

Selección del sistema de propulsión de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible*

Propulsion System Selection Applied in a Low Fuel Consumption Urban Vehicle

Recibido: 21 de abril de 2015 • Aceptado: 16 de julio de 2015

Para citar este artículo: R. Cerpa, L. Mónico, D. Cortés, S. Mustafa y A. Bonilla «Selección del sistema de propulsión de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible», *Ingenium*, vol. 17, n.º 33, pp. 41-53, julio de 2015.



Rafael Mauricio Cerpa Bernal**
Luisa Fernanda Mónico Muñoz***
Diego Fernando Cortés Ruiz****
Samy Walid Mustafa Prieto*****
Anlly Bonilla Candidata*****

Resumen

El vehículo urbano con bajo consumo de combustible, aplicado a la competencia Eco Shell Marathon, contará con un sistema de propulsión híbrido que tiene componentes eléctricos y mecánicos; los cuales están encargados de generar tracción a partir de energía química obtenida de un combustible. Los parámetros de velocidad y carga paga vienen dados por la normatividad de la competencia, que a su vez se utiliza para establecer los requerimientos que el vehículo debe suplir. El artículo está enfocado hacia el proceso de

* Artículo de investigación, producto derivado del proyecto de investigación: Diseño de un vehículo concepto urbano aplicado a la competencia Shell Eco - Marathon, realizado en el grupo AEROTHEC de la Universidad de San Buenaventura, Bogotá, llevado a cabo desde el 2014.

** Ph.D. en Ingeniería Aeroespacial, Universidad Politécnica de Varsovia; Universidad de San Buenaventura, Bogotá; E-mail: rcerpa@usbbog.edu.co

*** Ph.D. en Ingeniería Aeroespacial, Universidad Politécnica de Valencia; Universidad de San Buenaventura, Bogotá. E-mail: lmonico@usbbog.edu.co

**** Ingeniero Aeronáutico; Universidad de San Buenaventura, Bogotá. E-mail: dfcortes@academia.usbbog.edu.co

***** Ingeniero Aeronáutico; Universidad de San Buenaventura, Bogotá. E-mail: smustafa@academia.usbbog.edu.co

***** Estudiante Ingeniería Aeronáutica; Universidad de San Buenaventura, Bogotá. E-mail: abonilla@academia.usbbog.edu.co

selección de los sistemas del motor híbrido, aplicado en la industria automotriz, ya que está siendo comprobada la teoría de la reducción en el impacto ambiental haciendo un menor uso de hidrocarburos.

Palabras clave

Torque, potencia, transmisión, energía, propulsión y motor.

Abstract

Urban vehicle proposed for the Eco Shell Marathon competition uses a hybrid propulsion system with electrical and mechanical components; those ones will produce the machine traction. The velocity and payload parameters are restricted by the competition, baseline and initial design parameters for the urban concept vehicle are established by regulations. The aim of this paper is to show the hybrid engine selection to achieve a reduction in the vehicle specific fuel consumption.

Keywords

Torque, power, transmission, energy, propulsion and engine.

Introducción

El presente estudio hace parte del proyecto de investigación institucional titulado «Diseño de un Vehículo Concepto Urbano Aplicado a la Competencia Shell Eco Marathon», convocatoria 008 de la Universidad de San Buenaventura, Bogotá.

La compañía Shell en pro de disminuir los índices de contaminación producidos por los automóviles, ha desarrollado una competencia, la cual da la oportunidad a investigadores de diseñar, construir y exponer nuevos conceptos vehiculares que generen un mayor rendimiento energético con el menor consumo de combustible; el objetivo de la competencia es suministrar un litro de gasolina a cada vehículo competidor para que recorra la mayor cantidad de kilómetros (condicionando peso, velocidad, parámetros geométricos y de operación del vehículo). Esta competencia se realiza anualmente y tiene diferentes versiones a nivel mundial (América, Asia y Europa). Debido a esto, se decidió diseñar un vehículo concepto urbano, que se acople a los requisitos y reglas de la competencia Eco Shell versión Américas.

La fase inicial del proyecto se enfocó en una recopilación de antecedentes de los vehículos competidores en la prueba en los últimos 10 años; teniendo en cuenta que dos clases de conceptos de vehículos pueden ser diseñados (Prototipo y Urbano) y de acuerdo a la actualidad regional, el equipo de investigación decidió seleccionar el vehículo concepto urbano para el desarrollo del proyecto. Adicionalmente, considerando la experiencia de los integrantes del grupo de investigación AeroTech, se determinó propulsar el vehículo con un motor híbrido (Eléctrico); esta planta motriz debe garantizar el torque necesario de acuerdo al peso y diámetro de las ruedas del vehículo, según la reglamentación de la competencia.

El motor híbrido debe proporcionar la potencia al eje de tracción necesaria para producir el movimiento del vehículo; la potencia entregada a dicho eje proviene de un motor eléctrico, el cual controla sus RPM's gracias a un controlador de velocidad, así mismo este está conectado a un supercapacitor que genera la energía eléctrica necesaria para la operación del motor; el sistema de carga de dicho componente se basa en un motor a gasolina que transformará la energía química del combustible en energía mecánica, la cual mueve un eje conectado con el sistema alternado, que carga el componente; el motor de combustión interna, solo es encendido en el momento en que el supercapacitor se encuentre cercano al punto de descarga mínima.

Finalmente, para el desarrollo del sistema de propulsión se tuvieron en cuenta sistemas secundarios, tales como soportes, acoples, eje, escape de gases, transmisión de potencia, alimentación de combustible y ubicación de componentes relacionados con la planta motriz.

Los últimos resultados obtenidos en la competencia Eco Shell - América 2015, realizada en Detroit Estados Unidos, en la división de concepto urbano - híbrido (gasolina), arrojaron que el equipo Mater dei supermileage logró la victoria con 206,02 km/L, seguido por UBC supermileage team con 137,83 km/L y Comets con 59,05 km/L [9]. Es importante aclarar que la competencia permite conocer dichos resultados, pero los equipos participantes no dan información pública acerca del desarrollo de sus prototipos, razón por la cual realizar un estado del arte del diseño de los vehículos es una tarea difícil de referenciar.

1. Línea base

En el presente documento se entiende como línea base, el diseño geométrico del vehículo de acuerdo a varias opciones estudiadas (figura 1). En esta etapa de diseño se establecen los parámetros más relevantes del mismo. Esta línea base muestra el diseño general del vehículo, que cumple con las regulaciones establecidas por la competencia, tales como la altura total, altura respecto al suelo, ancho, largo del carro, distancia entre ejes, etc.

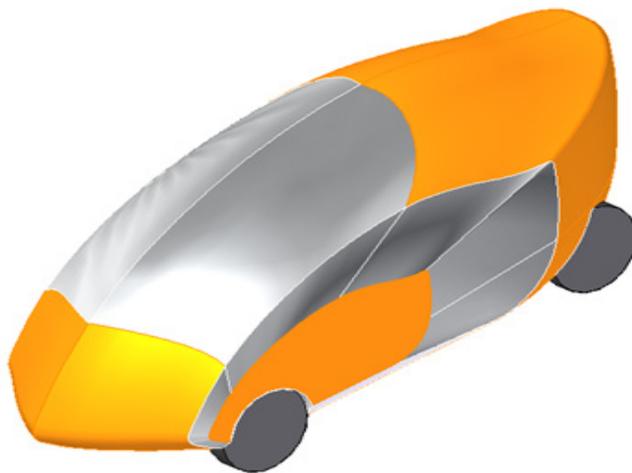


Figura 1: Isométrico del diseño base. [6]

Así como la competencia establece los límites máximos sobre el dimensionamiento de todo el vehículo, es necesario determinar un volumen de control o espacio dimensionado para la localización y ensamble de la planta motriz; considerando lo anterior se plantea el diseño mostrado en la figura 2.

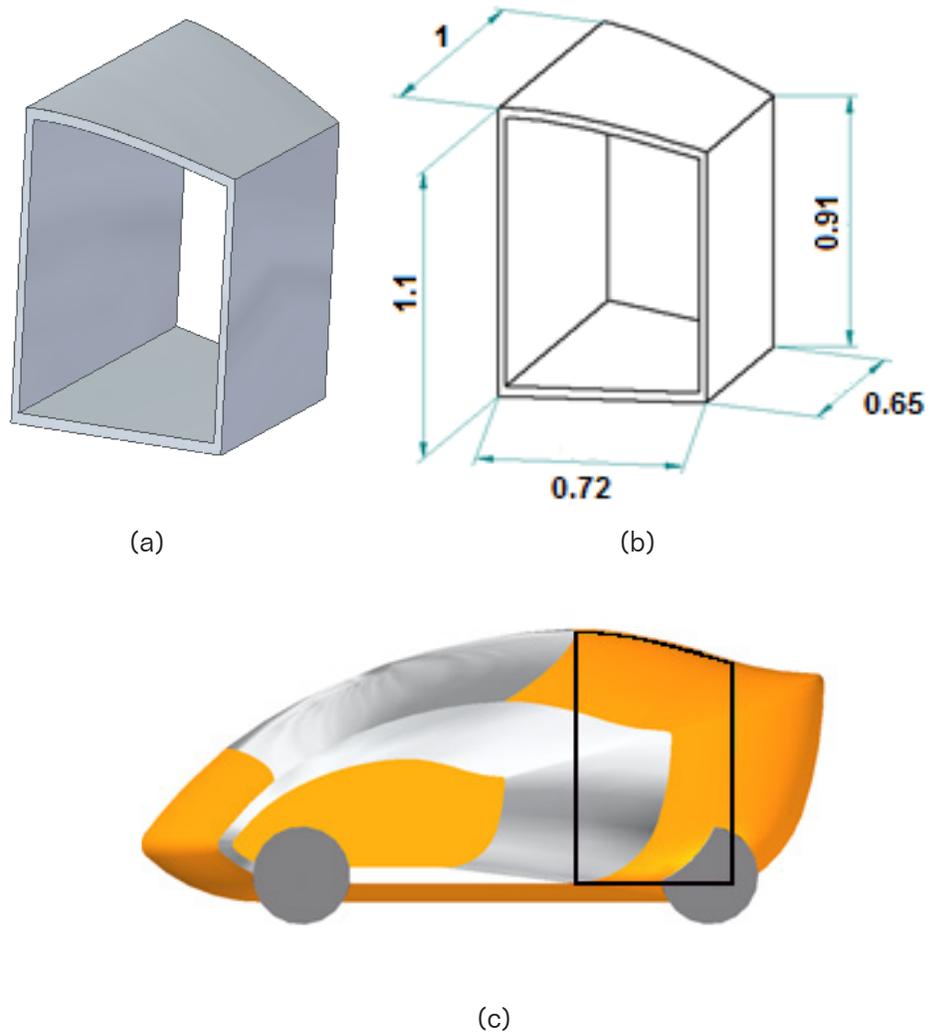


Figura 2. a) Volumen de control de la planta motriz, b) volumen de control con cotas (unidades en metros) c) ubicación del volumen de propulsión en el vehículo.

La ubicación del volumen de control de la planta motriz en el vehículo presentada anteriormente (figura 2c), surge a partir del espacio otorgado para la distribución de todos los componentes de la sección de potencia del vehículo. Este espacio viene dado por la sinergia entre las diferentes divisiones de diseño del vehículo (Aerodinámica, Estructuras, Sistemas y Sistema de propulsión).

Se definió la altura que existe desde el suelo hasta el volumen de control de la planta motriz a partir de la ubicación del eje de tracción y el diámetro externo de la rueda (figura 2b). En cuanto a la ubicación lateral, se limitó desde el punto más alto de la curvatura que forma el boceto del vehículo, hasta el eje de tracción.

Para la geometría del volumen de control de la planta motriz que se muestra en la figura 2a, se utilizó como factor determinante la curvatura que presenta el vehículo en su parte superior y transversal, por la reducción que existe entre el ancho delantero y el ancho trasero del vehículo.

En la figura 3 se presenta la metodología aplicada en el proceso de diseño y selección de la totalidad del conjunto de la planta motriz.

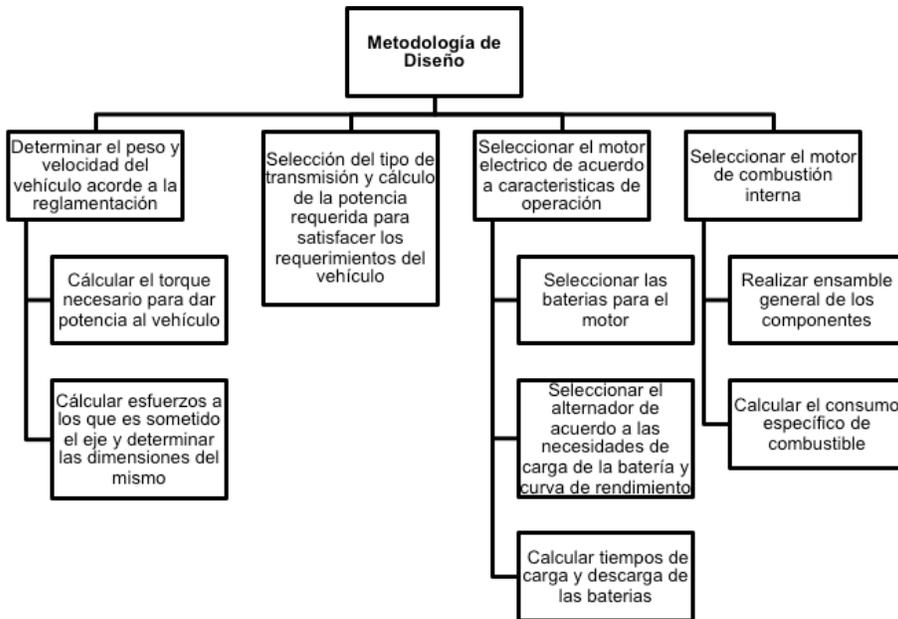


Figura 3. Metodología de diseño y selección de la planta motriz

2. Diseño y selección de los componentes de la planta motriz

Para el diseño preliminar del sistema de propulsión, se realizó un diagrama de cuerpo libre en el cual se posicionaron y direccionaron las principales fuerzas actuantes en el sistema; El diagrama presentado en la figura 4, hace referencia a los apoyos del vehículo; finalmente se supone que el centro de gravedad del mismo se localiza en el centro geométrico del rectángulo formado por las cuatro llantas en contacto con el suelo.

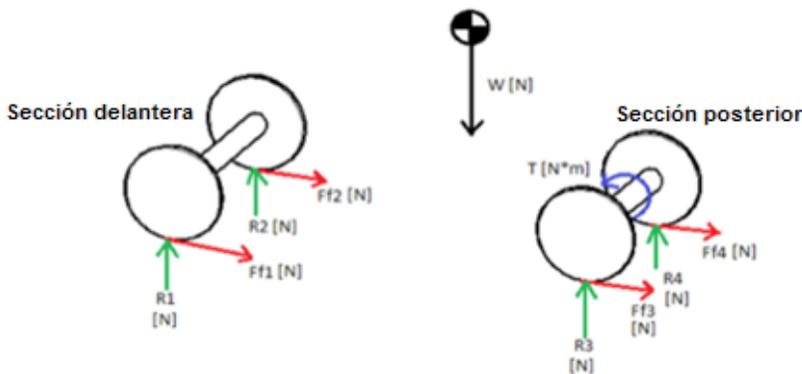


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del vehículo

Para la estimación inicial de las principales fuerzas actuantes en el vehículo, es necesario tener en cuenta las restricciones dadas por la normatividad de la competencia mostrada en la tabla 1.

Parámetro	Valor	Unidades	Símbolo
Masa del vehículo	280	kg	M
Velocidad máxima de operación	15	mph	V
Tiempo de encendido	1	s	t
Diámetro de la llanta	18	in	d
Coefficiente de fricción estática (Caucho - concreto)	1,0		\dot{i}_s
Coefficiente de fricción cinética (Caucho - concreto)	0,48		\dot{i}_k

Tabla 1. Parámetros establecidos normatividad competencia

Para el cálculo del torque del vehículo es necesario calcular o conocer los siguientes parámetros: perímetro de la rueda, peso del vehículo incluyendo tripulante, fuerza generada por el peso del vehículo, fuerza generada en cada reacción, fuerza de fricción estática, fuerza de fricción cinética y velocidad angular. Teniendo en cuenta que al localizarse el centro de gravedad en el centro geométrico formado por la base del vehículo, las cuatro reacciones tienen el mismo valor. Algunas de las fórmulas empleadas fueron las siguientes:

$$\text{Perímetro} = P_o = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (1)$$

$$\text{Fuerza generada por el peso del vehículo} = W = m \cdot g \quad (2)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = W \rightarrow R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \frac{W}{4} \quad (3)$$

$$\text{Fuerza de fricción estática} = F_{fs} = \dot{i}_s \cdot N = \dot{i}_s \cdot R \quad (4)$$

$$\text{Fuerza de fricción cinética} = F_{fk} = \dot{i}_k \cdot N = \dot{i}_k \cdot R \quad (5)$$

$$\text{Torque mecánico} = T_{(\text{mecánico})} = F \cdot r \cdot \text{sen} \quad (6)$$

$$\text{Torque mecánico estático} = T_s = F_{fs} \cdot r \quad (7)$$

$$\text{Torque mecánico dinámico} = T_k = F_{fk} \cdot r \quad (8)$$

$$\text{Torque de inercia} = T_{(\text{inercia})} = m \cdot r^2 \cdot \dot{\omega} \quad (9)$$

$$\text{Potencia} = P = T \cdot \dot{\omega} \quad (10)$$

Se debe tener en cuenta que para el cálculo de la fuerza de fricción estática y dinámica se utilizaron factores de seguridad de 1,5 y de 2. Los resultados obtenidos de acuerdo a las ecuaciones enumeradas anteriormente se muestran en la tabla 2. [8]

Parámetro	Valor	Unidades	Símbolo
Perímetro de la rueda	1,4363	m	P_o
Fuerza generada por el peso del vehículo	2745,96	N	W
Fuerza de reacción	686,49	N	R
Fuerza de fricción estática con factor de seguridad de 1.5	2059,47	N	F_{fs}

Parámetro	Valor	Unidades	Símbolo
Fuerza de fricción estática con factor de seguridad de 2	2745,96	N	F_{fs}
Fuerza de fricción cinético con factor de seguridad de 1.5	1647,585	N	F_{fk}
Fuerza de fricción cinético con factor de seguridad de 2	2196,77	N	F_{fk}
Velocidad angular	280,11	rpm	ω
Aceleración angular	4,67	rev/s ²	α
Torque mecánico estático con factor de seguridad de 1,5	470,79	Nm	T_S
Torque mecánico estático con factor de seguridad de 2	627,73	Nm	T_S
Torque mecánico cinético con factor de seguridad de 1,5	376,63	Nm	T_k
Torque mecánico cinético con factor de seguridad de 2	502,18	Nm	T_k
Torque de inercia	68,31	Nm	$T_{(inercia)}$
Potencia mecánica con factor de seguridad de 1.5	2197,92	W	P
Potencia mecánica con factor de seguridad de 1.5	2930,56	W	P
Potencia (torque de inercia)	318,91	W	P

Tabla 2. Parámetros iniciales calculados

Para determinar los parámetros establecidos en la tabla 2, se calculó tanto el torque estático como el dinámico, con un factor de seguridad de 2 (Suponiendo que el eje de tracción soportará la totalidad del peso del vehículo) y con un factor de seguridad de 1,5 (Factor de seguridad industria aeroespacial), con el fin de establecer los valores más críticos respecto a los requerimientos que la planta motriz debe satisfacer. Adicionalmente se calculó el torque de inercia, para determinar la fuerza necesaria para iniciar el movimiento del vehículo.

Cabe aclarar que la totalidad de ecuaciones y cálculos realizados para el diseño de la planta motriz no son incluidos en el artículo; y las ecuaciones indicadas son presentadas para dar al lector una idea del proceso de diseño y selección del componente.

El objetivo de esta sección es explicar los componentes que se diseñaron y seleccionaron para conformar la totalidad de la planta motriz a utilizar en el vehículo. Los componentes explicados a continuación fueron diseñados y/o seleccionados acorde a la metodología explicada en la figura 3.

Eje de tracción (figura 5): es el componente de la planta motriz que se encarga de recibir la potencia transmitida desde el motor eléctrico y transferirla a las ruedas del vehículo para producir su movimiento. En el diseño inicial se estipuló hacer uso de un eje macizo por la simplicidad de cálculo de este tipo de ejes además de su resistencia. En futuras investigaciones es necesario optimizar dicho eje para reducir el peso del mismo sin afectar su desempeño.

El diseño del eje satisface las necesidades impuestas por la normatividad de la competencia y fue analizado a partir de los criterios de Goodman (basado en la comparación de los resultados de una curva de falla apropiada) y Gerber (aquel que utiliza el principio de que los esfuerzos se combinan mediante la teoría de distorsión) [7]. Luego de realizar

todos los cálculos estructurales del eje de tracción, se obtuvo como resultado un eje de 1½" de diámetro con 0.8 m de largo y fabricado en Acero AISI 4140 [3].

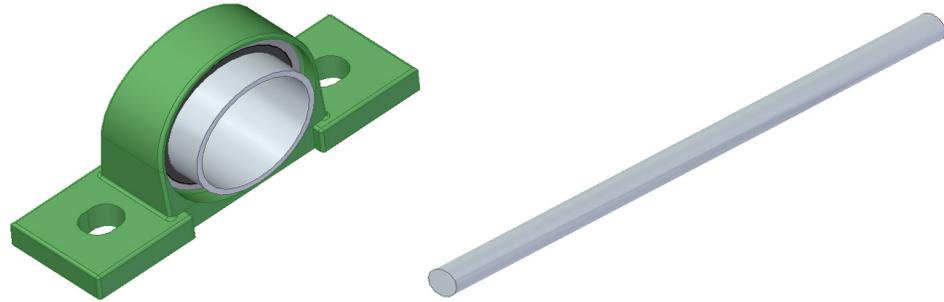


Figura 5. Eje y soporte principal en CAD

Transmisión de potencia eje de tracción – Motor eléctrico (figura 6): es la transmisión dispuesta entre el eje de tracción y el eje del motor eléctrico. Luego de realizar el estudio de tipos de transmisión de potencia se encontró que las cadenas poseen un fácil mantenimiento, la distancia entre centros es más fácil de modificar, ofrecen menor cantidad de pérdidas y son implementos existentes en el mercado actual de acuerdo al catálogo INTERMEC [2]; teniendo en cuenta la revisión bibliográfica de tipos de transmisión y acorde a sus ventajas y desventajas, se decidió seleccionar un plato **40 A 44** que se utiliza en conjunto con la cadena número **40** referencia **08-B** británica con paso de ½", la cual posee 44 dientes por su diámetro externo; esta combinación se establece y se recomienda comercialmente en la industria.

Esta transmisión tiene como fin brindar tracción al vehículo urbano con la menor cantidad de pérdidas posibles, además de satisfacer los requerimientos establecidos en el diseño de la planta motriz.

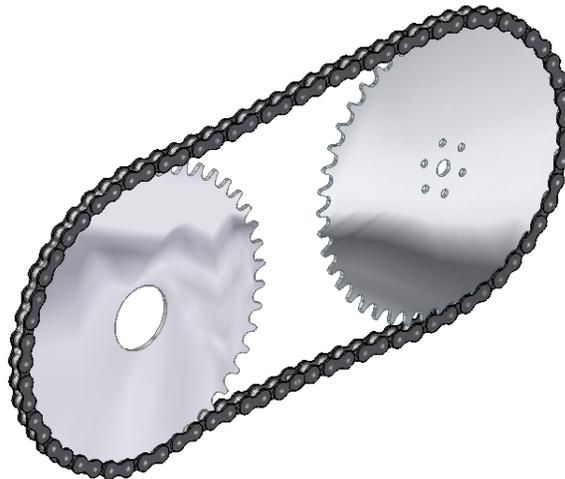


Figura 6. Transmisión de potencia eje tracción - Motor Eléctrico

Motor eléctrico (figura 7): es el dispositivo encargado de convertir la energía eléctrica proveniente del ultra capacitor en energía mecánica, la cual es transferida al eje de trac-

ción; este proceso se realiza mediante el principio de aversión o repelencia que presenta un elemento metálico cargado eléctricamente al encontrarse en presencia de un imán.

Luego de realizar un estudio de las capacidades, disponibilidad, rendimiento y potencia de diferentes tipos de motores eléctricos y teniendo en cuenta las restricciones y características de operación de la planta motriz del vehículo (281 rpm, 628 N·m de torque y 2931 W de potencia); se decidió hacer uso de un motor Outrunner Rotomax 80cc; el cual satisface los requerimientos de trabajo del componente, además de su bajo costo de adquisición en comparación con otros motores, su bajo peso y pequeñas dimensiones acorde con el resto de motores encontrados en el mercado actual.



Figura 7. Motor eléctrico en CAD.

Controlador de velocidad (figura 8): la función de este componente es modificar el rango de velocidad del motor eléctrico y a su vez la dirección electrónica. Por otra parte, este controlador puede ser utilizado como freno dinámico para el motor eléctrico, ya que este está en capacidad de reducir la velocidad del motor mediante el retorno de la energía o potencia a la línea de suministro o ultracapacitor. El controlador de velocidad recomendado por el fabricante del motor eléctrico Turnigy Rotomax 80 cc es el turnigy dlux HV ESC, siendo un factor determinante para su selección y aplicación en la planta motriz.

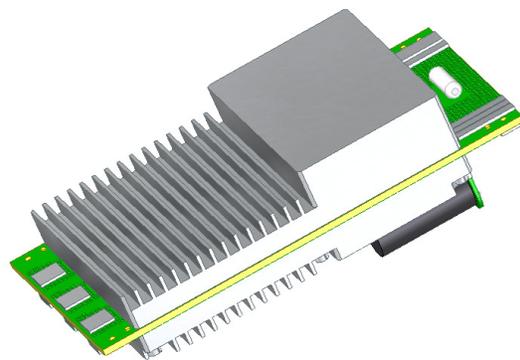


Figura 8. Controlador de velocidad en CAD.

Ultracapacitor (figura 9): es el dispositivo encargado de almacenar la energía eléctrica proveniente del alternador para que sea utilizada por el motor eléctrico. Este componente

mostrado en la figura 9 funciona como los capacitores convencionales, sin embargo, tiene la capacidad de almacenar hasta 10 000 veces más energía y con igual proporcionalidad de tamaño. Algunos logran llegar a los 3 000 F, mientras los comunes están en el orden de micro faradios (μF). Se caracteriza por su excelente rendimiento y capacidad de almacenar una elevada energía en relación a su peso. Por último, este dispositivo no se ve afectado por el efecto memoria que presentan las baterías [4].

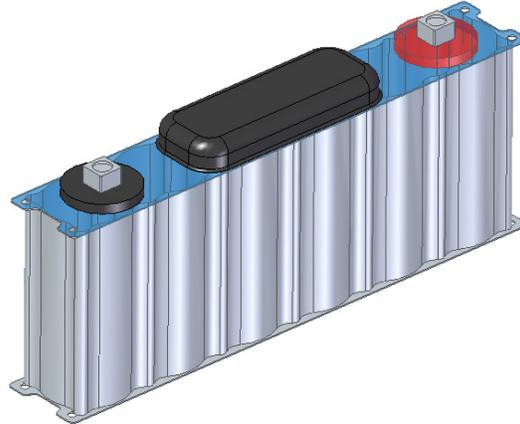


Figura 9. Ultracapacitor en CAD

Alternador (figura 10): es el encargado de transformar la energía mecánica proveniente del motor de combustión interna en energía eléctrica que se suministra al ultracapacitor. Los alternadores como generadores de energía producen corriente cuando se crea un movimiento a nivel interno de un campo magnético. En un alternador puede hacerse la analogía rotor - estator, donde el rotor es el encargado de crear el campo magnético girando al interior del estator que a su vez hace las veces de conductor.

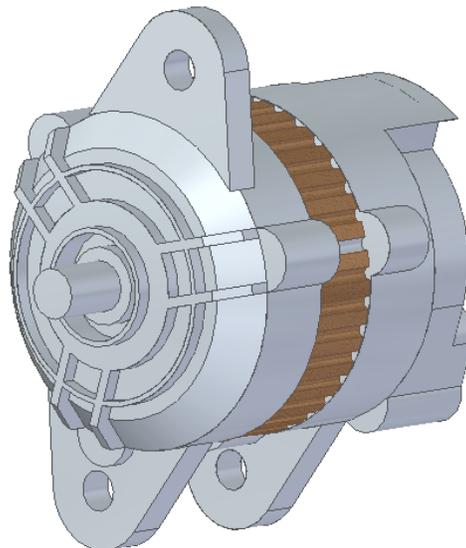


Figura 10. Alternador en CAD

Transmisión de potencia eje del alternador - Motor de combustión interna (figura 11): es la transmisión dispuesta entre el eje del alternador y el motor de combustión

interna tal como se muestra en la figura 11. Para el diseño de la transmisión se efectuó el mismo estudio usado en la selección de la transmisión del eje de tracción y el motor eléctrico; dando como resultado la selección de un piñón **16 A 11**, que se utiliza en conjunto con la cadena número **16** referencia **08-B** británica con paso de $\frac{1}{2}$ " y 11 dientes en su diámetro externo; esta es la combinación establecida y recomendada comercialmente. El objetivo de esta transmisión es brindar la tracción y el movimiento proveniente del motor de combustión interna al alternador.

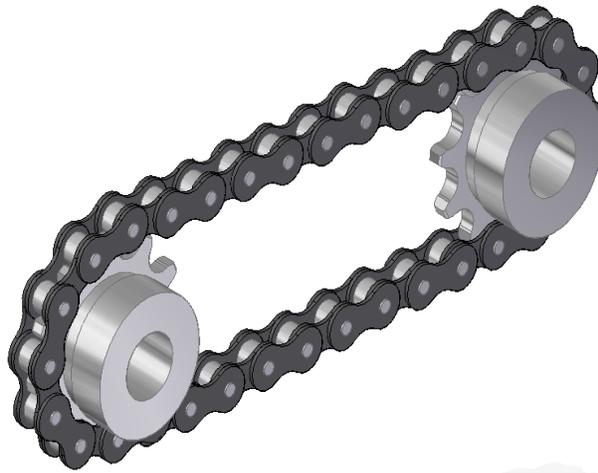


Figura 11. Transmisión de potencia eje del alternador - Motor de combustión interna

Motor de combustión interna (figura 12): este componente convierte la energía química proveniente del combustible y la transforma en energía mecánica que será transmitida al alternador. En los motores de combustión interna el proceso de combustión tiene lugar en el propio fluido de trabajo, siendo este generalmente una mezcla de aire y combustible [1].

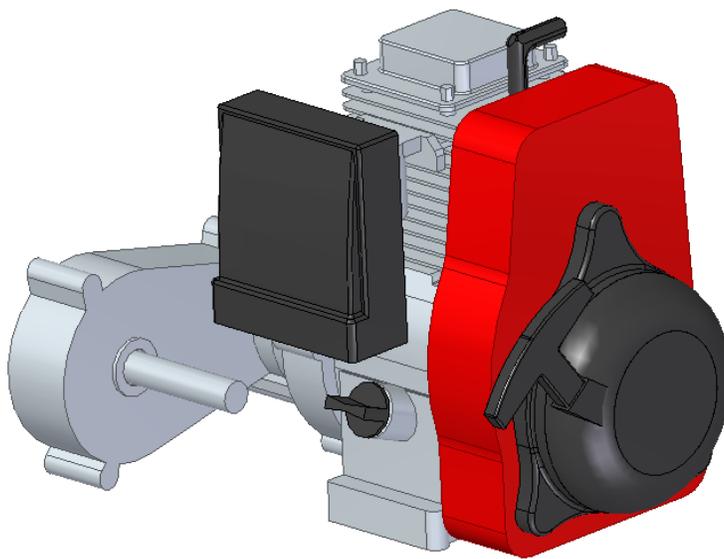


Figura 12. Motor recíproco en CAD

Luego de realizar la selección y diseño de la totalidad de los componentes que conforman la planta motriz del vehículo urbano, se procedió a realizar la organización de cada uno de los elementos del sistema de propulsión y distribuirlos en el espacio disponible en el volumen de control (figura 2). El resultado de dicha distribución es el mostrado en la figura 13.

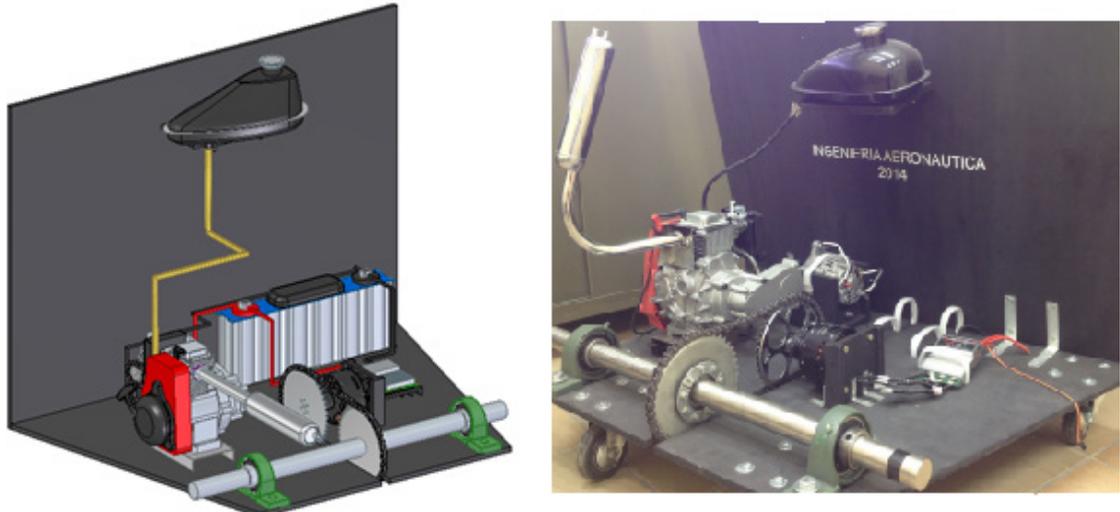


Figura 13. a) Planta motriz ensamblada en CAD b) Planta motriz ensamblada

3. Características principales

Las características principales de la planta motriz del vehículo urbano que se muestran en la tabla 3, son el resultado de los cálculos vinculados a todos los componentes listados y expuestos anteriormente:

Parámetro	Valor	Unidades
Masa	33,3	kg
Fuerza respecto al peso	326,57	N
Porcentaje del peso del conjunto motor en comparación con todo el vehículo	15,8 %	
Tiempo de descarga	2	min
Tiempo de carga	1,53	min
Tiempo total de un ciclo de funcionamiento	3,53	min
Consumo de combustible por ciclo de funcionamiento	7,93	gr
Distancia recorrida por ciclo	1,56	km
Consumo de combustible	133,67	km/l
Costo	\$5' 158.450	COP

Tabla 3. Características planta motriz

Conclusiones

La metodología de selección planteada en el documento brinda un método confiable en el proceso de identificación de los componentes a ser utilizados en un motor híbrido. Acorde con los cálculos realizados y partiendo de la reglamentación dada por la compañía Shell, es posible concluir que la aproximación inicial del motor seleccionado y diseñado, debe ser caracterizado, para posteriormente ser optimizado y de esta forma disminuir el consumo de combustible por distancia recorrida.

El diseño del eje debe ser modificado, teniendo en cuenta que dicho componente afecta el peso del vehículo, razón por la cual es necesario realizar un nuevo eje con sección transversal variable, donde su máximo diámetro se localice en los soportes principales del componente. Esta modificación se realizará de acuerdo al análisis del criterio de Gerber y de Goodman.

Teniendo en cuenta los motores de combustión interna presentes en el mercado es posible determinar que la mejor solución para garantizar el menor consumo de combustible del vehículo, es diseñar y construir el mismo de acuerdo a las condiciones de operación de la totalidad del conjunto motriz. Adicionalmente es posible observar que los motores eléctricos utilizados en aerodelismo, pueden ser aplicados a esta clase de motores híbridos. Finalmente se determina que el uso de ultra capacitores es esencial en la competencia Shell Eco Marathon acorde con la reglamentación.

Referencias

- González, P. & Fernández, D. (2011). Motores de combustión interna. Madrid: Reverte.
- INTERMEC. (24 de junio de 2014). <http://www.intermec.com.co>. Obtenido de <http://www.intermec.com.co>:http://www.intermec.com.co/pdf/Catalogo_productos_Intermec.pdf
- L. V. (19 de junio de 2014). Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de www.utp.edu.co: <http://blog.utp.edu.co/ivanegas/files/2011/08/Tablas.pdf>
- Manuel, G. (2 de julio de 2014). <http://www.electrosector.com>. Obtenido de <http://www.electrosector.com>:<http://www.electrosector.com/wpcontent/ftp/descargas/ultra.pdf>
- Norton, R. (2010). Diseño de Maquinaria. McGraw-Hill.
- Cerpa, R., Mónico, L., Mesa, M., Barrera, S., Cortes, D., Mustafa, M., . . . Pinzón, A. (2015). Diseño de un vehículo concepto urbano aplicado a la competencia Shell Eco Marathon. Bogotá.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D. F.: McGraw-Hill.
- Willard, P. (2011). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Prentice Hall.