

INVESTIGACIÓN, DISEÑO Y PROTOTIPO DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN BATERÍAS

Juan F. Hoyos[†], Andrés F. Montoya, Andrés E. Diez, José A. Bohórquez

Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.

Recibido 16 Noviembre 2013; aceptado 30 Marzo 2014
Disponible en línea: 30 Julio 2014

Resumen: En el contexto mundial se vive un auge en la investigación de la movilidad eléctrica. Cada día toma más importancia el desarrollo de estas tecnologías debido a la necesidad de un sistema que emplee energías sustentables sin prescindir de las libertades a las que nos han acostumbrados los sistemas de movilidad actual. En este artículo se describe de manera conceptual el proceso de investigación, diseño y ensamble del prototipo de una bicicleta eléctrica, las soluciones encontradas a los problemas asociados durante las diferentes etapas del prototipo y por último se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas al prototipo. *Creative Commons Licenses NC © UPB 2014*

Palabras clave: Transporte, Baterías, Bicicleta, Motor "Brushless", Autonomía, Eficiencia.

RESEARCH, DESIGN AND PROTOTYPE OF AN ELECTRIC BYCICLE AND EMERGING TECHNOLOGIES IN BATTERIES

Abstract: In the global context, there is a boom in research on electric mobility. Development of these technologies becomes more important due to the need for a system that uses sustainable energy without sacrificing the freedom that we are used by current mobility systems. This paper conceptually describes the process of research, design and assembly of the prototype of an electric bicycle, the solutions to the problems associated during different stages of the prototype and finally the analysis of the results obtained during prototype testing.

Keywords: Transportation, Batteries, Bike, Brushless Motor, Range, Efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la disponibilidad de información sobre el diseño y los por menores de los sistemas de propulsión eléctrica es muy limitada, debido a que su desarrollo se realiza a través de métodos de innovación cerrada y es difícil generar un proceso de vigilancia tecnológica al margen de los avances; las compañías involucradas protegen arduamente sus investigaciones.

En el contexto mundial se vive un auge en la investigación de la movilidad eléctrica, aunque es bien conocido que los conceptos fundamentales de la movilidad eléctrica son tecnologías ya probadas y en cierto sentido maduras. El tema de las baterías y los sistemas KERS son actualmente materia de investigación y constante desarrollo, ya que estos conocimientos brindan ventajas competitivas en el mercado e incluso pueden dar

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+57 4) 2657608, fax 4118779.

E-mail: jfelipehoyos@gmail.com (Juan F. Hoyos).

lugar a una futura posición dominante, en un panorama que a mediano plazo vislumbra la movilidad eléctrica como la opción más adecuada para un desarrollo sostenible.

El desarrollo de este proyecto con fines académicos da como resultado un "know-how" adquirido de manera ardua luego de ir paso a paso planteando, analizando y solucionando cada una de las dificultades presentadas durante el normal desarrollo de este proyecto.

En la sección 7. Se presentan los resultados de las diferentes pruebas realizadas con el objetivo de establecer la competitividad de este medio de transporte frente a los transportes convencionales.

Las diferentes pruebas permitieron implementar procesos de realimentación, con el fin de afinar el diseño y corregir errores.

2. PRINCIPIOS MECÁNICOS

Los sistemas de locomoción obedecen a los principios de la mecánica clásica, siendo fundamental la segunda ley de Newton en cuestiones como la aceleración y el desplazamiento del vehículo. Se realizó un cálculo sobre un diagrama de cuerpo libre para seleccionar un motor acorde con las necesidades (Ver Fig. 1). Según las gráficas del fabricante el motor "Brushless" de 500 W posee un torque máximo de 13,38 N/m, sin embargo para el caso de escalar una pendiente, la velocidad es típicamente de entre 15 y 20 km/h y el torque de salida del motor para este punto de operación es de entre 3 y 4,5 N/m, destacándose que en este punto de operación se presenta la mayor eficiencia energética; alrededor del 82 % ([Golden Motor Technology Co. Ltd., 2012](#)).

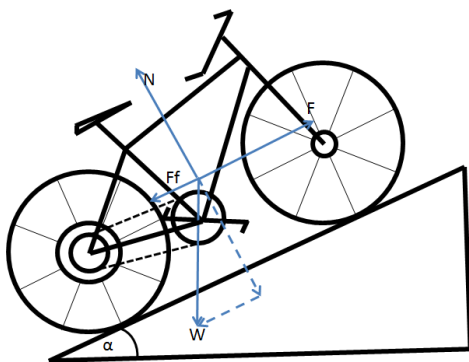


Fig. 1. Diagrama de cuerpo libre para bicicleta

Para los datos anteriores, promediando un peso combinado de vehículo y pasajero de 90 kg, un radio de rueda equivalente a 38 cm y una fuerza de fricción aproximada al 10% de la fuerza de impulso producida por el motor, la bicicleta puede afrontar pendientes hasta 7,5% sin la necesidad de asistirle con el pedaleo.

Este valor de pendiente se escogió debido a que la mayoría de los puentes urbanos presentan una pendiente de entre el 6 y el 9%, siendo 7,5% un valor razonable. Además siempre se debe considerar que a diferencia de un automóvil eléctrico o una motocicleta eléctrica; la bicicleta eléctrica es un conjunto hombre-máquina y en el caso de pendientes muy pronunciadas será la potencia humana la encargada de suministrar la diferencia de torque necesaria para conservar la movilidad en el ascenso.

3. MOTOR Y AGREGADOS

El motor empleado es del tipo "Brushless" trifásico sincrónico, con rotor de imanes permanentes, núcleo en hierro al silicio y carcasa de aluminio. El empleo de este tipo de motores es típico para las aplicaciones de movilidad eléctrica, pues presentan una buena curva de torque y potencia con un peso reducido; pero su principal ventaja es que no presentan componentes en fricción, por lo cual son muy confiables y prácticamente no necesitan mantenimiento. Como paréntesis se agrega que sólo para el caso de los vehículos eléctricos con motores de tamaños considerables sería necesario el cambio del refrigerante cada 5 años y el de aceite de motor cada 100.000 km, la alta duración del aceite se da debido a que en el motor eléctrico, el aceite no pierde viscosidad por el efecto del cizallamiento ni tampoco se contamina con residuos de combustión, el factor limitante es el envejecimiento por cambios térmicos y la oxidación.

Debido a que la fuente de alimentación es de corriente continua, se requiere el uso de un control electrónico de velocidad (ESC por sus siglas en inglés) para el funcionamiento del motor. Ver Fig. 2. El ESC se encarga de detectar la posición relativa del rotor con respecto al estator mediante sensores de efecto hall y emula ondas similares a senoidales mediante pulsos en su descomposición de la serie de Fourier, estas emulaciones senoidales varían en sincronismo

con el rotor para prevenir saltos de sincronismo en el motor sincrónico.

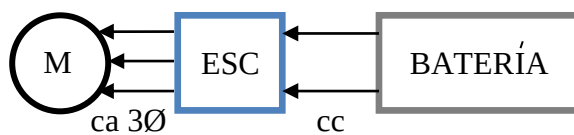


Fig. 2. Diagrama de bloques básico para el sistema de motorización.

El ESC fue seleccionado según las recomendaciones del fabricante del motor, sin embargo durante las pruebas se pudo apreciar las debilidades del ESC, el cual en ocasiones presenta pequeños saltos de sincronismo. Actualmente es caso de análisis el remplazarlo por uno de mejores características o verificar si el

problema se presenta en la precisión de los sensores de efecto hall en el interior del motor, al no censar con exactitud la posición del rotor bajo condiciones de esfuerzo específico, confundiendo de esta forma al ESC.

4. BATERÍAS

4.1. Selección de la Batería

Las baterías hacen parte fundamental de un sistema de movilidad eléctrica independiente. Siendo el factor limitante la capacidad de energía acumulada por unidad de masa y de volumen, traduciéndose esto en una limitación a la autonomía propia del vehículo ([Tabla 1](#)).

Tabla 1. Características de las baterías recargables. Tomada con autorización de [Buchmann, 2013](#)

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
Internal resistance ¹ (mΩ)	<100 12V pack	100–200 6V pack	200–300 6V pack	150–300 7.2V	25–75 ² per cell	25–50 ² per cell
Cycle life ⁴ (80% DoD)	200–300	1000 ³	300–500 ³	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Fast-charge time	8–16h	1h typical	2–4h	2–4h	1h or less	1h or less
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. Cannot tolerate trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% ⁵	30% ⁵	<10% ⁶		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V ⁷	1.2V ⁷	3.6V ⁸	3.8V ⁸	3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75	1.00		2.50 – 3.00		2.80
Peak load current Best result	5C ⁹ 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	>3C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C ¹⁰ (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to °F)	–20 to 65°C (–4 to 49°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months ¹¹ (topping chg.)	30–60 days (discharge)	60–90 days (discharge)	Not required		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection common		Protection circuit mandatory ¹²		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		

Se analizaron una a una las diferentes tecnologías en baterías y se llegó a la conclusión que la mejor opción era equipar el sistema con baterías de litio debido a la superior capacidad en densidad específica de energía vs. masa y volumen. Ver [Tabla 1](#).

Dentro de las tecnologías de Litio se escogió la tecnología Litio-Fosfato que a pesar de poseer densidades energéticas inferiores a las tecnologías Litio-Cobalto y Litio-Magnesio e incluso un precio más elevado, evidencian una superioridad absoluta en el tema de la seguridad, lo cual es un aspecto fundamental para el diseño de cualquier medio de transporte (Ver [Tabla 1](#)), ([A123 Systems Inc., 2011](#)), ([Sandia National Laboratories, 2006](#)). Adicionalmente la tecnología Litio-Fosfato presenta una vida útil hasta 10 veces superior respecto a la tecnología Plomo ácido ([Buchmann, 2013](#)), logrando incluso una expectativa de vida muy superior a la de los demás elementos que conforman la bicicleta.

4.2. Construcción del Banco de Baterías

Luego de seleccionada la tecnología y saber que se encontraba disponible comercialmente, se importaron 13 celdas de tecnología LIFEP04 por sus siglas en inglés de Litio Hierro Fosfato Polímero, de la marca A123, con una capacidad nominal de 20 Ah, tensión nominal de 3,3 V por celda y una densidad energética de 131 Wh/kg ([A123 Systems Inc, 2011](#)). Con el fin de tener un banco de 20 Ah @ 38 V se conformó una serie de 12 celdas, las cuales inicialmente para la unión eléctrica se utilizó soldadura de estaño y un fundente especial, pues las celdas presentan un terminal en aluminio y otro en cobre por motivo de las propiedades electro-químicas de estos metales al interior de la celda. El estaño, al no presentar par galvánico con estos metales por lo cual fue una alternativa viable inicialmente; sin embargo, luego de los ciclos de descarga rápida se generaron puntos calientes en las uniones eléctricas, debido a lo cual se optó por el empleo de uniones pernadas en acero inoxidable con material bimetalico entre los bornes.

Los demás agregados fueron manufacturados con papel aislante e ignífugo para prevenir cortocircuitos. Dentro del diseño se concibió un cerramiento en fibra de vidrio de 7 mm de espesor con el objetivo de proporcionar a las baterías una protección mecánica y un confinamiento en el caso de un accidente; es

importante enfatizar que durante la manipulación de baterías siempre se debe tener en cuenta que se trata con energía acumulada, lo cual es potencialmente peligroso.

La tecnología Litio Hierro Nano Fosfato patentada por la marca A123 System cumple el estándar EUCAR 3 ([A123 Systems Inc., 2011](#)) para pruebas de penetración, sobre-carga, sobre-descarga, cortocircuito externo y aplastamiento, esto quiere decir que la batería puede presentar goteo o filtraciones de electrolito, pero no entrara en ignición ni tampoco explotará, únicamente luego de superar el límite térmico la batería entra en carrera térmica y presentaría emisiones de humo, mas no presenta flameo, ni mucho menos explosión, por lo cual cumple con el estándar EUCAR 4 ([A123 Systems Inc., 2011](#)) para la prueba de estabilidad térmica. Esto nos confirma la principal ventaja de este tipo de baterías en el enfoque a la seguridad.

4.3. BMS (Battery Management System)

El BMS por sus siglas en inglés de sistema de administración de batería es un dispositivo que se agregó al banco de baterías y brinda beneficios adicionales ([Bergveld, et al., 2002](#)).

Durante la carga del banco de baterías, se inyecta una corriente en serie a través de todas las celdas, las cuales van incrementando su tensión en terminales. Debido a que todas las celdas son del mismo fabricante y del mismo tipo, generalmente el aumento de la tensión es gradual y uniforme en todas las celdas, sin embargo un posible desbalance o una celda débil debido a su fabricación, provoca que una o más celdas lleguen a un valor de tensión límite, al estar la celda en un valor máximo de carga, no le es posible almacenar más energía, por consiguiente la celda reacciona aumentando drásticamente la tensión en terminales y llegando rápidamente a un nivel crítico en el cual se pone en riesgo su vida útil. Para evitar esto, el BMS desconecta el banco de baterías antes de que una o más celdas alcancen un valor crítico, preservando así la integridad del banco de baterías (Ver [Fig. 3](#)). Adicionalmente éste entra un modo de funcionamiento en el cual intenta balancear todas las celdas del banco de baterías, buscando que todas las celdas logren un estado de carga similar y proveer al banco de un rendimiento más uniforme.

De igual forma sucede durante la descarga del banco, en el cual una celda desbalanceada o débil se descarga primero que las demás, llegando a un voltaje demasiado bajo. El BMS también supervisa este caso y desconecta todo el banco antes de que la celda llegue a valores críticos de descarga y coloque en riesgo su vida útil. Adicionalmente el BMS protege contra sobrecarga y cortocircuitos, siendo en sí un sistema de control y protección avanzado, confiable e imprescindible para bancos de baterías en serie que presenten frecuentes ciclos de carga y descarga ([Xianxia, et al., 2011](#)

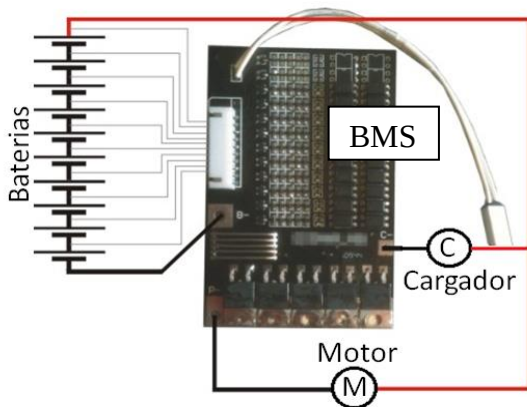


Fig. 3. Conexión del BMS

4.1. Cargador de Baterías

Debido a la tecnología empleada en las baterías se pudo diseñar un cargador de carga rápida, capaz de recargar el banco desde el mínimo estado de carga hasta el máximo de su capacidad en poco más de una hora, esto brinda una ventaja competitiva frente a las demás tecnologías en baterías que ven castigada su vida útil al ser sometidas a índices tan altos de carga, el fabricante de las baterías presenta una vida útil esperada de 3000 ciclos, aún con este índice de carga tan alto ([A123 Systems Inc., 2011](#)).

Sin embargo el inyectar semejante cantidad de corriente a las baterías, trajo dificultades que debieron ser solucionadas, todas debido al calentamiento generado en el cargador, sus accesorios, conectores y en el BMS. Después de diferentes pruebas se llegó a la conclusión de que la mejor solución era la implementación de ventilación forzada tanto en el cargador como en el BMS y emplear conectores con capacidad del

doble de la corriente nominal. Este diseño térmico es muy importante pues las baterías no deben tener cerca fuentes de calor, ya que aumentos en la temperatura acortan la vida útil de las mismas.

4.2. Pruebas a las Baterías

Luego de construido el banco se realizaron diferentes pruebas de carga y descarga a diferentes temperaturas y diferentes intensidades de corriente; se obtuvieron importantes datos que permitieron caracterizar el funcionamiento de la batería.

En las curvas de carga y descarga de la batería, es particular el hecho de que la curva de carga siempre está un poco por encima frente a la curva de descarga, esto debido a que durante la carga y la descarga se disipa un poco de energía en forma de calor en el interior de las baterías (Ver [Fig. 4](#)). Luego de integrar la energía eléctrica necesaria para la carga y la energía eléctrica en la descarga, se obtuvo una eficiencia energética del 98,43%; este valor tan alto se debe a que la resistencia interna de la batería es muy pequeña, lo que crea altos niveles de corto-circuito, bajas pérdidas debidas a potencia térmica en el interior de las baterías y presentar caídas de tensión muy pequeñas en bornes, aún frente a descargas de alta demanda de corriente. Es de destacar que incluso a niveles de carga de 1C (carga completa de la batería en 1 hora) en el cual el efecto Joule debe causar un pequeño aumento de la resistencia interna, el cual no fue apreciable, incluso contando con equipos de medición con una buena precisión. Esta baja resistencia interna es una ventaja adicional de esta tecnología en baterías.

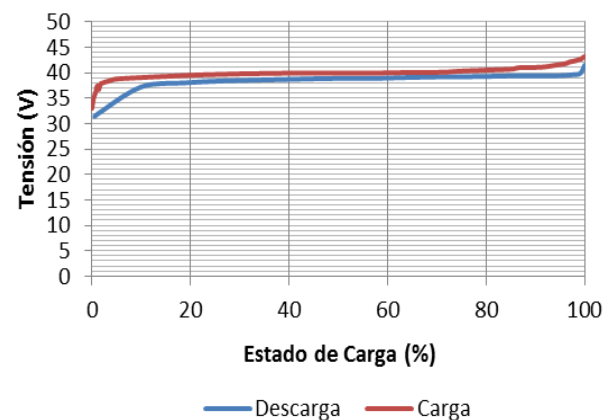


Fig. 4. Estado de carga vs Tensión, en estados de carga y descarga

5. CONSIDERACIONES MECÁNICAS

5.1. Cuadro de la Bicicleta

El cuadro de la bicicleta se diseñó conforme a los requerimientos de espacio que impusieron las baterías y el motor principalmente. Desde un inicio se debatió la idea de donde alojar las baterías, luego de analizar diferentes ideas se decidió que en el centro del marco de la bicicleta era el lugar idóneo, pues además de mejorar la ubicación del centro de gravedad en la bicicleta y por ende su maniobrabilidad, también es el lugar donde pueden estar mejor protegidas pueden estar en el caso de una colisión.

Después de prediseñado el alojamiento de las baterías, se continuó con el diseño de la tijera trasera del marco, lugar donde estaría alojado el Motor, pues la tijera debía tener unas dimensiones un poco superiores a las comunes. El Motor hace parte integral de la rueda trasera y comparten el eje de rotación, por lo que el empuje del motor se aplica directamente a la rueda sin pasar por reductores mecánicos, cadenas o transmisiones; este sistema de tracción presenta una ventaja para la eficiencia, pero crea esfuerzos adicionales en el punto específico de sujeción del eje trasero, por lo cual se debió adicionar una pieza de refuerzo en acero que llamamos la “palanca de torque” y tiene la función de transmitir el torque del motor sobre una área distribuida de la tijera trasera y no solo sobre el eje; esta simple solución previene la fatiga del material y brinda una seguridad estructural al cuadro de la bicicleta.

Luego de definidos los requerimientos, se diseñó el marco de una forma que también fuese estéticamente agradable, se decidió dar a la bicicleta, un estilo clásico-retro con colores blancos y negros.

El diseño fue realizado mediante la ayuda del software de dibujo AutoCAD. El diseño inicial puede ser visto en la [Fig. 5](#).

5.2. Implementación final y consideraciones de montaje

Luego de la especificación y selección de los componentes más relevantes para el desarrollo de la bicicleta eléctrica, se inició el proceso de montaje, en el cual se incorporan componentes de

uso común, necesarios para conservar el principio básico de este medio de transporte. Partiendo de esta primicia se incorpora un sistema de cambios mecánicos convencional de relación de piñones, con el propósito de dar inclusión a la tracción humana, son agregados también ruedas, asiento, manubrio, frenos, etc.

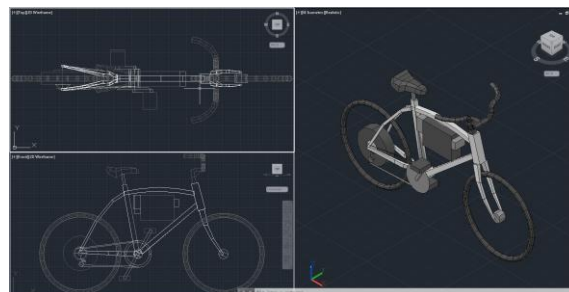


Fig. 5. Diseño por computadora del marco de la Bicicleta y ubicación de los elementos más importantes

Los momentos de mayor interés y cuidado durante el montaje se centraron en:

- La fijación del compartimiento de las baterías, en el cual el punto de consideración importante, fuere lograr una sujeción fuerte y al mismo tiempo amortiguada que permitiera disipar las vibraciones y no transferirlas al compartimiento de las baterías.
- Para la disposición del cableado de la bicicleta, fue necesario tener presente múltiples trayectorias; en donde el factor predominante fue evitar que durante el proceso de tracción humana, estos tuvieran cualquier contacto con las partes móviles o con las piernas de las personas e igualmente se consideró proteger los cables con un recubrimiento plástico.
- Componentes como el BMS y el ESC se ubicaron de manera que fueran fácilmente supervisados y conectados al sistema, además de que recibieran una buena ventilación natural, en especial durante el desplazamiento.

6. FRENADO REGENERATIVO (KERS)

El frenado regenerativo o KERS por sus siglas en inglés de Sistema de Recuperación de Energía Cinética se encuentra en fase de pruebas y sería un poco apresurado sacar a la luz resultados

concluyentes. Este sistema se diseñó con el objetivo de proveer un frenado dinámico, en el cual la energía del movimiento se ve transformada en energía eléctrica que es inyectada a las baterías para su posterior aprovechamiento en locomoción (Ehsani, et al., 2004).

Este sistema funciona empleando el motor eléctrico trifásico de tracción en el cuadrante de generador sincrónico, creando un torque en oposición al movimiento, produciendo un frenado y una corriente en el estator, la cual se hace pasar por una etapa de rectificación para convertirla en corriente continua y mediante el empleo de 2 Elevadores de tensión en corriente continua o "Booster", se eleva la tensión por encima del nivel de las baterías; haciendo uso de un transistor de potencia se regula la cantidad de corriente que se inyecta a las baterías, la corriente inyectada a estas es directamente proporcional al torque de frenado que produce el motor, por lo cual se permite ajustar el efecto del frenado sobre la bicicleta a gusto o necesidad según la situación.

Este diseño se encuentra en etapa de pruebas y mejoras, sin embargo de manera preliminar se puede afirmar que para los desplazamientos urbanos, en los cuales es frecuente detenerse y luego continuar la marcha, el sistema brinda una mejora a la autonomía. El diagrama de bloques del sistema completo es mostrado en la Fig. 6.

7. PRUEBAS Y COMPARACIONES

Luego de las pruebas a la bicicleta, se demuestra la superioridad de este medio de transporte en términos de eficiencia energética vs. medios de transporte convencionales, incluso aún sin estar incluidas las mejoras, tras la incorporación del sistema KERS.

Una carga completa del sistema de baterías demanda 765 Wh en corriente continua. Completamente cargadas las baterías tienen una capacidad de 753 Wh, pues los restantes 12 Wh son disipados en calor, esto nos hace concluir que el proceso combinado de carga y descarga la batería tiene una eficiencia del 98,4%, lo cual es de resaltar. Ver Fig. 4.

Luego de algunas pruebas con las baterías completamente cargadas, se determinó que el vehículo posee una autonomía media de 83 km en

terrenos llanos. Teniendo en cuenta que un galón de gasolina tiene una densidad energética de aproximadamente 34.000 Wh (U.S. Environmental Protection Agency, 2013), es posible comparar los resultados en relación con los consumos típicos de un automóvil compacto y con el de una motocicleta pequeña. Ver Tabla 2.

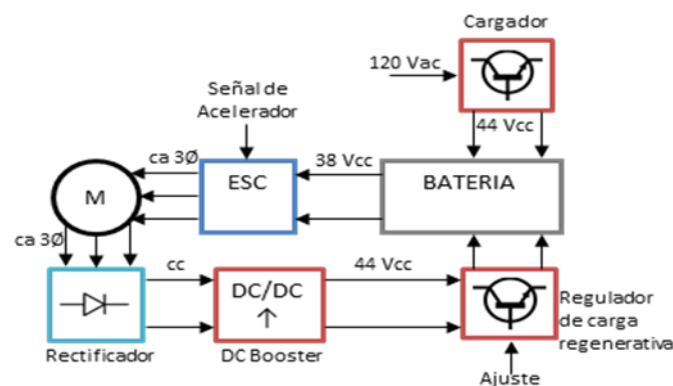


Fig. 6. Diagrama completo del sistema

Analizando los datos, se determinó que el transporte en bicicleta eléctrica presenta una eficiencia energética muy alta, 2400 % superior al transporte en motocicleta y 8000% comparado con un automóvil. A pesar de lo abrumante de los datos, es un resultado esperado, dado que la masa de la bicicleta es mucho menor y los motores térmicos son muy ineficientes debido a las restricciones teóricas del ciclo de Carnot.

La bicicleta terminada puede ser vista en la Fig. 7.

8. COSTOS

En la Tabla 3. Se muestra la descripción del costo operativo mensual para la bicicleta eléctrica; considerando el costo de la energía eléctrica para las recargas de la batería según la tarifa residencial de los estratos 5 y 6, los gastos por mantenimiento, tales como: Llantas, frenos, etc. Estos costos se asumen para un recorrido estimado de 700 km por mes.

En la Tabla 4. Se muestra el presupuesto proyectado para la finalización del proyecto, hasta la fecha se ha ejecutado alrededor del 95 % del presupuesto.

Tabla 2. Comparación eficiencia energética Medios de Transporte

Medio de Transporte	Energía a ser empleada (Wh)	Energía acumulada en:	Autonomía (km)	Utilización Energética (Wh/km)
Bicicleta Eléctrica	765	Baterías 38V@20Ah	82	9,3
Motocicleta	34000	3,78 l Gasolina	150	226
Automóvil	34000	3,78 l Gasolina	45	755

Tabla 3. Costos Operativos Mensuales

Ítem	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo Mensual (\$)
Recargas (kWh)	8	440,89*	3.527
Mantenimiento	1 en 6 meses	60.000	10.000
Impuestos	0	0	0
Total Mensual			13.527

* ([EPM, 2013](#))



Fig. 7. Exposición Bicicleta terminada, en la XX Feria Internacional de Ingeniería INGENIAR UPB 2013, Septiembre 30

9. CONCLUSIONES

La construcción de cualquier medio de transporte eléctrico involucra múltiples disciplinas que abarcan desde el diseño estético hasta la ingeniería mecánica y eléctrica e incluso estudios anatómicos y de ergonomía, siendo un ejercicio donde el trabajo multidisciplinario es fundamental.

Luego de participar en el proceso de investigación, desarrollo y pruebas del sistema de movilidad eléctrica, queda claro la amplia superioridad en eficiencia y en disminución de costos de operación, respecto a los medios convencionales de transporte.

Debido a que el Motor eléctrico solo tiene una pieza móvil y a su diseño tipo "Brushless", éste no presenta puntos de rozamiento, ni piezas de desgaste; por lo tanto, la confiabilidad del sistema es muy alta y la vida útil de los elementos muy prolongada.

Tabla 4. Presupuesto Projectado del Proyecto

Recurso	Participación			Implica desembolso	
	Estudiante (COP)	UPB (COP)	Donación (COP)	Si	No
Bibliografía			750.000		X
Papelería	80.000			X	
Telecomunicaciones					
Equipos	120.000			X	
Equipos		5.000.000			X
Transporte	400.000			X	
Asistencia a eventos	250.000			X	
Gastos de representación	250.000			X	
Trabajo Estudiante 1000h @ 4.000 COP/h	2,600,000				X
Trabajo Director 50h @ 70.000 COP/h			3.500.000		X
Componentes Eléctricos y Electrónicos	250.000			X	
Software AutoCAD 2013		12.400.000			X
Motor y controlador	700.000			X	
Baterías y BMS	1.400.000			X	
Bicicleta y demás piezas	550.000			X	
Componentes sistema KERS	350.000			X	
Manufactura	800.000			X	
Gatos Ingeniar	230.000			X	
Subtotal	4.880.000	17.400.000	4.250.000		
Imprevistos (10%)	485.000				
Total (COP)	5.380.000	17.400.000	4.250.000		
Total que implica desembolso (COP)				5.380.000	
Total que no implica desembolso (COP)					21.650.000
Gran Total (COP)	27.030.000				

Actualmente se vive un momento coyuntural en el cual las tecnologías en acumuladores avanzan rápidamente mientras su costo disminuye y se vislumbra un panorama lleno de desarrollos para los vehículos eléctricos, de ahí la importancia de participar activamente en la adquisición de estos conocimientos en función de estar preparados en un futuro cercano.

Dado que en Colombia gran parte de la generación eléctrica se realiza mediante el aprovechamiento hídrico, el empleo de medios de transporte eléctricos presentan una huella de carbono muy pequeña.

La eficiencia de este tipo de transporte y una implementación generalizada, serían grandes aportes a un desarrollo económico mundial sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos a los profesores de la Universidad Pontificia Bolivariana: I.E. Andrés Emiro Díez Restrepo Ph.D y al I.E Eugenio Betancur Escobar Ph.D, por su ayuda incondicional y ser invaluable fuentes de información, siempre dispuestos a ayudarnos y a motivarnos en esta labor.

Al inventor, investigador y escritor Mr. Isidor Buchmann CEO y fundador de CADEX Electronics Inc y escritor del libro "*Batteries in a Portable World*", por la ayuda brindada durante el desarrollo del proyecto y poner a disposición de la humanidad el portal "*Battery University*", una vasta, confiable y actualizada fuente de información en el tema de baterías, cargadores y analizadores.

Nuestros agradecimientos a la XX Feria Internacional de Ingeniería INGENIAR UPB 2013, Septiembre 30 – Octubre 4 de 2013, Medellín – Colombia y a su gerente el I.Q. J. Juan David Martínez Arboleda. Ph.D.

REFERENCIAS

- A123 Systems Inc. (2011). *Nanophosphate Lithium Ion Prismatic Pouch Cell AMP20M1HD-A*, Waltham, MA: Datasheet.
- Bergveld, H., Kruijt, W. & Notten, P. (2002). *Battery Management System Design by Modeling*. Dordrecht Neetherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Buchmann, I. (2013). *Battery University, CADEX Electronics Inc.*. [Online] Available at: <http://batteryuniversity.com> [Accessed August 2013].
- Ehsani, M., Gao, Y. & Ali, E. (2004). *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals Theory And Design*. West Florida: CRC PRESS.
- EPM. (2013). www.epm.com.co. [En línea] Available at: http://www.epm.com.co/site/portals/2/documentos/tarifas/2013/tarifas_energia_enero_2013.pdf [Último acceso: Mayo 2013].
- Golden Motor Technology Co. Ltd. (2012). *Ebike Brushlees Motor Datasheet*, Changzhou, Jiangsu: s.n.
- Sandia National Laboratories. (2006). <http://www.sandia.gov/>. [Online] Available at: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2005/053123.pdf> [Accessed August 2013].
- U.S. Environmental Protection Agency. (2013). *U.S. Environmental Protection Agency*. [Online] Available at: <http://www.epa.gov/fueleconomy/label/420r10>
- [904.pdf](#)
[Accessed 5 May 2013].
- Xianxia, Y., Hansan, L. & JiuJun, Z. (2011). *Lithium-Ion Batteries Advanced Material and Technologies*. Boca Raton. FL: CRC PRESS.

SOBRE LOS AUTORES

Juan Felipe Hoyos Mesa

Ingeniero Electricista de la Universidad Pontificia Bolivariana. Desde febrero de 2011 se desempeña como Ingeniero de diseño en la empresa HMV Ingenieros. Participó con el segundo autor de este artículo en la XX Feria Internacional de Ingeniería INGENIAR UPB 2013, Septiembre 30 – Octubre 4 de 2013, Medellín – Colombia, siendo galardonados con el primer puesto en la categoría proyecto de grado y luego se les otorgo la mención de honor a la tesis por parte de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Andrés Felipe Montoya Restrepo

Ingeniero Electricista y Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Desde octubre de 2012 se desempeña como Ingeniero de diseño en la empresa HMV Ingenieros. Participó con el primer autor de este artículo en la XX Feria Internacional de Ingeniería INGENIAR UPB 2013, Septiembre 30 – Octubre 4 de 2013, Medellín – Colombia, siendo galardonados con el primer puesto en la categoría proyecto de grado y luego se le otorgo la mención de honor a la tesis por parte de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Andrés Emiro Diez Restrepo

Ingeniero Electricista, Máster en ingeniería y Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana. Docente-Investigador de pregrado y posgrado de la UPB desde 2002. Ha participado en proyectos de investigación con ISA, EPM, CREG, CODENSA, TERPEL y el Metro de Medellín. Ha dirigido proyectos de investigación cofinanciados por Colciencias-Codensa en el área del transporte eléctrico. Recibió el premio ASOCODIS-CNO a la investigación y desarrollo en 2009. Docente distinguido de la Facultad de Ingeniería Eléctrica-Electrónica de la UPB. Actualmente se desempeña como Docente Titular de la Universidad Pontificia Bolivariana,

miembro de la Junta directiva de la SAI y participa en diversos proyectos de investigación.

José Armando Bohórquez Cortazar

Ingeniero Electricista y Master, Docente Investigador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UPB, Coordinador de los Laboratorios de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Miembro del grupo de Investigación de TYD y con participación en proyectos de tracción eléctrica con empresas como UPB, CONDENSE, EPM, METRO DE MEDELLIN, entre otros.