonas urbanas, en rangos de distancias para usuarios promedio (10 - 30Km).

El prototipo de movilidad individual presentado en esta contribución técnica, puede ser tenido en cuenta en la promoción de políticas de los gobiernos locales, quienes han priorizado la mejora en condiciones de infraestructura en zonas comerciales y residenciales en ciudades colombianas, al tiempo que promocionan la utilización de medios de transporte diferentes a los vehículos individuales de combustión interna.

Se propone complementar las políticas de movilidad, mediante estímulos al uso del transporte público, favoreciendo su integración con bicicletas (incluyendo la del modelo del prototipo), mediante la expansión en la infraestructura para circulación en calles y avenidas, así como la adaptación de zonas de parqueo y la acomodación de estaciones de recarga eléctrica, al tiempo que se garantice la seguridad, vigilancia y tranquilidad de todos los usuarios de bicicletas.

6 REFERENCIAS

- [1] El_Tiempo, “Aire nocivo ahogaría a la capital antioqueña entre sus montañas”, *Periódico El Tiempo*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/aire-nocivo-ahogaria-a-la-capital-antioquena-entre-sus-montanas/16728485>. [Consultado: 12-dic-2016].
- [2] El_Colombiano, “Tres estaciones registraron calidad del aire dañina para niños y adultos mayores”, *Diario El Colombiano*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.elcolombiano.com/antioquia/calidad-del-aire-en-medellin-por-contaminacion-YI3921144>. [Consultado: 12-dic-2016].
- [3] AMVA, “Plan Metrópoli 2008-2020”, *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*, 2008. [En línea]. Disponible en: http://www.metropol.gov.co/Planeacion/DocumentosAreaPlanificada/Plan_Metropoli_2008_2020.pdf. [Consultado: 12-dic-2016].
- [4] Urna_Cristal, “¿Por qué Medellín es la ciudad más innovadora del mundo?”, *Urna de Cristal: Gobierno Visible*, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.urnadecristal.gov.co/gestion-gobierno/por-qu-medell-n-es-ciudad-m-s-innovadora-mundo>. [Consultado: 01-dic-2016].
- [5] D. Molano, “¿Por qué no un servicio de bicis públicas?”, *Revista Semana*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.semana.com/opinion/articulo/diego-molano-bogota-ciudadanos-usan-bicicleta-como-transporte-publico/480627>. [Consultado: 12-dic-2016].
- [6] AMVA, “Encicla: Sistema de Bicicletas Públicas del Valle de Aburrá”, *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.encicla.gov.co/plan-maestro-metropolitano-la-bicicleta-del-valle-aburra/>. [Consultado: 12-dic-2016].
- [7] F. Wikimedia, “List of countries by vehicles per capita”, *Wikipedia*, 2014. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_vehicles_per_capita. [Consultado: 02-dic-2016].
- [8] H. Gonzalo-Orden, A. Linares, L. Velasco, J. M. Díez, y M. Rojo, “Bikeways and Cycling Urban Mobility”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 160, pp. 567–576, 2014.
- [9] STTM, “Plan Estratégico de la Bicicleta de Medellín”, en *Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín*, 2011, p. 69p.
- [10] L. Bertolini y F. Le Clercq, “Urban development without more mobility by car? Lessons from Amsterdam, a multimodal urban region”, *Environment and Planning A*, vol. 35, núm. 4, pp. 575–589, 2003.
- [11] J. Pucher y J. L. Renne, “Rural mobility and mode choice: Evidence from the 2001 National Household Travel Survey”, *Transportation*, vol. 32, núm. 2, pp. 165–186, 2005.
- [12] P. Midgley, “Bicycle-sharing schemes: enhancing sustainable mobility in urban areas”, en *United Nations, Department of Economic and Social Affairs*, 2011, pp. 1–12.
- [13] P. Midgley, “The role of smart bike-sharing systems in urban mobility”, *Journeys*, vol. 2, pp. 23–31, 2009.
- [14] J. C. García-Palomares, J. Gutiérrez, y M. Latorre, “Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: a GIS approach”, *Applied Geography*, vol. 35, núm. 1, pp. 235–246, 2012.
- [15] A. Kaltenbrunner, R. Meza, J. Grivolla, J. Codina, y R. Banchs, “Urban cycles and mobility patterns: Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system”, *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 6, núm. 4, pp. 455–466, ago. 2010.
- [16] D. Rojas-Rueda, A. de Nazelle, O. Teixidó, y M. J. Nieuwenhuijsen, “Replacing car trips by increasing bike and public transport in the greater Barcelona metropolitan area: A health impact assessment study”, *Environment International*, vol. 49, pp. 100–109, nov. 2012.
- [17] J.-R. Lin y T.-H. Yang, “Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 47, núm. 2, pp. 284–294, mar. 2011.
- [18] Z. Liu, X. Jia, y W. Cheng, “Solving the Last Mile Problem: Ensure the Success of Public Bicycle System in Beijing”, *Procedia* -

- Social and Behavioral Sciences*, vol. 43, pp. 73–78, 2012.
- [19] Comisión_Europea, “EU Policy on the Urban Environment”, *DFata & Publications*, 2016. [En línea]. Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/urban/index_en.htm. [Consultado: 11-nov-2016].
- [20] J. Larsen, “Bike-sharing programs hit the streets in over 500 cities worldwide”, *Earth Policy Institute*, vol. 25, p. 1, 2013.
- [21] E. Fishman, S. Washington, y N. Haworth, “Bike share’s impact on car use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 31, pp. 13–20, ago. 2014.
- [22] J. Zhao, W. Deng, y Y. Song, “Ridership and effectiveness of bikesharing: The effects of urban features and system characteristics on daily use and turnover rate of public bikes in China”, *Transport Policy*, vol. 35, pp. 253–264, sep. 2014.
- [23] D. Hidalgo y C. Huizenga, “Implementation of sustainable urban transport in Latin America”, *Research in Transportation Economics*, vol. 40, núm. 1, pp. 66–77, abr. 2013.
- [24] SIEMENS, “Ciudades Verdes Latinoamericanas”, Múnich (Alemania), 2010.
- [25] R. Montezuma, “The transformation of Bogota, Colombia, 1995--2000: Investing in citizenship and urban mobility”, *Global Urban Development*, vol. 1, núm. 1, pp. 1–10, 2005.
- [26] Alcaldía_Medellín, “Plan de Desarrollo Medellín Cuenta con Vos 2016-2019”, en *Acuerdo Municipal 003 de 2016*, 2016, p. 635p.
- [27] Ruta_N, “Ruta N: Innovación en Medellín”, *Ruta N: Centro de Innovación y Negocios*, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://rutanmedellin.org/es>.
- [28] C. Álvarez, “Lo que contamina una Bicicleta”, *Blogs El País Semanal*, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2012/03/lo-que-contamina-una-bicicleta.html>. [Consultado: 02-feb-2017].
- [29] J. G. Chunchi-Uguña y M. C. Espinoza-González, “Diseño y construcción del sistema de regeneración de energía y acumulación por supercondensadores para una bicicleta”, Universidad del Azuay, 2015.
- [30] Competitive_Cyclist, “Competitive Cyclist Fit Calculator”, *Fit Calculator Tutorial*, 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.competitivecyclist.com/Store/catalog/fitCalculatorBike.jsp?CMP_ID=PD_GOc014TM&CSPID=0915&utm_source=Google&utm_medium=PSTM&gclid=CI7On7HL7swCFQUlaQod6dcOiA&gclid=aw.ds#measures. [Consultado: 11-nov-2016].
- [31] C. A. Grajales-López, “Administración Científica de Aprovechamientos Forestales de Guadua”, *Lámpsakos*, vol. 0, núm. 12, pp. 62–70, 2014.
- [32] J. Suárez-Gallardo, “Marcos de Bicicleta en Bambú”, *Gallardo Bikes*, 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.gallardobikes.co>.
- [33] P. Cohan, “MIT-Designed Smart Wheel to Boost Bike Commuting”, *FORBES Contributions*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.forbes.com/sites/petercohan/2013/12/03/mit-designed-smart-wheel-to-boost-bike-commuting/#831f6b758902>. [Consultado: 02-feb-2017].
- [34] D. Perry, “Reinventing the Wheel”, *SolidSmack*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.solidsmack.com/design/reinventing-wheel-smart-wheel-vs-copenhagen-wheel-part-13/>. [Consultado: 02-feb-2017].
- [35] Copenhage_Wheel, “Copenhage Wheel”, *Superpedestrian*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://superpedestrian.com/the-copenhagen-wheel>. [Consultado: 12-dic-2016].
- [36] Electromaps, “Catálogo de Bicicletas Eléctricas Urbanas”, *Electromaps*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.electromaps.com/bicicletas-electricas>. [Consultado: 01-dic-2016].
- [37] Hycore, “Centinel Wheel Hycore”, *Hycore’s Centinel Wheel*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://hycore.com/product>. [Consultado: 02-feb-2017].
- [38] FlyKly, “FlyKly Smartwheel”, *Flykly Smart Move*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.flykly.com/en/smart-wheel.html>.
- [39] C. Outram, C. Ratti, y A. Biderman, “The Copenhagen Wheel: An innovative electric bicycle system that harnesses the power of real-time information and crowd sourcing”, en *EVER Monaco International Exhibition & Conference on Ecologic Vehicles & Renewable Energies*, 2010, p. 12.