

Desarrollo de un vehículo solar híbrido “XUE revolution”

Development of a hybrid solar vehicle XUE revolution

Edgar Salazar, Juan Felipe Arroyave, Bryan Guevara Rojas
Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
 edgarsalazar@utp.edu.co
 jfa@utp.edu.co

Resumen— El ahorro energético que requiere el país es el resultado de muchos eventos. Una mala administración del recurso hídrico para las hidroeléctricas y la falta de una matriz energética más diversificada para el país son algunas de las causas de un futuro racionamiento. Las energías renovables son una alternativa totalmente viable para nuestro país, tanto para satisfacer la demanda eléctrica como para convertirse en una opción interesante para un transporte verdaderamente sostenible y limpio. El transporte sigue siendo uno de las fuentes con mayor aporte de gases efecto invernadero, causa principal del calentamiento global que se ha venido manifestando progresivamente con climas más cálidos e impredecibles.

El proyecto consiste en el desarrollo de un vehículo unipersonal cuyas fuentes energéticas son compartidas entre la energía solar a través de panel fotovoltaico y propulsión humana a través de sistema de transmisión de potencia desde pedales hasta la rueda de tracción. Los complementos energéticos permiten satisfacer demandas en diversas sollicitaciones de carga (desde superficies planas hasta pendientes del 12%). El sistema fotovoltaico lo conforman un panel de 345 Wp, una batería de 20 Ah y 48 Vdc (960 Wh), un motor eléctrico de 2 kW. El vehículo alcanza una autonomía (eléctrica) de 2 horas (solo motor a 40 km/h en superficie plana). No obstante, en presencia del sol y/o con apoyo del piloto, el vehículo podrá movilizarse sin problema alguno.

En la parte mecánica se resalta el trabajo realizado para los sistemas de dirección y tracción. El diseño garantiza que los sistemas no interfirieran para su correcto desempeño. Por ello, la opción de dirección lateral permite una manipulación fácil del piloto sin interferir en el sistema de tracción. Este proyecto ha sido el resultado del trabajo interdisciplinario de estudiantes de los programas de Tecnología Mecánica, Tecnología eléctrica e Ingeniería electrónica.

Palabras clave— Transporte sostenible Energía renovable, propulsión humana.

Abstract— Energy savings that the country requires are the result of many events. Poor management of water resources for hydroelectric power generation and the lack of a more diversified energy matrix for the country are some of the causes of future electricity rationing. Renewable energy is a completely feasible

alternative for our country, not only to meet the electricity demand but also to become an interesting option for a truly sustainable and clean transportation. Transportation remains one of the greatest contributor to greenhouse gases emission, which in turn is the main cause of global warming whose consequences are more unpredictable and warmer climates.

The project involves the development of a one-person vehicle with a hybrid driving force consisting in a photovoltaic solar system and a human powered transmission system. Energy supplements can satisfy different demands of load (from flat roads to 12% slopes). The photovoltaic system is made up of a panel of 350 Wp, a battery of 20 Ah and 48 Vdc (960 Wh) and a 1200 W electric motor. The system has reported an autonomy of 2 hours (when only driven by the solar system at 40 km / h on flat roads). However, under direct sunlight and with support of the pilot, the vehicle may overcome the aforementioned constraint.

From the mechanical point of view, the steering and traction systems are worth of mentioning. The design included a lateral steering ensuring that both systems work in unison without conflicting operations. This project was the result of an interdisciplinary joint venture of students from undergraduate programs of Mechanical Technology, Electrical Technology and Electronics Engineering.

Key Word — Sustainable transportation, Renewable Energy, human propulsion.

I. INTRODUCCIÓN

Los antecedentes de este proyecto se centran en la experiencia alcanzada con el vehículo Xue (versión anterior) que compitió con éxito en la *Carrera Solar del Desierto de Atacama* en Chile (figura 1).



Figura 1. Vehículo solar Xue (1ª versión), desierto de Atacama Chile. En aquel recorrido de más de 1000 km se lograron establecer nuevos criterios de diseño para la nueva versión proyectada.

Este vehículo resaltó por su chasis completamente en aluminio, suspensión de doble horquilla adelante y McPerson atrás. Dos paneles de 345 W cada uno y motor de 2 kW, carenado en fibra de vidrio y refuerzos en carbono. En principio se contaba con regulador MPPT necesario para mantener los niveles de voltaje adecuados. Este regulador se optó por suprimirse para esta nueva versión al contar con un solo panel fotovoltaico. La tensión del sistema es de 48 Vdc que son monitoreados por parte del piloto. Este monitoreo visualiza corriente de carga y voltaje de baterías, permitiendo tener pleno control continuo de la tensión del sistema. La supresión del regulador implica eliminar componentes que reducen la eficiencia del sistema.

El Xue original, a pesar de ser construido en aluminio, pesó 130 kg por su robustez en estructura y peso de los 2 paneles. Este alto peso, cierta inestabilidad, dirección tradicional y un sistema de tracción complejo se convirtieron en criterios fundamentales de mejoramiento para la nueva versión XUE REVOLUTION.

II. DINÁMICA DEL AUTOMÓVIL

El diseño de todo vehículo implica inicialmente el análisis de tracción. Las fuerzas que se oponen a un vehículo que se mueve corresponden a Fuerza de rodadura F_r , fuerza debida al peso (componente de la pendiente) y fuerza debida a la restricción aerodinámica (figura 2). [1] [2] [3].

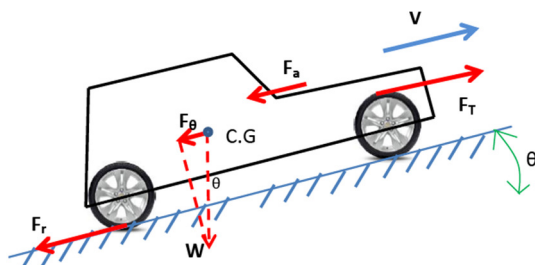


Figura 2. Fuerzas presentes en un vehículo en movimiento

Con base en la ley de Newton se puede establecer la potencia de tracción como: [4] [5] [6].

$$\dot{W} = \left(W \sin \theta + C_r W \cos \theta + \frac{1}{2} \rho S K_a V^2 + m a \right) \times V$$

(Ecuación 1)

Siendo C_r coeficiente de rodadura, ρ densidad del viento, K_a Coeficiente aerodinámico, m masa, a aceleración del vehículo y W peso. Esta expresión puede dar una idea de las demandas de potencia para un vehículo bajo ciertas condiciones de pendiente y peso. Para un peso de 120 kg (piloto incluido) en pendientes del 10,5% (6°)¹ y en terreno plano, además de valores proyectados para los parámetros de la ecuación 1 se presentan los siguientes resultados:

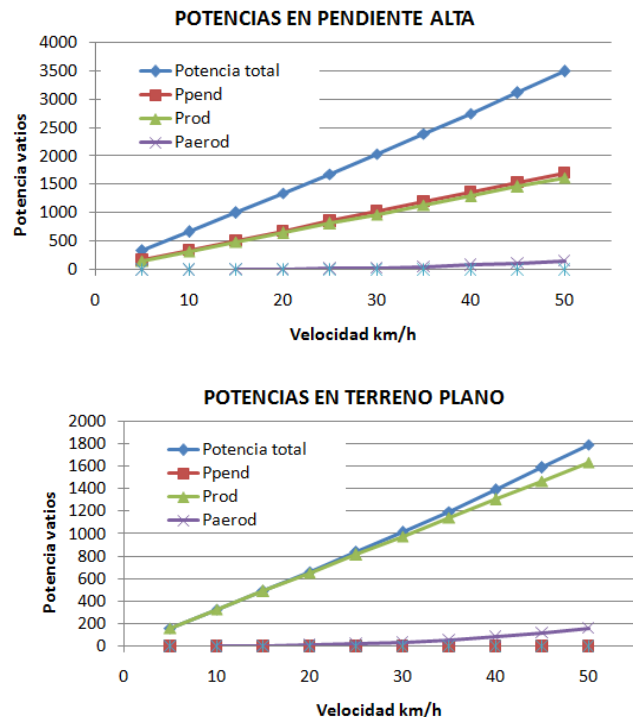


Figura 4. Potencias demandadas en pendiente del 10,5% y en terreno plano

Para el vehículo proyectado los efectos aerodinámicos son despreciables. En pendientes elevadas la potencia asciende a 2 kW para velocidades de 30 km/h, a diferencia de 1 kW para terrenos planos con la misma velocidad. En el segundo caso la componente rodadura define la mayor influencia. En ambos casos el peso termina siendo el factor preponderante para la potencia demandada, por ello reducir tal variable se convierte en prioridad de diseño.

Para el correcto acondicionamiento de un vehículo es necesario tener en cuenta algunas consideraciones en:

El sistema de propulsión de potencia:

- Los métodos de transmisión de potencia existentes que se puedan adaptar.
- La relación de transmisión requerida
- La adaptación del mecanismo al chasis

¹ La pendiente promedio en el alto de la línea. La pendiente más

elevada se encuentra en el 13%.

El sistema de dirección:

- Sistemas disponibles para la adaptación
- la geometría del sistema de dirección
- la adaptación al vehículo

III. CONFIGURACIÓN Y CHASIS

En relación a la ubicación y número de ruedas, se seleccionó la alternativa Tadpole [7]. Dos ruedas adelante y una atrás. Las ventajas: Permite alcanzar velocidades relativamente altas debido a su buena estabilidad. Se suele instalar frenos delanteros en las llantas delanteras, obteniendo un frenado preciso y la desventaja es que la distancia considerable entre pedales y llanta trasera, lo que se traduce en problemas para tensar la cadena y pérdidas de tracción.

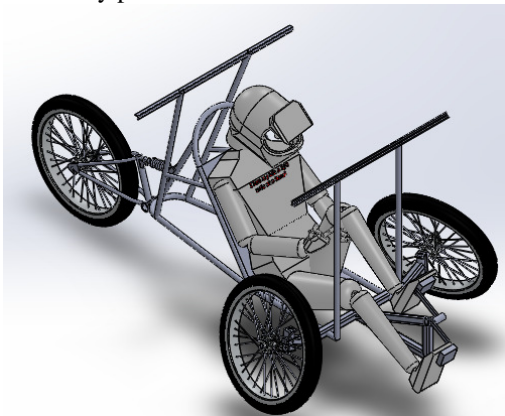


Figura 5. Modelo Tadpole XUE Revolution

El tipo de chasis consiste en un armazón tubular completo, formado por tubos de acero de sección circular de diámetro 26mm y tubería cuadrada de 32mm; soldados entre ellos. Las ventajas obtenidas al fabricar el chasis de forma tubular es que se consigue una mayor rigidez a la torsión y una mayor resistencia a cualquier tipo de esfuerzo. Su principal inconveniente es la complejidad y la larga duración en el proceso de fabricación.



Figura 6. Chasis tubular XUE Revolution

IV. SISTEMA DE DIRECCIÓN

Se seleccionó un sistema de dirección directa sobre el KINGPIN (figura 7), consiste en un mecanismo con un

accionamiento de la dirección de movimiento de lado a lado, contrario a la dirección del vehículo, para orientar la dirección hacia la derecha, se requiere mover los brazos hacia la izquierda, y viceversa.

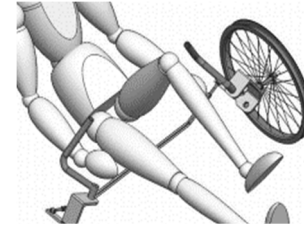


Figura 7. Sistema de dirección directa sobre el Kingpin

Se requiere de un significativo espacio entre las ruedas y el cuerpo del piloto para no limitar su rango de acción.

Para lograr que cada rueda delantera asuma la posición adecuada durante un giro al momento de tomar una curva se emplea el concepto del trapecio de dirección, comúnmente conocido como el cuadrilátero de Ackerman, el cual define la geometría justa de las ruedas delanteras y directrices que deberían adoptar durante un giro. El ángulo de orientación de los brazos de la dirección se calcula teniendo en cuenta la posición del trapecio y de la ubicación del accionamiento del mecanismo. Para el caso del XUE revolution, el diseño consideró que el trapecio estará por encima del eje, como se muestra en la Figura 8.

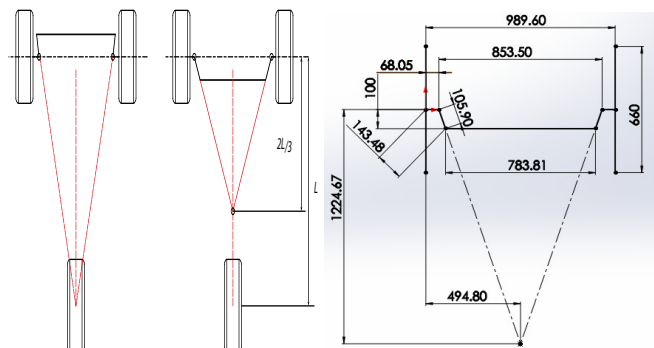


Figura 8. Trapecio de la dirección

V. SISTEMA DE TRACCIÓN

Tracción Mecánica

La tracción total del vehículo será establecida en la rueda trasera. Por lo tanto se determina el par de tracción necesario T_T para vencer las cargas con que está sometido el vehículo. Se establece la expresión para el par de tracción requerido, en función de todos los parámetros de carga involucrados con el vehículo en movimiento. Los parámetros empleados en el análisis son: masa $m=120$ kg, Constante aerodinámica $K_a = 1,05$, pendiente 10° , Sección $S: 1m^2$, Coeficiente de rodadura $C_r = 0,015$, Densidad $1,2$ Kg/m³, aceleración $0,8$ m/s².

$$T_T = \left(W \sin \theta + C_r W \cos \theta + \frac{1}{2} \rho S K_a V^2 + ma \right) R_T$$

Ecuación 2

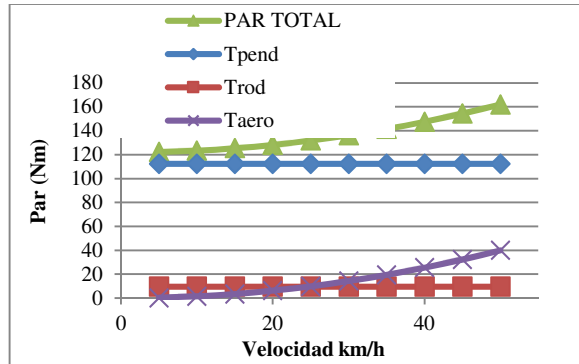


Figura 9. Par de tracción en función de la velocidad del vehículo a 10°, (a = 0)

El logro da altos pares de torsión es suplido con la tracción humana, ayudado de una relación de transmisión que lo permita. La Figura10 presenta un esquema de la relación de transmisión prevista, basada en componentes de transmisión de bicicleta (una vez los valores de par previstos no superan los valores límites de resistencia).

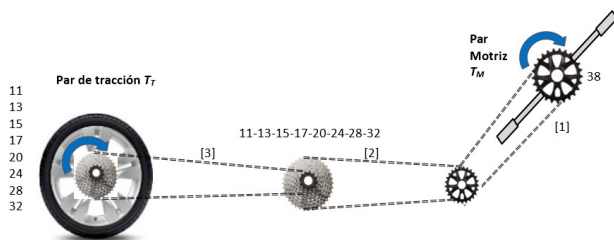


Figura 10. Sistema de Transmisión propuesto

El piloto cuenta con 384 posibles combinaciones para modificar la relación de transmisión controladas desde el tensor y descarrilador, donde la ganancia máxima G es de 4,54 calculada con la ecuación 3.

$$G = \frac{T_T}{T_M} = \frac{N_M}{N_T} = \frac{\text{Rueda conducida}}{\text{Rueda conductora}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde T_T , N_T y T_M , N_M son pares y velocidades de rotación de rueda de tracción y motriz respectivamente.

Algunos trabajos realizados [8] determinan que una persona ejerce una carga promedio sobre el pedal de una bicicleta de 300 N a una frecuencia de rotación de 1,2 vueltas por segundo. Con una biela comercial de 17 cm de largo puede lograrse un par motriz de $T_M=300 \text{ N} \times 0,17 \text{ m}=51 \text{ Nm}$. A la velocidad de rotación dada, el ocupante puede entregar una potencia de $51\text{Nm} \times 1,2 \times 2\pi = 384 \text{ vatios}$. El aporte importante por el ocupante será un par de tracción máximo de $51 \times 4,54 \text{ Nm} = 231 \text{ Nm}$.

Tracción eléctrica

Para la entrega de potencia eléctrica se empleará un motor eléctrico embebido (motor adaptado a la rueda de tracción). Se plantea la opción de motor de imanes permanentes de 1200 W

que, por costo, peso y demanda energética reúne condiciones aceptables para el vehículo. El motor proyectado requiere un voltaje de 48 Voltios y consume un máximo de 40 Amperios. Distintos fabricantes de motores carecen de información suficiente para caracterizar el motor. Se optará por fabricantes americanos quienes aportan datos de funcionamiento. El motor propuesto es de referencia Phoenix Brute 4840. Con la información del fabricante se construyeron las curvas características de la figura 11.

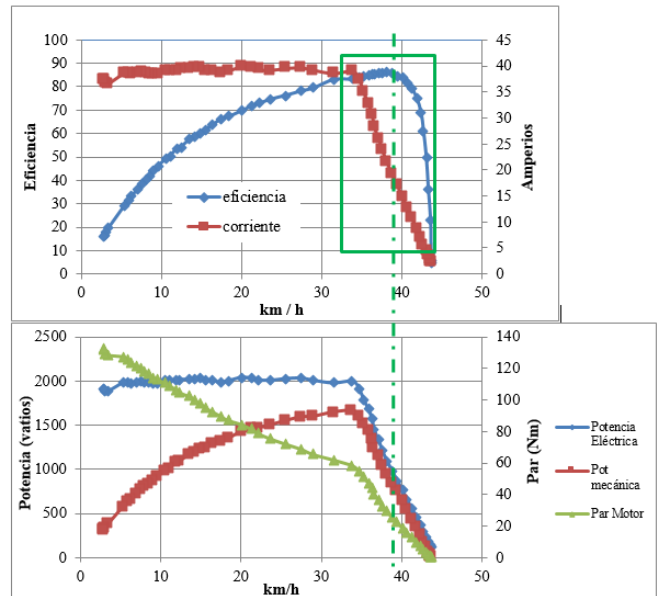


Figura 11. Curvas características del motor proyectado: eficiencia %, amperaje, potencia eléctrica (W), potencia mecánica (W), par motriz

Como se señala en la figura, el motor permite su mayor eficiencia a velocidades cercanas al 40 km/h. Los puntos de operación se definen cruzando las curvas de carga (Par de torsión) y la curva de desempeño del motor. Comparando las curvas (Figura 9) con las curvas de desempeño (Figura 11), se observa que con pendientes elevadas del 10% y aceleraciones de 0,8 m/s² el motor alcanza una velocidad apenas de 5 km/h, sin embargo con una ganancia máxima en la relación de transmisión, el piloto puede aportar 230 Nm más, posibilitando al motor trabajar con más velocidad.

Sistema eléctrico

El panel seleccionado corresponde a un monocristalino SunPower X21-345 con una potencia nominal de 345 Wp. Eficiencia de 21,5%. Tensión de máxima potencia 57,3 V. Corriente en el punto máxima potencia 6,02 A. Las baterías seleccionadas por bajo peso y confiabilidad son baterías de Litio. La capacidad estimada para satisfacer los límites de operación y estar en sintonía energética con la fuente de potencia (paneles) corresponde a dos baterías de 20 Ah y 48 V cada una. Con ello se logra una disponibilidad energética de 1920 Wh. Cada batería pesa 4,5 kg. Una tensión de 48 V corresponde a la necesaria para energizar el motor eléctrico.

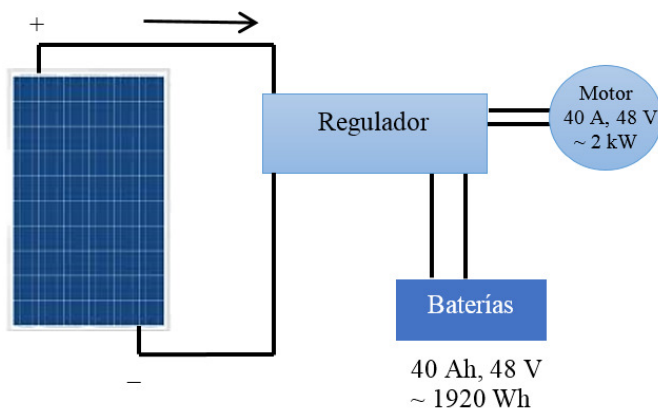


Figura 12. Sistema eléctrico

Considerando el panel del sistema trabajando en su punto de máxima potencia se generan 6,02 A. Con ello se puede suplir un nivel de potencia de 288 Vatios sin demandar de la carga en baterías. Ahora si suponemos una demanda directa de baterías sin contar el panel (en la noche por ejemplo), podrían suplir potencias de 1536W durante 1 hora, considerando profundidades de descarga permisibles hasta el 80%. Esto, compromete la participación de la propulsión humana para altas potencias (entregada en forma de alto par y baja velocidad).

Ahora en términos energéticos para determinar el tiempo de carga de baterías (sin demanda eléctrica del motor), se plantea el siguiente análisis:

En Colombia, se presentan niveles de radiación que oscilan entre 3 y 5 kWh/m² promedio diario anual. La ubicación cercana al Ecuador permite variaciones mínimas a lo largo del año de esta radiación. 4 kWh/m² es un buen promedio (Pereira por ejemplo tiene un valor de 4,3 kWh/m²). Con este valor se puede estimar la capacidad de almacenamiento de las baterías. El valor de radiación promedio representa un valor de 4,3 HPS (Horas pico solares). Así, con los valores de corriente generados por los paneles se tiene un valor energético diario de 6,02 A x 4,3 h = 25,88 Ah. Este valor supera la capacidad máxima en baterías, haciendo que el regulador mantenga los niveles adecuados en tensión. Es posible que el vehículo circule con radiaciones bajas o nulas (en la noche) exigiendo del piloto un monitoreo continuo de la carga remanente en baterías para suplir las altas demandas de potencia (representadas en alto pares de torsión) con pedales.

El motor eléctrico está dotado de un controlador de carga, con perilla de aceleración en dirección y visualizador. Esto permite que el piloto observe los niveles de Tensión de las baterías, además del consumo en Amperios instantáneo al momento de acelerar, procurando mantener los niveles de amperaje (de forma continua) cercanos al nivel de generación de paneles en su punto de máxima potencia (6,02 A); así logrará mantener los niveles de carga en baterías aproximadamente constantes. De hecho, este valor coincide con el punto de máxima eficiencia del motor (figura 11). alcanzado a una velocidad de 38 km/h. No obstante, las demandas pueden ser superiores pero no continuas, para permitir en otros tramos del recorrido la recuperación.

VI. CONCLUSIONES

- Se concibió un vehículo híbrido que puede satisfacer las demandas de potencia de las vías pereiranas y ser un referente de movilidad sostenible para el país.
- La variable peso del vehículo se convierte en prioridad como criterio de diseño en la búsqueda de mayores eficiencias (mejores prestaciones de velocidad y par motriz y menores demandas de potencia).
- Aunque cuenta con buenas prestaciones, el vehículo puede mejorar algunos aspectos como el ensamble de celdas fotovoltaicas que permita reducir peso al prescindir de la estructura del panel tradicional.
- Este vehículo se convierte en referente tecnológico que eslabona una cadena de conocimientos para estudiantes e investigadores de diversas áreas de la universidad.
- El vehículo alcanzó en las pruebas de desempeño velocidades promedio de 40 km/h en superficie con pendientes inferior al 1%

REFERENCIAS

- [1]. Gillespie, Thomas D. 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc.
- [2]. Jazar, Reza N. 2008. Vehicle Dynamics, Theory and Application. Dept. of Mechanical Engineering. Springer.
- [3]. Wong, J. Y. 2001. Theory of Ground Vehicles. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, Canada. Third Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- [4]. [Romero, C. 1995. Dinámica de Tracción del Automóvil. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología.
- [5]. Calle, G. 2012. Aportación y Apropiación de Metodologías de desarrollo de Vehículos para Recreación tipo Buggy. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- [6]. María Alejandra Pulgarín Arias, Juan David Zabala Guisado, TESIS, 2013. Diseño, construcción y pruebas de un vehículo prototipo. SUPERMILEAGE. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- [7]. Thomas Henry. 2007. Tadpole or Delta. Jetrike an Open desing. <http://www.jetrike.com/tadpole-or-delta.html>
- [8]. Osorio, J.S, Gómez C. S, Restrepo, S. 2007. Diseño y construcción de un pedal de bicicleta basado en sensores piezorresistivos para determinar la fuerza resultante. Revista Ingeniería Biomédica. No 2, págs. 55-60.