

Vol. 8 N° 2 • julio - diciembre 2018



DISEÑO DE UN VEHÍCULO DE PROPULSIÓN HUMANA TERRESTRE PARA LA COMPETENCIA SUR AMERICANA DE ASME 2018

Design of a human powered land vehicle ASME South American Challenge 2018

Javier Vargas, Royni Abud, Leonardo González, Ricardo Villareal, Paul Hernández y Andrea Picón

Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela.

royniabud@gmail.com

RESUMEN

Los vehículos de propulsión humana (HPV) para las competencias de la ASME internacional (HPVC), motiva, el diseño de vehículos ligeros en respuesta a las competencias de dicha prueba. De esta manera, el estudio técnico de este diseño se basó en cuatro áreas: ergonomía, transmisión, estructura y aerodinámica. Se realizó una prueba ergonómica para obtener geométricos que se ajustaron a las exigencias técnicas, asegurando la comodidad y buen desempeño en atención a las características de los pilotos. La geometría se aplica utilizando el enfoque de Patterson y Leone para garantizar un diseño con buenas cualidades de manejo. El objetivo de este estudio fue diseñar un vehículo de propulsión humana terrestre con dimensiones geométricas y cualidades de manejo adecuado, con los principios ingenieriles para el desarrollo de medios de transporte alternativo y sustentable. La metodología se inscribe en la modalidad de proyecto factible. El diseño y análisis del proyecto fue respaldado por software es computacionales CAD y CAE. Para obtener un arreglo geométrico resistente, se desarrolló una optimización topológica con las restricciones dadas por la prueba ergonómica, luego se recurrió a la simulación por metamodelo para obtener las especificaciones finales del chasis, basado en aluminio 6063 T5. Una vez que se definió la geometría, se desarrolló un carenado utilizando un

enfoque aerodinámico para garantizar una buena reducción del arrastre por medio de la herramienta de CFD. Finalmente, se seleccionó a partir de la configuración disponible de tren de engranajes para la transmisión de dos etapas, pertinentes para proporcionar una mayor aceleración y velocidad máxima.

Palabras clave: Vehículo de propulsión humana, Ergonomía, Metamodelo y Carenado.

ABSTRACT

Design of Human Powered Vehicles (HPV) to compete in ASME International's Human Powered Vehicle Challenge (HPVC), motivates design of lightweight vehicles capable to stand the event's challenges. The technical study was based on four areas: ergonomics, transmission, structure and aerodynamics. An ergonomic test is made to design the geometry to fit to team member's measures and adjust the pilot to an ergonomic position. Then the geometry is completed using the approach of Patterson and Leone to ensure a design with good handling qualities. The methodology for the design and analysis of the project was supported by CAD/CAE software. To achieve the mass reduction a topological optimization is done with the constraints given by the ergonomic test then metamodel simulation is used

to obtain the final structure of the frame, which is made from aluminum 6063 T5. Once the geometry was defined the team developed a fairing using an airfoil approach to ensure a good drag reduction, using CFD software to analyze the results. Finally, the team selected from the available configuration of gear train to design the most suitable two stage transmission capable of give great acceleration and top speed.

Keywords: HPV, Ergonomics, Metamodel y Fairing.

INTRODUCCIÓN

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME, por sus siglas en inglés) desarrolla competencias a nivel estudiantil enfocadas en el diseño de vehículos de propulsión humana (en inglés, Human Powered Vehicles o HPV) denominadas HPVC (Human Powered Vehicle Challenge), las cuales tienen lugar anualmente y reúne grupos universitarios de todas partes del mundo. Según ASME (2018), permiten demostrar la aplicación de principios ingenieriles de diseño aplicados al desarrollo de medios de transporte alternativo y sustentable.

La Seccional ASME LUZ, asume este propósito y está conformada por estudiantes de la Universidad del Zulia, los cuales se dedican al desarrollo, diseño y construcción de prototipos HPV con la meta de competir en las pruebas HPVC, que promueven el desarrollo técnico y profesional de los estudiantes de ingeniería, fomentando implícitamente la investigación y la innovación en el ámbito universitario.

El objetivo general de este proyecto fue el diseño de un vehículo de propulsión humana terrestre con dimensiones geométricas y cualidades de manejo adecuado, con los principios ingenieriles para el desarrollo de medios de transporte alternativo y sustentable. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Obtener las dimensiones geométricas adecuadas basadas en los miembros del equipo ASME LUZ.
- Desarrollar un diseño con buenas cualidades de manejo.
- Diseñar un chasis lo más ligero posible con la limitación de la accesibilidad de los materiales del mercado local.
- Diseñar un tren de transmisión que propor-

cione una buena aceleración sin afectar las capacidades de velocidad máxima.

DESARROLLO

Brown (1986), en un artículo de la revista Human Power, hace referencia a la altura del diseño sugerido de la pedalera con respecto a la parte inferior de los asientos reclinables de la bicicleta. El autor hizo sugerencias sobre la altura de la pedalera de acuerdo con su experiencia con bicicletas reclinadas, lo que indica que generaron una sensación de fatiga en las piernas, según su juicio, debido a la acumulación de ácido láctico en la sangre torrente, por lo que sugirió que las pedaleras no deberían colocarse a más de 7,5 cm (3 "). Se utilizó como referencia para establecer las altitudes de la pedalera en el presente estudio.

Zwikker (1990), hace un estudio de posiciones de piloto para bicicletas reclinadas sin carenado, con el fin de lograr una serie de ajustes de piloto con respecto al ángulo de inclinación del asiento y la altura del pedal eso permitiría una salida de potencia óptima. El autor basa sus experimentos en la construcción de un HPV con asiento ajustable y pedal a la altura de la parte inferior del asiento, con el fin de probar diferentes inclinaciones de ángulo con sus respectivas salidas de potencia. Después de sus pruebas con este HPV, se observó que los mejores resultados se obtienen en un rango de ángulos de entre 120 y 135 grados.

Asimismo, Rincón y Rosario (2010) aportan el rediseño y la adaptación de un banco de pruebas para vehículos de propulsión humana, que no solo determinaría las condiciones ergonómicas apropiadas, con respecto a la interfaz vehículo-piloto, si no que, permitiría realizar pruebas fisiológicas para determinar la posición que permitiría la mayor producción de potencia generada por un piloto.

Patterson y Leone (2010), presentaron en un simposio en los Países Bajos, un artículo que demuestra los resultados obtenidos por los vehículos diseñados por el equipo de HPV de la Universidad Estatal Politécnica de California, para las competiciones de estudiantes de la ASME. El objetivo principal del artículo presentado fue demostrar cómo las características geométricas de los vehículos tienen una influencia importante en su maniobrabilidad. Patterson y Leone, desarrollaron sus ecuaciones inspiradas en las cualidades de manejo en aviones, aplicándolas para bicicletas y motocicletas. Patterson ha estado usando sus ecuaciones desde 1997

y se ha perfeccionado a lo largo de los años.

Por su parte, Ortiz (2017) presenta un trabajo sobre el diseño óptimo de una base ancha tipo "triciclo" reclinada tipo triciclo. El autor llevó a cabo el proceso en dos partes; la primera fue la selección del material por el método ASHBY, basado en aquellos materiales que podrían ofrecer la mejor relación fiabilidad / masa. La segunda parte de su estudio, fue la determinación de la forma del marco estructural a través de un proceso de optimización topológica, su posterior análisis y adaptación a materiales comerciales y su validación, mediante modelos de simulación numérica estática y dinámica (modal y transitoria). La optimización se basó en la determinación de las cargas aplicadas en el caso crítico de operación.

El estudio de Ortiz, es de gran aporte en los procesos de optimización topológica aplicado a un vehículo de propulsión humana reclinado, sirviendo de base para el desarrollo de la geometría del marco en el presente proyecto.

METODOLOGÍA

El tipo de investigación se centra en la modalidad de proyecto factible, la cual se enfoca en la sistematización de procesos que dan origen a una propuesta posible de aplicar, es decir, con utilidad en un escenario determinado.

Se parte de un análisis ergonómico, adaptado a los pilotos que utilizarán el vehículo, por lo que, el primer paso realizado fue la toma de medidas de los miembros del equipo ASME LUZ. Posterior a la obtención de las medidas de los miembros, se hizo necesario determinar una serie de distancias correspondientes a la interfaz vehículo-piloto, por lo que, se procedió a la construcción de un banco de pruebas que permitiera tomar in situ, las medidas y ángulos necesarios para el adecuado diseño del prototipo.

El proceso de diseño del banco de pruebas tomó como guía Rincón y Rosario (2010). Se necesitaría un equipo que fuera capaz de desplazar el asiento hacia adelante y hacia atrás, ajustar la inclinación del espaldar, ajustar la altura de los pedales y ajustar la distancia del manubrio. Se determinó el rango de distancias máximas y mínimas que debía satisfacer el banco de pruebas, basados en las distancias obtenidas en el procedimiento anteriormente mencionado.

La construcción se llevó a cabo utilizando mate-

rial reciclado que fue donado por el taller de Rectificación de motores "Jaime" el cual también prestó sus instalaciones para la fabricación. El proceso de fabricación duró dos semanas y fue desarrollado en un 80% por el equipo ASME LUZ con ayuda del personal del taller.

La estructura refiere un prototipo capaz de soportar los escenarios de carga crítica, al mismo tiempo, que busca reducir su peso y facilidad de fabricación, Archibald (2006). En nuestro entorno, el factor económico adquirió un gran peso en las decisiones y la selección de elementos y materiales para el diseño y la construcción del prototipo. El estudio de estructura se dividió en tres: chasis, RPS y Fork.

Para la geometría inicial del chasis, se decidió desarrollar una optimización topológica para obtener una disposición geométrica que ofrezca la máxima rigidez en función de un escenario de carga crítica. Para poder hacer una optimización topológica, se requiere un dominio inicial, conocido como topológico. Este se definió en términos de estudios ergonómicos y maniobrabilidad, que tuvo como entrada los datos ofrecidos por las consideraciones de diseño básico. Una vez obtenidos los resultados de la optimización topológica, se realizó una interpretación estructural basada en tubos o tuberías para finalmente obtener la geometría inicial del cuadro a optimizar.

Una vez que se obtuvo la geometría inicial basada en datos ergonómicos, maniobrabilidad, rigidez máxima y una interpretación estructural de tubos, se procedió a discretizar el modelo geométrico mediante el método de elementos finitos utilizando la herramienta Ansys.

Ya ha obtenido el modelo de simulación con las variables de diseño parametrizadas, se hizo un diseño experimental para seleccionar los puntos que se simularán de modo que sirvan como entrada para la construcción del metamodelo, Friedman y Weiser (1996). Después de tener el modelo sustitutivo definido, los puntos candidatos de la optimización se calculan colocando como restricción la masa mínima como la función objetivo y la tensión de fluencia del material sobre el factor de seguridad. De manera que, las disposiciones geométricas candidatas con tubos o tuberías disponibles se evalúan mediante el modelo de simulación FEA para seleccionar la disposición geométrica óptima en función del caso crítico de las cargas máximas de aceleración.

Teniendo el prototipo de chasis optimizado basado en un escenario de carga de aceleración máxima, se procedió a analizar el RPS mediante un modelo de simulación basado en FEA. Se realizaron las modificaciones necesarias en el marco para que pudiera soportar las cargas transmitidas por el RPS.

La variable principal para el carenado aerodinámico fue la geometría; la geometría del carenado define la forma de la superficie expuesta a la fuerza del viento. El objetivo principal fue reducir la fuerza de arrastre, ya que la forma tiene que ser aerodinámica, la geometría se basó en superficies aerodinámicas comunes. Se eligió el perfil aerodinámico NACA de 4 dígitos ya que la forma de la ecuación era más fácil de modelar y se podía dar forma según la geometría necesaria. El perfil aerodinámico fue simétrico para evitar el levantamiento, como dice Çengel y Cimbala (2006) la línea de comba debe ser plana y podría descuidarse.

La familia del perfil aerodinámico se designó con un número de 4 dígitos del formulario NACA 00xx, los primeros dos dígitos indican el perfil simétrico y los segundos dos dígitos indican la relación del grosor del cable. La ecuación tiene la forma:

Donde x es la posición (en porcentaje de 0 a 1.00) a lo largo del acorde y la ordenada. Las constantes siguen un conjunto de condiciones de contorno para definir la ordenada máxima, las ordenadas en el borde posterior, la magnitud del ángulo del borde posterior y la forma de la punta.

Para el diseño de la transmisión, se tiene en cuenta la disponibilidad de piñones y casetes, por lo que se puede realizar una selección que cumpla con los objetivos del diseño. La disponibilidad de ruedas dentadas para el casete, las bielas y los piñones independientes fue la siguiente:

- Bielas: 52t y 42t.
- Piñones independientes: 19t, 21t y 28t.
- Casetes (todos Shimano): HG300 9V, HG300 9V 36T, HG41 8V y HG41 8V.

Para lograr una mejor relación de transmisión, se decidió usar una transmisión trasera con dos etapas debido a la limitada disponibilidad de material; pudiendo lograr una mejor velocidad máxima con esta configuración.

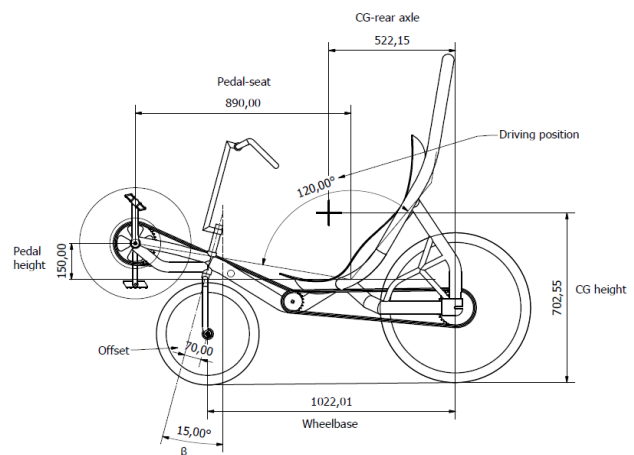
Para elegir la opción que más convenga, se realizó un análisis del modelo de potencia basado en el peso del vehículo, la resistencia a la rodadura, el arrastre y la comparación de los resultados de di-

ferentes configuraciones, utilizando la potencia de entrada de una persona promedio.

RESULTADOS

Las dimensiones generales del HPV, se tomaron de las pruebas de ergonomía en un banco de pruebas y luego se ajustaron usando el modelo de control de Patterson. Se pueden observar en la Figura 1.

Figura 1. Dimensiones generales del HPV.



Fuente: Elaboración propia (2018).

La altura del CG (aproximada ya que los cuerpos de los conductores varían) se establece en 702,531 mm y 522,152 mm adelante del eje de la rueda trasera. La distancia entre ejes se estableció en 1022,01 mm. El ángulo del tubo de dirección se ajustó a 15 grados y el desplazamiento de la rueda delantera se ajustó a 70mm.

La ubicación del CG se configuró para mejorar la maniobrabilidad. Se instalaron algunos componentes, como la altura del asiento, para mantener el CG aproximadamente igual.

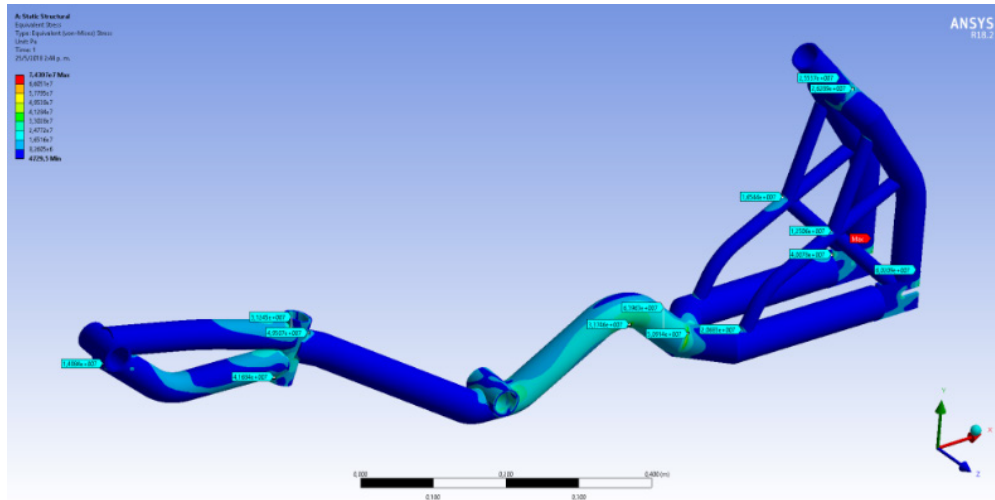
Chasis

El chasis fue desarrollado a través del uso de técnicas de optimización figura 2. Primero se usa un enfoque de optimización de topología y luego un enfoque de modelo sustituto. Las dimensiones finales para el chasis fueron 1371,13 mm de largo, 485,79 mm de alto y 208,26 mm de ancho.

El diámetro interno del tubo de dirección se estableció usando como "Headtubes" de referencia

vendidos localmente, el diámetro interior fue de 1 1/8". Los soportes traseros se diseñaron con láminas de 7 mm de espesor.

Figura 2. Esfuerzo de Von Mises equivalente del chasis obtenido de análisis por metamodelo.



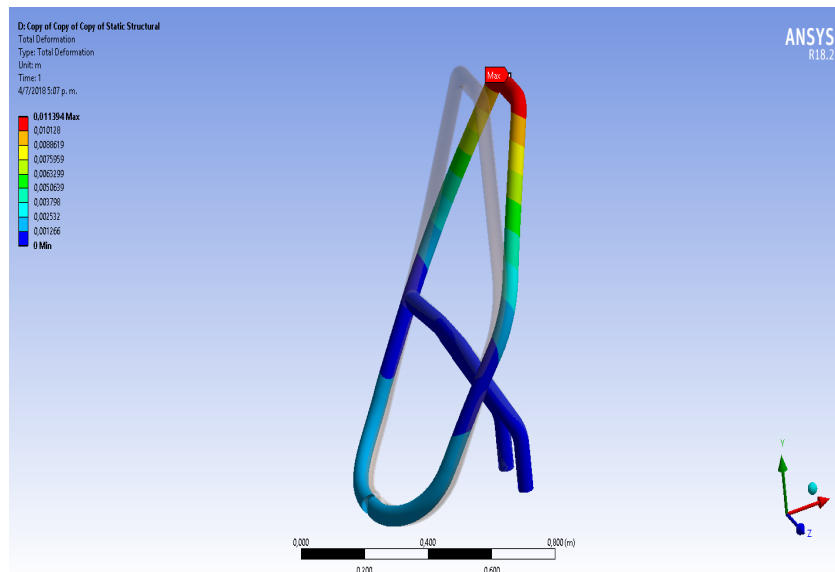
Fuente: Elaboración propia (2018)

RPS

El sistema de protección anti vuelco (RPS) figura 3, se diseñó utilizando las dimensiones extremas de los miembros del equipo, por lo que el miembro más alto y más ancho podría caber dentro. Las dimensiones totales son de 666,79 mm de ancho, 974,15 mm de alto y 488,17 de largo. El RPS está hecho de un único tubo de 1 1/2 in Sch 40 que se do-

bló alrededor de la posición del conductor y luego se dobló nuevamente para quedar detrás del asiento. Otro tubo Sch 40 de 1 1/2 in se colocó transversalmente para lograr las funciones, dar rigidez al diseño RPS y proporcionar una ruta de carga adecuada a través del resto del chasis. En la Figura 3 se puede observar la deformación total del RPS en caso crítico de carga de impacto vertical.

Figura 3. Deformación total del RPS para una carga de impacto vertical.



Fuente: Elaboración propia (2018)

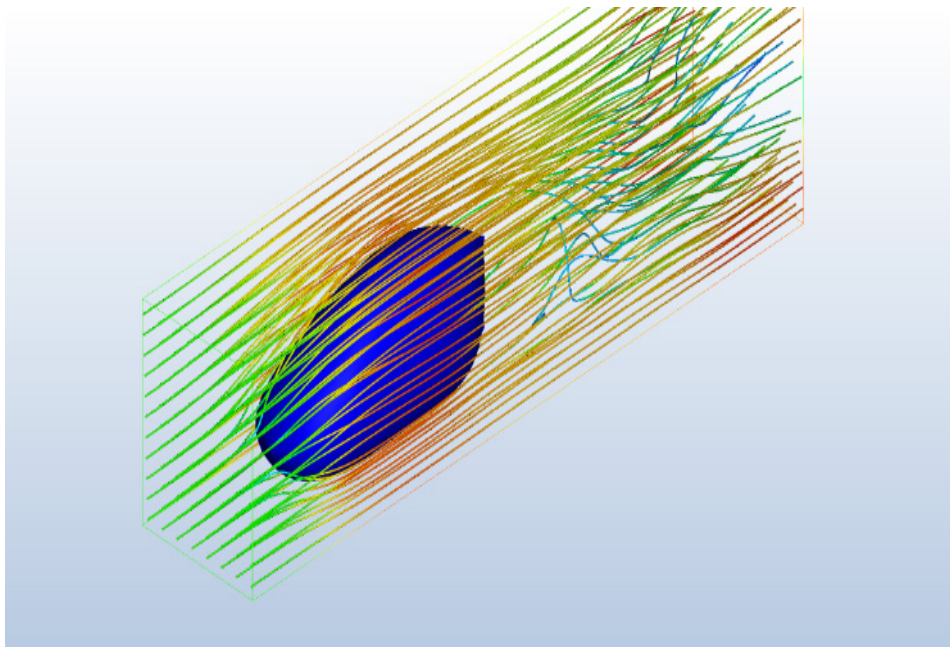
Transmisión

Para cumplir el objetivo de diseño de obtener una buena aceleración, se elige una configuración de 42-19-21. Esto significa que la transmisión tiene un plato de 42t, un piñón de entrada de 19t y un piñón de salida de 21 para la etapa intermedia. Se seleccionó un casete Shimano HG41 8V 34T. La relación de transmisión final de transmisión fue de 4,22. Se debió agregar una rueda guía para evitar que la cadena interfiera con el radio de giro de la rueda delantera.

Carenado

El diseño del carenado (Figura 4) se utilizó en función del requisito de minimizar la resistencia del aire para cumplir con la condición de la mejor aceleración y máxima velocidad. La configuración determinada para cumplir estos requisitos fue un carenado con 2400 mm de largo y 900 mm de ancho, compatible con el RPS. El material disponible fue coroplast. En la Figura 4, se puede observar el resultado de las líneas de flujo a través del carenado usando herramientas CFD.

Figura 4. Análisis por CFD del carenado.



Fuente: Elaboración propia 2018.

CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue diseñar un vehículo de propulsión humana terrestre con dimensiones geométricas y cualidades de manejo adecuado. Se llevaron a cabo herramientas de ingeniería asistida por computadora para desarrollar metamodelos y procesos de optimización de topología para lograr el objetivo. La masa total del chasis fue de 11.713 kg para el modelo físico completo. El peso final es casi el mismo que el de los modelos comercialmente disponibles como, el Barchetta Corsa A70 que pesa 11.3398kg (25lbs). Los resultados de optimización no cumplen las expectativas de un chasis de 6 kg como se tenía previsto. Se deben tener en cuenta varios factores como la disponibilidad local. Algunos tubos requeridos por

la optimización para el diseño no fueron los utilizados, eso afectó el espesor de la tubería, y por ende el peso.

El diseño de carenado ha desarrollado una geometría que llena los objetivos incluso cuando el dominio es limitado, por lo que la metodología de diseño permite adecuar la forma al requerimiento.

En comparación con las velocidades máximas y la aceleración que se puede lograr a partir de las combinaciones evaluadas, los resultados son razonables y cumplen con las expectativas establecidas para una buena aceleración y una respuesta de velocidad máxima justa. Las cualidades de manejo se lograron mediante el diseño inicial y se compararon nuevamente con el diseño final. La única modifica-

ción principal fue un cambio de CG de 152,55 mm más alto y 42,15 mm a la izquierda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASME (2018) Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos de la Universidad del Zulia.
- Archibald, Mark (2006). *Design of Human-Powered Vehicles*. Nueva York, Estados Unidos. ASME Press.
- Brown, Charles, (1986), "Pedal Height and Crosswind Effect", *Human Power. The Technical Journal of the IHPVA*. Volumen 5. Número 2. p 11.
- Çengel, Y. & Cimbala, J., (2006), *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill, Mexico. Pp 561-699.
- Friedman, Linda Weiser (1996). *The Simulation Metamodel*. Massachusetts, Estados Unidos. Kluwer Academic Publishers.
- Ortiz, Sergio (2017). Diseño del marco estructural de un trike recumbente por medio de la técnica de optimización topológica. Trabajo final de máster. Alcoy, España. Universidad Politécnica de Valencia.
- Patterson, William b. y Leone, George L. (2010), *The application of Handling Qualities to Bicycle Design*. Proceedings, Bicycle and Motorcycle Dynamics 2010. Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles. Delft, Netherland. pp 1-10.
- Rincón, Alfredo y Rosario, Rafael (2010). Rediseño del banco de pruebas biomecánicas de la Escuela de Mecánica de la Universidad del Zulia". Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela. Universidad del Zulia.
- Zwikker, Bernd, (1990), "Riding position and speed on unfaired recumbents". *Human Power. The Technical Journal of the IHPVA*. Volume 8. Number 2. pp 1-13.