

Desarrollo del vehículo eléctrico tipo transportador personal

Development of the electric vehicle type
personal transporter

Víctor Velasco-Ulco

Ingeniero Automotriz, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
Profesor asistente, Instituto Superior Tecnológico ISMAC. Quito,
Ecuador. Correo electrónico: vvelasco@tecnologicoismac.edu.ec.
<https://orcid.org/0000-0001-5094-6775>

Alexandra Chuquitarco-Aguayo

Ingeniero Electrónica, Departamento de Investigación,
Departamento de Eléctrica y Electrónica ESPE, Universidad de las
Fuerzas alexandrachuquitarco@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2279-509X>

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño

PhD. Ciencias Técnicas, Universidad Internacional SEK, Facultad de
Arquitectura e Ingenierías, Docente, Investigador, Correo
electrónico: antonio.llanes@uisek.edu.ec.
<https://orcid.org/0000-0001-6739-7662>

Juan Carlos Rocha-Hoyos

Magister en Sistemas Automotrices, Universidad Internacional SEK,
Facultad de Arquitectura e Ingenierías, Docente, Investigador,
Correo electrónico: carlos.rocha@uisek.edu.ec.
<https://orcid.org/0000-0002-6700-5231>

PERSPECTIVAS
Vol 1 - No. 14
Abri – junio 2019
ISSN 2145-6321
e-ISSN 2619-1687



Artículo recibido 2018 – 06 - 25
Artículo aceptado 2018 – 12 - 05

RESUMEN

El artículo presenta la construcción de un vehículo eléctrico tipo Segway de dos ruedas, a partir del diseño de cada una de sus partes y la aplicación de la ingeniería inversa, para su desarrollo en Ecuador. La selección de sensores, controladores y actuadores se realiza a partir de referencias utilizadas en otras investigaciones. La formulación de Lagrange-Euler se usa para el modelo dinámico del sistema; en la selección y dimensionamiento de los motores se tienen en cuenta las relaciones de potencia y torque-velocidad para superar la resistencia en un plano inclinado. Para la evaluación del prototipo se realizaron pruebas en situaciones de pendiente, actuando de manera estable con velocidades superior a 4 km/h e inferior a 20 km/h. La autonomía del vehículo es de aproximadamente de 4 horas para un recorrido de 40 kilómetros y la descarga de las baterías entre 25.2 y 20 voltios. El diseño del vehículo cumple con los requerimientos exigidos para este tipo de transporte personal.

Palabras Clave: Vehículo Segway, péndulo invertido, baterías, estabilización, control electrónico, modelo no lineal.

ABSTRACT

The article presents the construction of a Segway two-wheeled electric vehicle, starting on the design of each of its parts and the application of reverse engineering, for its development in Ecuador. The selection of sensors, controller and actuators is made from references used in other investigations. The formulation of Lagrange-Euler is used for the dynamic model of the system; in the selection and dimensioning of the motors the power and torque-speed ratios are taken into account to overcome the resistance in an inclined plane. For the evaluation of the prototype tests were performed in slope situations, acting in a stable manner with speeds higher than 4 km/h and lower than 20 km/h. The autonomy of the vehicle is approximately 4 hours for a route of 40 kilometers and the discharge of the batteries between 25.2 and 20 volts. The design of the vehicle meets the requirements for this type of personal transport.

key words: Segway vehicle, inverted pendulum, batteries, stabilization, electronic control, non-linear model.

Introducción

La existencia de un vehículo eléctrico Segway, facilita el transporte de distancias cortas de individuos (Kim y Kwon, 2015), adaptándose a situaciones cotidianas del medio, logrando que la velocidad se adecue con fluidez total de tráfico y simplicidad de uso mientras que la autonomía es más que suficiente para el trayecto urbano medio (Castro et al., 2013).

El vehículo eléctrico permite estar preparado idealmente para viajes de turismo, seguridad pública, transporte empresarial y en campus universitarios, además, para reparto de correo, paquetes y productos, permitiendo a las personas usar mejor su tiempo, interacciones dentro de su comunidad que contribuye a eliminar la congestión del tráfico y la contaminación atmosférica (Stilman et al., 2010).

La parte operativa de un sistema dinámico controlado incluye: estructura, sensores y actuadores; que están dispuestos en una máquina de manera adecuada para dar soporte a estos y asegurar el perfecto funcionamiento de todo el conjunto (Castro y Delgado, 2011). Su método de propulsión es un tipo de péndulo invertido con ruedas, que puede ser equilibrado por la fuerza motriz de cada una de las dos ruedas para estabilizar todo el sistema incluyendo el conductor (Ba et al., 2016; Babazadeh et al., 2016; Castro y Delgado, 2011).

Las fuentes de energía de Segway son baterías recargables, que pueden cargarse en un tomacorriente de corriente alterna (CA) normales con cargadores especiales. Los motores de corriente continua (CC) se utilizan debido a sus capacidades de potencia torque y pueden ser alimentados con baterías. Ambas ruedas y motores están ubicados a cada lado de la plataforma (Rocha-Hoyos et al., 2017). Normalmente, cuando el conductor está en la plataforma y maneja el manillar, si el sistema de control y los sensores funcionan, Segway mantiene su equilibrio. El conductor puede moverse hacia la dirección deseada, hacia atrás o

hacia adelante, cambiando el ángulo del manillar (Babazadeh et al., 2016; Siregar y Martynenko, 2012).

Debido a su inestabilidad, no linealidades y dinámica compleja, controlar el sistema es un problema difícil (Jamin y Ghani, 2016). A pesar de esto se han creado numerosos péndulos invertidos de dos ruedas (Ba et al., 2016). Una versión comercial de este tipo, es el Segway i2 transportador personal, el que funciona cuando el operador se inclina hacia adelante, inclinándose la plataforma base, los giroscopios de la máquina detectan el ángulo distinto de cero y las ruedas giran al unísono para proporcionar movimiento hacia adelante que intenta conducir la plataforma de vuelta a una condición de ángulo cero, logrando el equilibrio medio (Castro et al., 2013).

Esto surge para promover el uso del vehículo eléctrico Segway, es su elevado precio y las limitaciones a las que está sujeto tanto en su sistema como en los espacios destinado para la movilidad de los mismos, ya que en el mercado ecuatoriano no existe estos vehículos comerciales, lográndose con este trabajo la argumentación para el desarrollo de esta tecnología y la mejora de la movilidad de las personas (Quaglia et al., 2017).

2. Materiales y métodos

Para la implementación del vehículo se requiere estimar ciertas variables físicas del sistema y de esta forma definir los parámetros constructivos y de diseño como: posibles materiales, energía necesaria, tipos de sensores, entre otros (Moreno y Duarte, 2009). Los elementos que corresponden al sistema de control como: sensores, controlador y actuadores, se seleccionaron a partir de tablas características relevantes de las diferentes opciones, resaltándose las ventajas y desventajas de porque se utilizaron los elementos que hacen parte del vehículo en consideración a lo referido por Castro y Delgado (Castro y Delgado, 2011).

El péndulo invertido consiste en un problema dinámico en donde una barra vertical se coloca sobre el centro de una

base móvil que puede moverse hacia delante y hacia atrás. De esta manera, las perturbaciones que precipiten a la barra son compensadas con el movimiento de la base para así restablecer su centro de gravedad y llevarla a una posición de equilibrio (Prakash y Thomas, 2016). El modelo de control que se propone en el estudio es representado en la figura 1. El sistema de lazo cerrado para este caso controla el ángulo de inclinación del vehículo, controlándose el movimiento lineal.

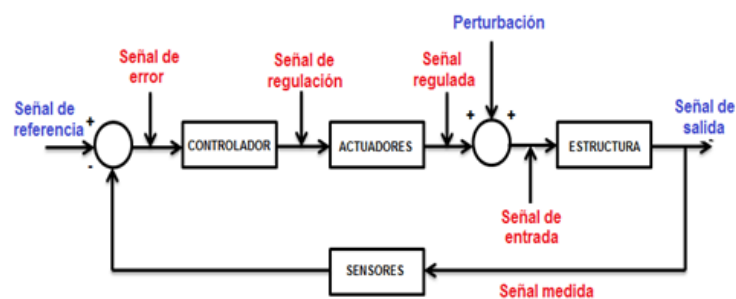


Fig.1. Modelo de péndulo invertido (Castro y Delgado, 2011).

Modelado teórico de un vehículo basado en el péndulo invertido

Según Madero se modela dinámicamente el comportamiento del sistema formado por el vehículo autobalanceado ajustándose a sus parámetros, además de modelar las leyes de control que permitan llevar y mantener el vehículo en la posición de equilibrio vertical, en la figura 2, se muestra los principales parámetros del modelo donde θ : ángulo de inclinación del péndulo, $(\dot{\theta})$ velocidad angular del péndulo, m_p : masa del péndulo (se incluye los elementos

estructurales salvo las ruedas), l : longitud del centro de masa del péndulo al eje de los motores, ω : ángulo girado por el eje de los motores, $(\dot{\omega})$ velocidad en el eje de los motores, m_r : masa de las ruedas, R : radio de las ruedas. Estos parámetros responden a magnitudes físicas y tienen valores constantes, algunos de ellos pueden ser medidos directamente, mientras que el valor de otros tendrá que ser estimado a través de datos experimentales (Madero, 2009).

Para el modelo dinámico del sistema se utiliza la formulación de Lagrange-Euler, que se basa en una interpretación de la energía involucrada en los movimientos del vehículo (Castro et al., 2013; Madero, 2009). La ecuación 1, relaciona las variables para desarrollarlo, donde: P_i : coordenadas generalizadas, P_i' : derivadas de las coordenadas generalizadas P_i , L : Lagrangiano del sistema mecánico y F_i : fuerzas y pares externos aplicados.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta p_i} \right) - \frac{\delta L}{\delta p_i} = \sum_i F_i \quad (1)$$

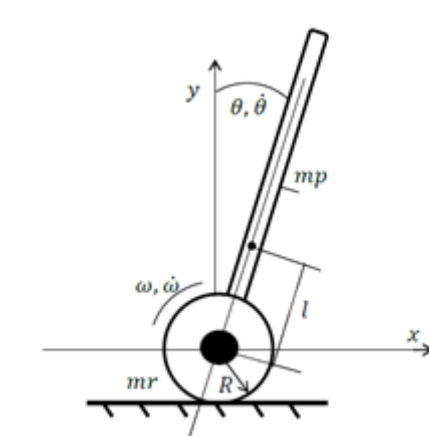


Fig. 2. Esquema general de un vehículo auto balanceado (Madero, 2009).

Lo primero para el modelado será la obtención de la expresión del Lagrangiano a través de la diferencia entre las energías cinética (E_c) y potencial (E_p), que está dada en la ecuación 2.

$$L(\theta(t), \omega(t)) = E_c - E_p \quad (2)$$

La energía cinética total es la suma de la energía cinética del péndulo y la energía cinética de las ruedas, la cual se tendrán en cuenta por separado puesto que en el movimiento de cada una de esas partes intervienen tanto la traslación como la rotación, para el cálculo de la energía potencial, se toma el eje de giro coincidente con el de los motores como el punto de referencia. Las ruedas, por tanto, no se tendrán en cuenta para el cálculo de la misma. Por lo cual, el Lagrangiano definido por la ecuación 3, a través de las ecuaciones anteriores y sus reemplazos (Madero, 2009).

$$L = \frac{1}{2} * I_p * \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} * m_p * l^2 * \dot{\theta}^2 + m_p * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \cos\theta + \left(\frac{1}{2} * m_p + \frac{3}{4} * m_r\right) * R^2 * \dot{\omega}^2 - m_p * g * l * \cos\theta \quad (3)$$

Una vez formulado el Lagrangiano, a partir de él, se plantearán las ecuaciones de Euler-Lagrange derivando a la ecuación 3 respecto a θ y a ω , obteniéndose las ecuaciones 4 y 5.

$$\frac{\delta L}{\delta \theta} = -m_p * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \sin\theta + m_p * g * l * \sin\theta$$

$$(4) \frac{\delta L}{\delta \omega} = 0$$

(5)

Derivando a la ecuación 3 respecto a $\dot{\theta}$ y a $\dot{\omega}$ se obtienen las ecuaciones 6 y 7:

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} = I_p * \dot{\theta} + m_p * l^2 * \dot{\theta} + m_p * l * R * \dot{\omega} * \cos\theta \quad (6)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{\omega}} = mp * l * R * \dot{\theta} * \cos\theta + (mp + \frac{3}{2}mr) * R^2 * \dot{\omega} \quad (7)$$

Derivando las ecuaciones 6 y 7 respecto al tiempo se obtienen las ecuaciones 8 y 9:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) = Ip * \ddot{\theta} + mp * l^2 * \ddot{\theta} + mp * l * R * \ddot{\omega} * \cos\theta - mp * l * R * \dot{\theta} * \sin\theta \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\omega}} \right) = mp * l * R * \ddot{\theta} * \cos\theta - mp * l * R * \dot{\theta}^2 * \sin\theta + (mp + \frac{3}{2}mr) * R^2 * \ddot{\omega} \quad (9)$$

En el caso del vehículo autobalanceado el único par externo que se aplica sobre el sistema es el par de los motores. Al considerarse el eje de giro de los motores y el péndulo como un mismo eje, el par que los motores ejercen directamente sobre las ruedas se muestra como un par opuesto en el péndulo. La única fuerza externa no conservativa que se considera en el modelo será la fuerza de rozamiento de los motores. Esta fuerza se debe a la fricción interna de los motores, oponiéndose a la velocidad de giro del eje de los motores, y al igual que en el caso del par aplicado, afecta tanto a las ruedas como al péndulo con igual magnitud y sentido contrario. Teniendo esta información se plantea la ecuación 10 tal como se reporta en (Ba et al., 2016; Madero, 2009).

$$F_r = -k_r * \omega \quad (10)$$

Las ecuaciones que modelan la dinámica del vehículo, se obtienen por tanto sustituyendo de las ecuaciones 4, 5, 8, 9 y 10 en la ecuación 1 y se presenta en las ecuaciones 11 y 12 que son desarrollada de Euler-Lagrange, donde: τ : par del motor, F_r : fuerza de roce del motor, K_r : coeficiente de fricción.

$$mp * l * R * \ddot{\theta} * \cos\theta - mp * l * R * \dot{\theta}^2 * \sin\theta + \left(mp + \frac{3}{2}mr \right) * R^2 * \ddot{\omega} = \tau - kr * \dot{\omega} \quad (11)$$

$$(Ip + mp * l^2) * \ddot{\theta} + mp * l * R * \ddot{\omega} * \cos\theta - mp * g * l * \sin\theta = -\tau + kr * \dot{\omega} \quad (12)$$

Para trabajar con el modelo de cara al cálculo de leyes de control, se plantea a través de las ecuaciones de estado del mismo. Para ello se definen las variables de estado del sistema. Se observa que el sistema es no lineal, lo que dificulta el desarrollo del sistema de control. No obstante, se pueden aplicar diversas técnicas para linealizar el sistema alrededor del punto de equilibrio ($\theta \cong 0^\circ$) según sea conveniente. Al mismo tiempo, se aprecia que el sistema se puede esquematizar como un sistema formado por dos bloques, la planta y el actuador, de manera que las variables de estado, representando el ángulo y la velocidad del péndulo invertido, constituyen la dinámica de la planta y las variables de estado, que representan el ángulo y la velocidad de las ruedas, constituyen la dinámica de control (Dini y Majd, 2015).

Requerimiento de etapa de potencia de motores

La potencia y la relación par motor – velocidad, fueron los parámetros que se tomaron en consideración para la selección de los motores eléctricos. La velocidad que debe alcanzar el vehículo debe ser superior al desplazamiento de una persona (mayor a 4 km/h). El proyecto está basado en la velocidad especificada por los Segway comerciales donde hace referencia que no debe sobrepasar los 20 km/h, el peso (W) que ejercerá el conductor junto con el peso del vehículo que será de 100 kg. Para la obtención del alto par motor se selecciona una caja reductora. A partir del número de revoluciones que suministra el motor eléctrico, la relación de transmisión de la caja reductora y el radio del neumático, se determina la velocidad lineal del vehículo. Considerándose lo anteriormente planteado, las

revoluciones a la salida de caja reductora deben ser superiores a 321 rpm.

Para esto se presenta la figura 3 como análisis del cuerpo libre, ubicándose las fuerzas actuantes, donde se tiene que: F_m = fuerza aplicada por el conjunto motor caja reductora; θ = inclinación del terreno (20°); F_r = fuerza de rozamiento; W = peso total de la máquina más la carga; el coeficiente por rodadura (μ_r) posee un valor menor comparado al coeficiente de rozamiento por deslizamiento (estático y cinético), siendo así, mucho más conveniente la reducción de las pérdidas energéticas, en este caso para una rueda sobre asfalto se tiene un coeficiente de rodadura de $\mu_r = 0,035$ tomado para las peores condiciones (Hata y Takimoto, 2014).

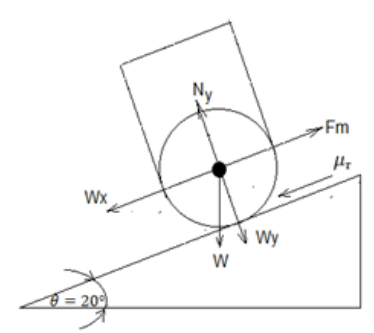


Fig. 3. Diagrama de cuerpo libre aplicado.

Para el cálculo se considera que cada conjunto motor-caja reductora, ejerce la fuerza F_m y que se asumen aceleraciones que tienden a cero, esta suposición se fundamenta en que la fuerza a determinar es aquella que permite vencer las resistencias e iniciar el movimiento del vehículo. El trabajo producido por un motor, puede ser considerado como el trabajo de dos fuerzas F , que se aplican a los extremos de un mismo diámetro. Estas fuerzas forman lo que se llama “par”. El trabajo efectuado por las dos fuerzas en una vuelta, es igual a la potencia Desarrollada por el motor. Inicialmente, para determinar la potencia del motor eléctrico se establecen las condiciones sobre una superficie plana, asumiéndose que el movimiento inicia en cero

llegando a una velocidad máxima de 20 km/h se aplica un par motor constante de 30 Nm, con una potencia pico de 1022.44 Watts.

Estrategia de control y programación

En la figura 4, se representa el algoritmo para establecer el control y programación del control electrónico, se procede a establecer la inicialización de las tarjetas de control. A partir de la lectura de datos se procede con el cálculo del error, pero antes de eso, la programación tendrá una limitante del ángulo máximo a controlar, debido a que el vehículo solo podrá mantener en equilibrio a la persona en un ángulo máximo de inclinación. Considerándose estas limitaciones se procede al cálculo del error, que viene siendo la diferencia entre la variable medida y el setpoint, esta puede ser positiva o negativa, esto se considera con el fin de establecer un escalar que implante los valores medidos de posición angular a valores más pequeños que se puedan ejecutar y entender de mejor manera para la acción de control, estos valores están limitados de 1 a -1, que vienen dados de los valores máximos (45 grados hacia adelante y -45 grados hacia atrás).

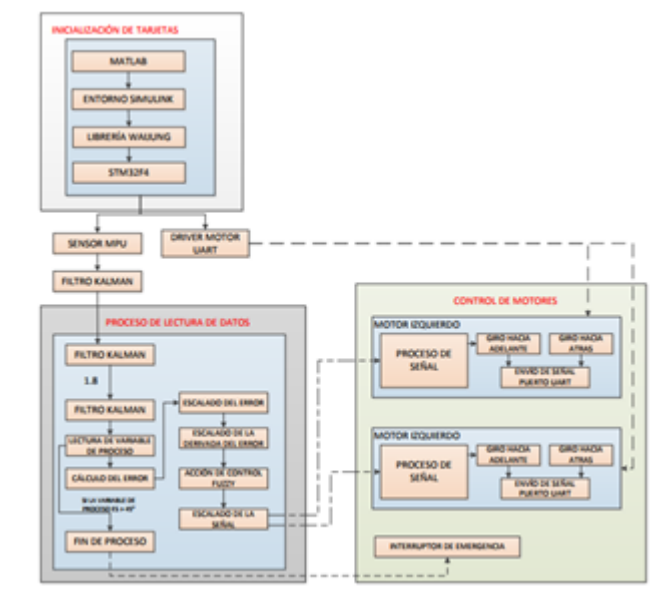


Fig. 4. Etapas para el cálculo de la acción de control electrónico.

A partir de estas condiciones, la acción de control se verá condicionada por un interruptor de emergencia, el cual al estar en activación permitirá el flujo de datos, mientras que al suscitarse algún percance inesperado este permitirá la desconexión del control electrónico del vehículo logrando desactivar la máquina por seguridad. Cuando la acción del controlador permita el paso de los valores de señal, estos serán enviados mediante puerto serial a la tarjeta controladora de motores, que tomará las debidas acciones en las condiciones en las que se encuentre el ángulo de inclinación, de esta manera, cuando el vehículo se incline adelante la velocidad de cada motor se incrementará proporcionalmente en el mismo sentido, y viceversa para las condiciones de inclinación hacia atrás. La mayoría de los enfoques de control adoptan la estructura de control de dos etapas, bajo este método, el requisito previo es diseñar un

controlador para estabilizar el sistema y luego diseñar el controlador para gestionar la trayectoria (Alqudah et al., 2016; Camacho et al., 2016; Ren, 2004).

3. Resultados

El vehículo se estructuró de forma que se adapte a los parámetros que responda de la mejor manera para cumplir con la meta de estabilización del sistema, a partir de la aplicación de los modelos matemático referidos en el método, tanto para el modelo dinámico como de control electrónico del vehículo, estos resultados se presentan en la tabla 1. Según Li et al. (2017), el robot móvil de péndulo invertido de dos ruedas con transmisión diferencial tiene la ventaja de una alta maniobrabilidad en pendientes y en espacios estrechos, lo cual fue probado en el diseño mecánico y el modelado dinámico de un robot móvil prototipo de 12 kg de peso; con el diseño y construcción del vehículo Segway aplicando péndulo invertido se obtienen resultados coincidentes.

Tabla 1. Parámetros del vehículo eléctrico.

Características del vehículo	
Peso total de la máquina	30 kg
Peso de la máquina sin las baterías	25 kg
Capacidad de carga	25 – 100 kg
Largo y ancho de la máquina	0,45 x 0,35 m
Relación de caja reductora	15 : 1
Tamaño de neumático	0,33 m
Velocidad máxima	20 km/h
Características del motor eléctrico	
Motores	Brushed
Potencia máxima	370 Watts
Torque máximo	55 Nm
Giro del motor	200 rpm
Características de eléctricas-electrónicas	
Alimentación	Baterías LiPo
Capacidad (Ah)	5 Ah
Voltaje de las baterías	25 V
Sensor inercial InvenSense	MPU-6050

Evaluación dinámica del vehículo eléctrico tipo Segway.

Como parte de las pruebas realizada al vehículo eléctrico tipo Segway, se evalúa en cada condición de superficie por las que el vehículo pueda rodar, al fin de cubrir todas las posibilidades de superficies tanto regulares como irregulares en las que el vehículo eléctrico tipo Segway pueda perder su estabilización, se desarrolló cinco evaluaciones por cada prueba propuesta. Según Hu y Tsai (2008) las estrategias robustas de diagnóstico de fallas para el autoequilibrio de un coche de dos ruedas diseñado ergonómicamente que es inherentemente inestable, se lo controla mediante el diseño de conformación de bucle para maximizar la incertidumbre del modelo.

Según Sugano et al. (2013), una prueba inicial es mantener su equilibrio automáticamente, el ángulo deseado máximo de sacudida oblicua es de $0,5^\circ$, y el resultado del experimento es llegar a 2° . Habrá algunas razones para esto, es decir: un parámetro de controlador inadecuado, datos de sensor no precisos, que se pueden resolver repitiendo el experimento para obtener el parámetro adecuado y el desplazamiento del sensor. En la figura 5 se da muestra.

Fig. 5. Pruebas de estabilización del vehículo.



Fig. 6. Pruebas de maniobra del Segway.

La figura 6, muestra la respuesta de la maniobra del Segway para ángulos de inclinación máxima de 45° y -45° grados, y una velocidad inicial de 20 km/h. Según Hu y Tsai (2008), el controlador de realimentación puede estabilizar el ángulo de paso del Segway a un valor neutral. Sin embargo, esta maniobra de equilibrado requería acelerar la base frente al

centro de masa, la velocidad de avance del Segway durante la maniobra de estabilización, donde la velocidad de avance se define como la velocidad de la base del vehículo.

Según Sugano et al. (2013), el prototipo está diseñado para entornos diferentes, es decir, espacios estrechos, pendientes, entre otros. Por lo tanto, se llevaron a cabo experimentos para validar su capacidad de escalar pendientes y superar pequeños obstáculos, comportándose de forma estable, como en la evaluación presente en la figura 6, donde se probó el rendimiento de la velocidad del vehículo que viaja sobre una superficie plana. La velocidad máxima diseñada de 20 km/h y la variación continua de velocidad del Segway propuesto. Para garantizar el funcionamiento del vehículo, toma en cuenta las fuerzas perturbadoras que el vehículo eléctrico Segway que puede experimentar. Según Li et al. (2007), estas fuerzas podrían afectar negativamente la estabilidad y comprometer la seguridad del usuario a bordo. Para lograr un equilibrio dinámico estable del vehículo eléctrico Segway, las fuerzas de perturbación se miden realizando primero un WDT y luego sometiendo el modelo a las perturbaciones de WDT obtenidas en la recopilación de datos. La sección final identifica las perturbaciones que pueden causar inestabilidad y propone un sistema de estabilidad mejorado. Según Van Rensburg et al. (2017), propone que, al calcular nuevamente la fuerza total requerida para mantener la estabilidad del sistema, se puede contrarrestar la fuerza de perturbación. Según Castro et al. (2003), el modelo dinámico bajo ciertas condiciones de operación y para una variedad de tipos de cuerpos de conductores sugiere que un controlador de retroalimentación puede tener dificultades para estabilizar el dispositivo en condiciones del mundo real.

Resultados gráficos de autonomía y tiempos de carga del vehículo

La autonomía que el vehículo posee, se refiere al período en que las baterías permiten el funcionamiento ya sea mediante el tiempo de uso o el kilometraje que el vehículo puede alcanzar, antes de volver a cargar las baterías conjuntamente con la capacidad de los motores escogidos para este propósito. Como resultado final se obtuvo que la autonomía es de aproximadamente de 4 horas para las dos baterías de LiPo, dependiendo del estilo de manejo y la superficie del terreno. En la figura 7, se muestra dicho comportamiento, dando como resultado un tiempo de recorrido de 7 200 segundos con una sola batería.

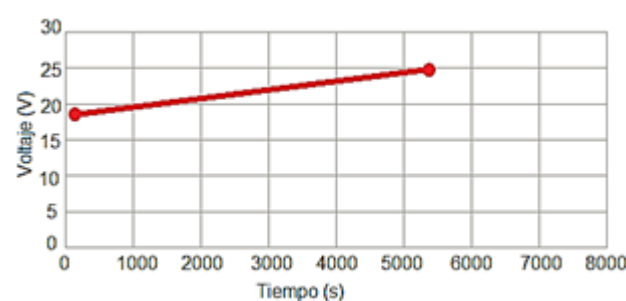


Fig. 7. Autonomía del vehículo con una batería.

Uno de los aspectos que se toma en cuenta sobre las baterías es el tiempo de carga. Como sugerencia se tiene que las baterías no deben ser descargadas a un valor menor de 18 voltios como cuidado especial para alargar su vida útil. Como se observa en la figura 8, el tiempo de carga necesario que requerirá cada una de las baterías será de alrededor de 5 520 segundos.

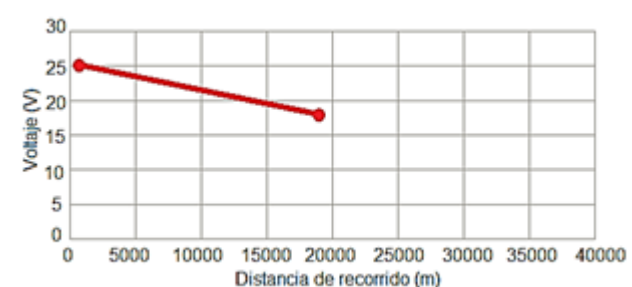


Fig. 8. Tiempos de carga del vehículo para una batería.

Según Rocha et al. (2017), para determinar la autonomía en kilometraje que alcanzará el vehículo, se debe tomar como consideración las características de velocidad y geografía del medio. En el trabajo además se analizó las características que otorga los motores y así mediante esos valores se determina el recorrido completo que el vehículo alcanzó. Como se presenta en la figura 9, la autonomía del vehículo está en un promedio de 40 kilómetros.

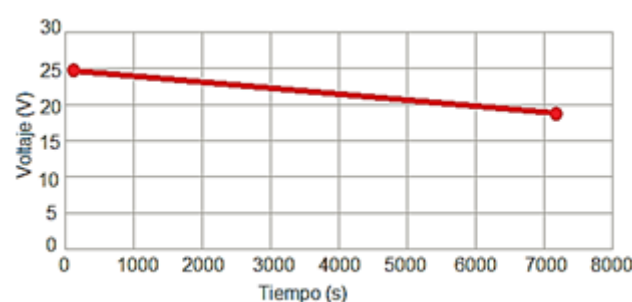


Fig. 9. Autonomía en distancia del vehículo con una batería.

4. Conclusiones

Se construyó el vehículo eléctrico auto balanceado tipo Segway, lográndose la funcionalidad exigida para estos sistemas de transporte, que consiste en la movilidad de personas de forma segura, el diseño posee un concepto equilibrado para el transporte de personas.

La aplicación de la fórmula de Lagrange-Euler en el modelo dinámico del sistema Segway, permitió la selección y

dimensionamiento de los motores eléctricos, con potencia máxima de 370 Watts y torque máximo de 55 Nm a 200 rpm. El diseño del prototipo logra una autonomía de 40 kilómetros con rangos de descarga de las baterías entre 25.2 y 20 voltios, superando resultados obtenidos en otras investigaciones.

Referencias bibliográficas

Kim, S., & Kwon, S. (2015). Dynamic modeling of a two-wheeled inverted pendulum balancing mobile robot. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 13(4), 926-933.

Castro, A., Adams, C., & Singhose, W. (2013, December). Dynamic response characteristics of a two-wheeled inverted-pendulum transporter. In *Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on* (pp. 1532-1537). IEEE.

Stilman, M., Olson, J., & Gloss, W. (2010, May). Golem kranig: Dynamically stable humanoid robot for mobile manipulation. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 3304-3309). IEEE.

Castro, D., & Delgado, J. (2011). Diseño y construcción de un prototipo experimental de un vehículo eléctrico autobalanceado unipersonal VEAU. Universidad Industrial de Santander UIS.[Links].

Ba, P. D., Lee, S. G., Back, S., Kim, J., & Lee, M. K. (2016, October). Balancing and translation control of a ball segway that a human can ride. In *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2016 16th International Conference on* (pp. 477-480). IEEE.

Babazadeh, R., Khiabani, A. G., & Azmi, H. (2016, January). Optimal control of Segway personal transporter. In *Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 2016 4th International Conference on* (pp. 18-22). IEEE.

Rocha-Hoyos, J., Tipanluisa, L. E., Reina, S. W., & Ayabaca, C. R. (2017). Evaluación del Sistema de Tracción en un Vehículo Eléctrico Biplaza de Estructura Tubular. *Información tecnológica*, 28(2), 29-36.

Siregar, H. P., & Martynenko, Y. G. (2012). Stabilization of Motion of the Segway. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 3(8), 1219-1225.

Jamin, N. F., & Ghani, N. A. (2016, October). Two-wheeled wheelchair stabilization control using fuzzy logic controller based particle swarm optimization. In *Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, IEEE International Conference on (pp. 78-83). IEEE.

Quaglia, G., Franco, W., & Nisi, M. (2017). Kinematic Analysis of an Electric StairClimbing Wheelchair. *Ingeniería y Universidad*, 21(1), 27-48.

Moreno, L., & DUARTE, M. (2009). Diseño e Implementación de Vehículo Autobalanceado sobre Dos Ruedas. Disponible desde Internet en http://www.cec.uchile.cl/~lemoreno/dat/paper_memoria Borrador.pdf [con acceso el 01/06/2014][Links].

Prakash, K., & Thomas, K. (2016, September). Study of controllers for a two wheeled self-balancing robot. In *Next Generation Intelligent Systems (ICNGIS)*, International Conference on (pp. 1-7). IEEE.

Madero, V. (2009). Análisis y Control de Un Vehículo Basado en Péndulo Invertido. Sevilla, Universidad De Sevilla.

Dini, N., & Majd, V. J. (2015, October). Model predictive control of a wheeled inverted pendulum robot. In *Robotics and Mechatronics (ICROM)*, 2015 3rd RSI International Conference on (pp. 152-157). IEEE.

Hata, H., & Takimoto, T. (2014, October). Development of the portable two-wheeled inverted pendulum type personal vehicle. In *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2014 14th International Conference on (pp. 1610-1613). IEEE.

Alqudah, M., Abdelfattah, M., Boiko, I., & Alhammadi, K. (2016, December). Dynamic modeling and control design for a self-balancing two-wheel chair. In *Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*, 2016 5th International Conference on (pp. 1-4). IEEE.

Ren, T. J. (2004). Modeling and motion control of the mobile vehicle with an inverted pendulum. In Proc. Int. Conf. on Intelligent Manipulation and Grasping, Genoa, 2004.

Camacho Quintero, O. E. (2016). Controllers Comparison to stabilize a Two-wheeled Inverted Pendulum: PID, LQR and Sliding Mode Control.

Li, J., Gao, X., Huang, Q., Du, Q., & Duan, X. (2007, August). Mechanical design and dynamic modeling of a two-wheeled inverted pendulum mobile robot. In Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on (pp. 1614-1619). IEEE.

Hu, J. S., & Tsai, M. C. (2008). Design of robust stabilization and fault diagnosis for an auto-balancing two-wheeled cart. *Advanced Robotics*, 22(2-3), 319-338.

Sugano, T., Yokoyama, K., Suzuki, T., & Takahashi, M. (2013). Modeling and motion analysis of a mobile inverted pendulum considering a change of slope angle. *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, 79(801), 1441-1452.

van Rensburg, R., Steyn, N., Trénoras, L., Hamam, Y., & Monacelli, E. (2017). Stability and enhancement analysis of a modelled self-balancing verticalized mobility aid using optimal control techniques. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 9(1), 93-109.