

Diseño y Desarrollo de un Vehículo de Tres Ruedas con Asistencia Eléctrica al Pedaleo

E. Cañibano Álvarez^{1,2}, J. Sanz López¹, J. Romo García¹, M. I. González Hernández¹, J. Gutiérrez Díez¹, J. C. Merino Senovilla^{1,3}

(1) Fundación CIDAUT, Parque Tecnológico de Boecillo P209, 47151 Boecillo, España
estcan@cidaut.es

(2) Dpto. Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad de Valladolid - Escuela de Ingenierías Industriales, C/ Francisco Mendizábal, 1. 47014 Valladolid. España

(3) Dpto. de Física de la Materia Condensada. Universidad de Valladolid - Escuela de Ingenierías Industriales, Paseo del Cauce S/N. 47011 Valladolid. España

La Fundación CIDAUT, dentro de sus líneas fundamentales de trabajo, promueve la movilidad sostenible. En este marco, se ha desarrollado y construido un nuevo concepto de vehículo de tres ruedas. Éstos se están convirtiendo en un medio de transporte cada vez más atractivo, no solo para uso lúdico sino también como un transporte ágil y ligero. Esto último se ve potenciado si se complementa al vehículo con un sistema de tracción de pedaleo asistido. Se espera que este nuevo vehículo tenga una alta aceptación, debido a sus novedosas ideas, facilidad de uso (diseñado para una amplia variedad de usuarios) y sus características técnicas incluyendo un precio atractivo.

El vehículo dispone de dos modos diferentes de conducción: Modo Sport, que tiene la posibilidad de inclinar el chasis, principalmente destinado para usuarios que aman las bicicletas y las sensaciones que éstas les transmiten, y un modo Confort en el que se bloquea la inclinación, llamado así porque está especialmente diseñado para personas que necesitan de una mayor estabilidad que la que les proporciona la bicicleta. Este último modo tiene la ventaja de mantener el vehículo cuando se encuentra estacionado o en un Stop, sin que el usuario tenga que poner un pie en el suelo. Ambos modos de conducción son seleccionables por el usuario mediante un actuador durante la marcha del vehículo.

A lo largo del artículo se describe el proceso de diseño del vehículo utilizando herramientas computacionales. Primeramente, el análisis cinemático se ha realizado con un estudio de experimentos (Catia V5) y el análisis dinámico mediante software de multicuerpos (MSC.Adams/ View R3). También se ha llevado a cabo una definición de la ergonomía del vehículo para usuario. Con estos datos se ha fabricado un prototipo con el que se han llevado a cabo ensayos y pruebas con diversos percentiles de personas, que han permitido validar los resultados virtuales. También se ha realizado la monitorización del vehículo durante un uso cotidiano, registrando su trayectoria y velocidad, con el fin de poder conocer la autonomía del vehículo.

1. INTRODUCCIÓN

Con el diseño de este vehículo se busca cumplir una serie de objetivos para satisfacer unas determinadas necesidades del usuario. Estos objetivos pasan por diseñar y desarrollar un vehículo a pedales, que proporcione gran movilidad urbana, deberá ser seguro y estable para el usuario y aportarle una gran confortabilidad. Además debe tratarse de un vehículo muy versátil para diferentes aplicaciones y todo ello con un precio que le resulte atractivo al usuario.

Para conseguir estos objetivos se ha trabajado en la unión de dos conceptos, que son el triciclo a pedales y el sistema de asistencia eléctrica al pedaleo (Conforme a la normativa [1]). Se busca, por tanto, un vehículo real para cubrir una necesidad común y que aporte un gran valor añadido para el usuario mediante diferentes configuraciones para aplicaciones que realice en su vida cotidiana. Para completar el diseño de este vehículo, se ha seguido una metodología de trabajo lógica (Figura. 1). Se ha comenzado por realizar un estudio del

estado de la técnica en la que se ha buscado información acerca de los vehículos disponibles de transporte personal que son similares al que se ha diseñado, realizando, por tanto, un estudio de mercado y benchmarking. También es un aspecto vital el estudio de la normativa de aplicación para estos vehículos, con el fin de poder comercializar el diseño final y que no quede en un mero vehículo de concepto. Una vez que ya se conocían los límites y condiciones para el diseño, se realiza un análisis cinemático que se encuentra centrado en el estudio de la geometría del vehículo y del trazado de curvas que éste puede realizar.

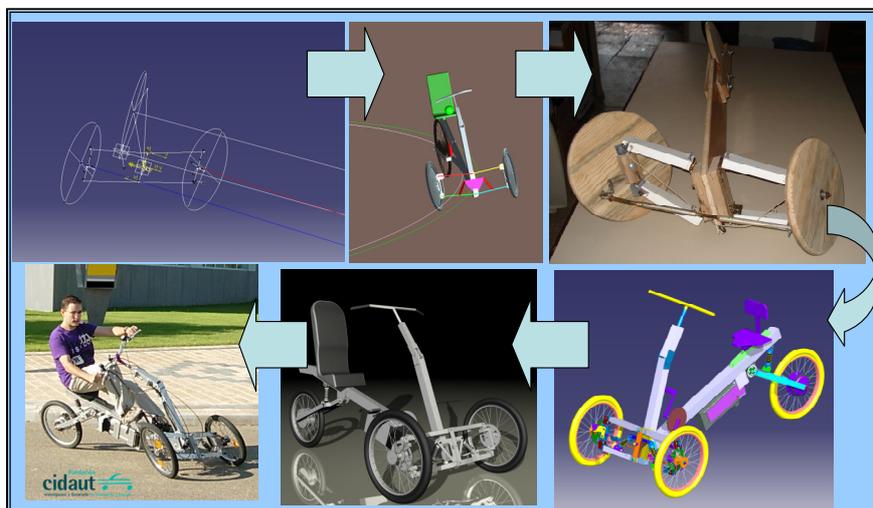


Figura 1. Metodología de diseño empleada

También se ha realizado un análisis dinámico para garantizar que el vehículo sea suficientemente estable para generar autoconfianza y seguridad en el conductor en su uso. El siguiente paso ha sido el dimensionamiento del sistema de tracción con la consiguiente adaptación a futuras normativas que aparecerán a corto plazo.

Finalmente, con el objetivo de validar y comprobar los modelos virtuales que se han utilizado en los estudios cinemáticos y dinámicos, se ha fabricado un prototipo que servirá de demostrador tanto la validación de las simulaciones, como para conocer las sensaciones que produce la conducción al usuario al conducir este ciclo de tres ruedas. Este aspecto se considera trascendental debido a la dificultad de extraer conclusiones subjetivas del conductor a partir de la evolución de las variables dinámicas de interés en distintas maniobras.

2. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO

Este vehículo es un triciclo con una configuración (2+1), es decir, dos ruedas en el eje delantero y una en el trasero. Las ruedas delanteras son las directrices y la trasera la motriz, en cuyo eje va implementado el motor que proporciona la asistencia al pedaleo.

Se tomó la decisión de elegir una configuración (2+1), ya que es la proporciona más estabilidad al vehículo en situaciones de riesgo como una frenada [2]. El tren delantero del vehículo está compuesto por diferentes elementos rígidos unidos por pares cinemáticos, los cuales definen la suspensión delantera. Esta suspensión es independiente para cada rueda ya que proporciona mayor estabilidad y confort al usuario, además, la suspensión, tiene la misión de bloquear o proporcionar la inclinación en el chasis del vehículo a voluntad del usuario, diferenciando de esta forma dos modos diferentes de conducción, el Confort (Inclinación bloqueada) y el Modo Sport (Inclinación Libre).

El vehículo tiene una anchura de 750(mm), esta es el resultado de una optimización en la que se ha tenido en cuenta diferentes parámetros como la estabilidad, los huecos de las zonas de paso por donde circulará el vehículo y el sistema de dirección, siendo esta anchura la que mejor conjugaba con todas ellas.

3. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN

El sistema de dirección es el encargado de proporcionar un ángulo de giro determinado a cada uno de las ruedas directrices cuando el vehículo debe describir una curva. El comportamiento ideal se consigue cuando la intersección de las prolongaciones de los ejes perpendiculares a las ruedas por sus centros coincide con el centro de giro del vehículo definido por la rueda virtual (simplificación del modelo de bicicleta) (Figura 4). Para conseguir este propósito, se ha implementado en el vehículo mediante un mecanismo conocido como trapecio de Ackermann (Figura 5). Este mecanismo tiene que conseguir que se cumpla una relación entre los ángulos de giro de las dos ruedas, que se denomina regla de las cotangentes [3] y tiene como ecuación definitoria:

$$\text{Cotg}(\partial_{ext}) - \text{Cotg}(\partial_{int}) = \frac{j}{L} \tag{1}$$

Donde ∂_{ext} es el ángulo girado por la rueda exterior; ∂_{int} el ángulo girado por la rueda interior; j es el ancho de vía y L es la batalla del vehículo.

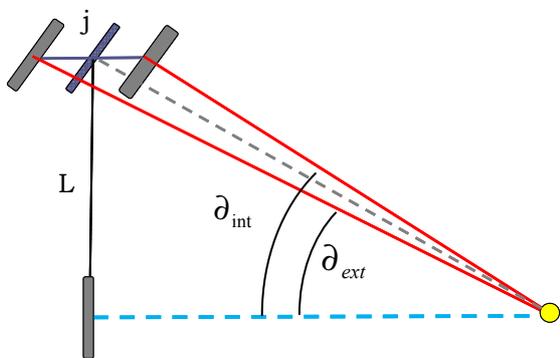


Figura 2: Centro de giro del vehículo

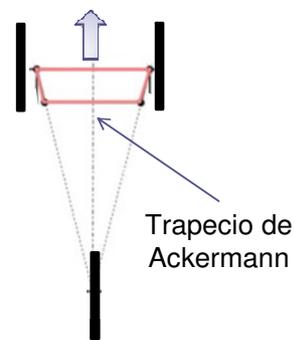


Figura 3: Trapecio de Ackermann

La geometría de este mecanismo se ha optimizado mediante la ecuación de Freudestein, con tres puntos de precisión [4] (Fig. 6). Para ello se ha requerido la realización de varias iteraciones de diseño.

$$K_1 \cdot \text{Cos} \psi - K_2 \cdot \text{Cos} \varphi + K_3 = \text{Cos}(\psi - \varphi) \tag{2}$$

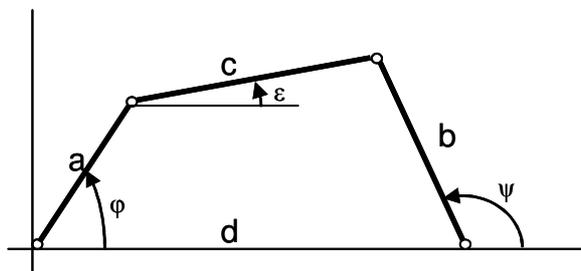


Figura 4: Parámetros del trapecio para la optimización de la geometría

4. ANÁLISIS DINÁMICO DEL VEHÍCULO

Este análisis dinámico tiene por objeto comprobar que el vehículo es estable y conocer su comportamiento en circulación para ciertas maniobras estándar. También nos ha servido para determinar el carácter subvirador o sobrevirador del vehículo. Para realizar este análisis dinámico se ha utilizado el software MSC.ADAMS/View R3. En éste se implementa un modelo virtual del vehículo basado en multicuerpos con el que se consigue reproducir todos los componentes así como las uniones entre los mismos.

Para determinar las prestaciones dinámicas del vehículo, se han simulado diferentes pruebas de conducción, tales como slalom (señal del ángulo de dirección siguiendo una señal senoidal) o el seguimiento de una trayectoria de radio constante. En todas ellas se ha comprobado que las reacciones verticales de los neumáticos con el suelo, no fueran nulas, ya que esto significaría la pérdida de contacto de la rueda con el suelo. Además también se ha comprobado que no se produzcan grandes deslizamientos de las ruedas con respecto al suelo. Todo ello sirve para validar las simulaciones y dar los resultados como aceptables.

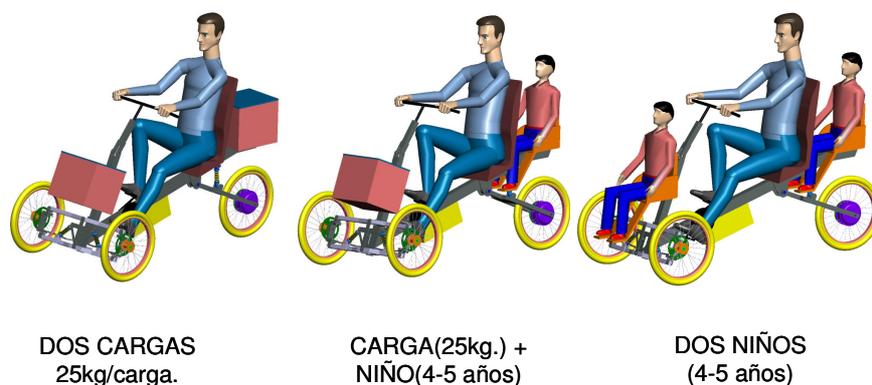


Figura 5: Versatilidad en la capacidad de carga del triciclo

A través de este software se ha simulado un ensayo para conocer el carácter del comportamiento del vehículo, es decir, conocer en que momento este se comportaba como subvirador y en cual cómo sobrevirador. Después de realizar el ensayo para los diferentes modos de conducción (Confort y Sport), y con las diferentes configuraciones de carga (Figura 7), se ha podido determinar que el vehículo es claramente subvirador en el modo Confort y sobrevirador para el caso del modo Sport. En ambos casos las diferentes configuraciones de carga hacen que aumente o disminuya el carácter del vehículo, pero en ningún caso cambia de sentido.

5. ESTUDIO ERGONÓMICO.

Uno de los objetivos esenciales del diseño de este vehículo es el de hacer que el usuario se encuentre más cómodo que en una bicicleta tradicional, por ello es necesario hacer un estudio previo para determinar cual es la posición que le va a resultar más idónea. En el caso de este nuevo vehículo, no se puede basar el estudio ergonómico en los estudios existentes y ya experimentados que existen para el ciclismo ya que se buscan diferentes objetivos. Por ello nos basaremos en estudios sobre actividades físicas para personas de la tercera edad. En ellos, se aconseja que determinados ángulos de las extremidades como las rodillas y la pierna con el tronco del cuerpo (ángulo de cadera), no superen unos determinados umbrales. Estos ángulos dependen directamente de la posición de los puntos de apoyo del usuario que tiene el usuario en el vehículo. Estos puntos de apoyo los definimos y consideramos como tres, el manillar, el pedalier y el asiento, como se ve en la siguiente imagen (Figura. 9);



Figura 6: Principales puntos de apoyo en una bicicleta

Puesto que nuestro vehículo dispone de un sistema de asistencia al pedaleo, en la definición de la postura de pedaleo no va a tener como objetivo el desarrollar la máxima fuerza posible aprovechándose de la gravedad como se hace en las bicicletas, sino el que el usuario no fuerce de manera excesiva sus extremidades. Por ello se ha optimizado la posición de los puntos de apoyo, teniendo en cuenta los ángulos barridos por las articulaciones. Puesto que el público al que va dirigido es muy diverso en el que hay una gran dispersión de estaturas, el vehículo dispone de regulaciones para adaptarse a la estatura del máximo número de personas.

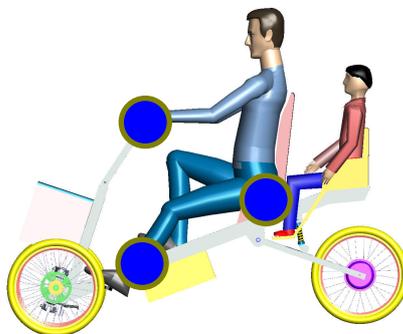


Figura 7: Postura semi-reclinada

Puesto que la comodidad es muy subjetiva a cada usuario, el estudio está supeditado a la realización de pruebas con usuarios que validen las decisiones tomadas para su diseño son correctas. Para ello se ha fabricado un prototipo demostrador (Figura 11), con el objetivo de realizar pruebas de campo. Este prototipo permite una variación tanto de la posición del asiento como del manillar, pudiendo pasar de una configuración similar a la de una bicicleta tradicional, hasta la de una bicicleta reclinada, barriendo todas las posiciones intermedias. Un punto importante que también ha sido necesario tener en cuenta, es la longitud de las bielas, pudiendo ser estas intercambiables por unas de diferente longitud, ya que de estas depende directamente el ángulo de las rodillas.



Figura 8: Prototipo para posiciones variables

Con este prototipo ha sido posible realizar pruebas con personas de diferente peso edad y estatura. Es estas pruebas entre otras cosas se registraba la configuración en la que el usuario se sentía más cómodo.

Como conclusión se observó que las hipótesis tomadas en el estudio de ergonomía son las adecuadas, ya que así lo avala la mayor parte de las personas encuestadas. Además de estas pruebas se desprendió un dato que no se había tenido en cuenta, y es la comodidad de acceso al vehículo, es decir, de forma general, los usuarios prefieren que al colocarse en el asiento, tengan que sentarse y no elevarse como ocurre en las bicicletas, en las que para colocarse en el asiento hay que poner un pié en uno de los pedales. Lo mismo ocurre cuando se quieren apearse del vehículo, valoran mucho el poder incorporarse como si de una silla se tratase. Con estos datos, se ha diseñado de forma definitiva la posición ergonómica del usuario en el vehículo final.

6. DEMOSTRADOR EXPERIMENTAL.

La última fase de la metodología de diseño presentada, conlleva la realización física de un modelo real del vehículo. Éste servirá para la validación de los modelos numéricos tanto de los mecanismos diseñados como de las simulaciones dinámicas, donde los neumáticos juegan un papel fundamental. A su vez, permiten evaluar las sensaciones que produce su conducción que también pueden ser esenciales en la estrategia de comercialización. Finalmente, valdrán como banco de ensayos para su puesta a punto, así como para la realización de pruebas con diferentes motores y baterías.

En este prototipo demostrador final, se ha fabricado con las dimensiones y datos extraídos de las pruebas y ensayos anteriores. Incluido el sistema de asistencia al pedaleo compuesto por un motor tipo brushless de 36V y 250W, que se encuentra instalado en el eje de la rueda trasera, este motor se alimenta de una batería de 36V y 10Ah, junto con estos dos componentes, tenemos el controlador y el resto de sensores que componen el KIT de asistencia al pedaleo.

Este sistema de asistencia, sólo entra en funcionamiento cuando el usuario se encuentra pedaleando y se desactiva automáticamente, en los siguientes casos:

- Cuando el usuario deja de pedalear,
- Cuando el Vehículo supera la velocidad 25Km/h,
- En el instante en el que el usuario utiliza los frenos del vehículo.

La asistencia del motor se produce, de la forma que se muestra en la siguiente gráfica, en la que se puede ver la fuerza total necesaria (Línea naranja) que el usuario debería realizar sobre el pedalier, si el vehículo no tuviera asistencia, y en las líneas que se encuentran por debajo representan la asistencia que proporciona el motor, en cada uno de los niveles de asistencia que el vehículo dispone, ayudas al 80,60y 40%. En esta gráfica también se puede observar que cuando el vehículo supera los 25Km/h, la asistencia se desconecta y no presta ayuda al usuario.

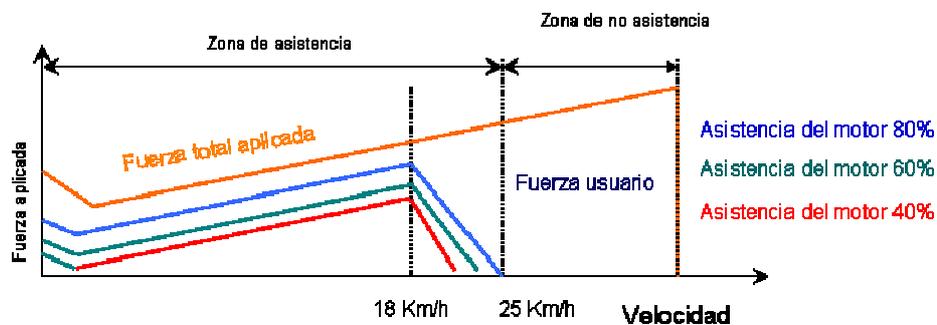


Figura 9: Niveles de asistencia prestada

Con este prototipo fabricado mediante perfiles normalizados de aluminio extruido y tornillería comercial, se han realizado diferentes pruebas con objeto de conocer las sensaciones que experimentan los usuarios al utilizar este vehículo.



Figura 10: Demostrador fabricados

7. ENSAYO DE AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO.

Cómo se ha explicado en el apartado anterior, el vehículo está dotado con un motor eléctrico de 250W y una batería de 36 V y 10 Ah. Estos junto con el controlador y sensores, son los componentes de asistencia al pedaleo, que prestan al usuario una asistencia en tres niveles diferentes de ayuda según este seleccione. Este sistema entra en funcionamiento cuando el usuario lo conecte y presta asistencia, hasta que el vehículo alcance 25 Km/h, el usuario deje de pedalear o accione el freno, en ese momento el sistema desactivará la asistencia.

Con el objetivo de conocer el la autonomía real que tenía el vehículo con la batería instalada, se realizó una prueba de campo. Esta consistía en utilizando una batería con una carga completa y circular con el vehículo únicamente con la tracción eléctrica, a lo largo del Parque Tecnológico de Boecillo, registrando a través de un GPS la posición y velocidad del vehículo.



Figura 11: Registro del camino y resultados obtenidos

Se eligió el Parque Tecnológico como emplazamiento para realizar la prueba por motivos de seguridad, ya que la densidad de tráfico es reducida y además es una zona con pequeños desniveles. El registro de la trayectoria, cómo se ve en la imagen anterior. La prueba se realizó hasta que la batería se agotó, obteniendo los siguientes resultados.

Distancia Total Recorrida	37 Km.
Tiempo en movimiento	1h 59 min.
Velocidad media	18km/h

Tabla1: Resultados del ensayo de autonomía

8. COCLUSIONES.

A lo largo de este trabajo se deja la constancia de que todavía queda mucho por desarrollar y mejorar el transporte unipersonal y sostenible, en este trabajo se ha desarrollado un vehículo con conceptos ya existentes, pero sobre los que se han realizado mejoras, como la posibilidad de permitir al usuario inclinar el chasis en una curva para mejorar la estabilidad, dotar al vehículo de un sistema de asistencia al pedaleo que consigue reducir el esfuerzo para mover el vehículo. Esta asistencia al pedaleo proporciona ayuda al usuario durante más de 40Km con el máximo nivel de asistencia.

Uno de los puntos principales que se pueden añadir es el estudio de la ergonomía, ya que gracias a ello se ha podido modificar las posiciones relativas entre el asiento y el manillar y de esta forma mejorar la comodidad del usuario, a diferencia de lo que ya existe cuyo diseño se hace partiendo de una bicicleta convencional. Con estas mejoras se ha conseguido un vehículo ideal para un determinado público al que va orientado. Lo cual se ha validado realizando encuestas con más de 45 usuarios registrando sus opiniones y sugerencias.

Con este desarrollo se ha conseguido un vehículo que cumple con los objetivos de diseño proporcionando una movilidad al usuario de una forma sostenible y que además no contamina ni por gases ni por ruido en las zonas por las que circula.

9. REFERENCIAS

- [1] AENOR, "UNE-EN 15194: Ciclos, Ciclos con asistencia eléctrica, Bicicletas EPAC", Aenor, 2009.
- [2] Fenner P., "On the Golden Rule of Trike Design" Design Engineer, Deferred Procrastination Octubre 2010.
- [3] Gillespie, T. D., "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, 1992.
- [4] Nieto, J., "Síntesis de mecanismos", AC, Madrid, 1978.
- [5] Sponziello, A. "Stability Analysis of a three-Wheeled Motorcycle". SAE Japan 2008.
- [6] Fenner, P " On the Golden Rule of Trike Design". DesirDeferred Procrastination. Octubre 2010.
- [7] Kidane, S. "Development and Experimental Evaluation of a Tilt Stability Control System for Narrow Commuter Vehicles". IEEE Transactions on control systems technology. Diciembre 2010.