

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO PERSONAL (VEAP) DE DOS RUEDAS EN PARALELO ESTILO SEGWAY.

Víctor Velasco, Edison Pilicita, Freddy Salazar, José Quiroz

Universidad De Fuerzas Armadas ESPE

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

victor_velasco03@hotmail.com,
fwsalazar@espe.edu.ec,

pili_3087@hotmail.com,
jlquiroz@espe.edu.ec

RESUMEN.

En la siguiente investigación se detallan los procesos de diseño y construcción de un vehículo eléctrico autobalanceado personal (VEAP) de dos ruedas en paralelo estilo Segway, la meta de este trabajo es el desarrollo de la parte de control de estabilidad del vehículo mediante condiciones mecánicas y de programación; utilizando un modelo estructural basado en los prototipos SEGWAY, consiguiendo así como resultado final un transportador personal que brinde servicios de confort, comodidad y seguridad, y detalles sofisticados que promoverán el uso de la misma, que están enfocados

a eliminar congestión de tráfico y contaminación.

Palabras clave:

Ingeniería automotriz, VEAP, vehículos autobalanceados, vehículos eléctricos, péndulo invertido.

ABSTRACT.

In the following investigation processes design and construction of a personal self-balancing electric vehicle (VEAP) parallel two-wheeled Segway style, the goal of this work is the development of vehicle stability control and programming by mechanical conditions; using a structural model based on prototypes SEGWAY,

achieving the end result a personal carrier that offers services of comfort, convenience and security, and sophisticated details that will promote the use thereof, which are focused on eliminating traffic congestion and pollution.

Keywords:

Automotive engineering, VEAP, self-balancing vehicles, electric vehicles, inverted pendulum.

I. INTRODUCCIÓN.

Uno de los problemas que presentan las grandes ciudades, están relacionados con la industria del transporte, ya que los vehículos generan gran cantidad de tráfico y contaminación, debido a que; su funcionamiento es en base a motores de combustión interna, requiriendo combustibles fósiles, aportan considerables partículas contaminantes al medio ambiente, llevando al colapso de la congestión vehicular debido al incremento del parque automotor y por ende empeorando ampliamente las cualidades del aire en las ciudades provocando así la

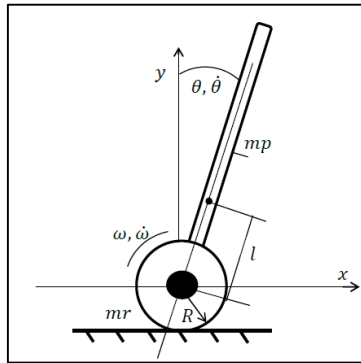
disminución de la calidad de vida en los ciudadanos.

Una de las mejores alternativas de solución al congestionamiento vehicular en las grandes ciudades en donde para ir a un lugar se recorren tramos cortos; está en el estudio del péndulo invertido a través de un vehículo autoequilibrado, generando así a la sociedad una solución ecológica y de descongestionamiento vehicular.

II. SISTEMA DE PÉNDULO INVERTIDO SOBRE MÓVIL.

El péndulo invertido es un sistema complejo no lineal. En este sentido se tiene que una de las aplicaciones que está en apogeo en la actualidad es el desarrollo de vehículos eléctricos auto balanceados.

En el caso del péndulo invertido clásico, la acción sobre el movimiento angular es sólo consecuencia de la dinámica de los cuerpos.



Fuente: Madero, V. (2009)

Figura 1. Esquema general de un vehículo auto balaceado.

En la Figura 1, se muestra los parámetros más importantes los cuales se va a tomar en consideración para realizar el modelo matemático teórico, tomándose en cuenta valores constantes y magnitudes físicas, donde algunos podrán ser medidos directamente, mientras que los otros se tomará referencia de valores estimados a través de datos experimentales comprobados, siendo así:

θ : Ángulo de inclinación del péndulo.

$\dot{\theta}$: Velocidad angular del péndulo.

m_p : Masa del péndulo. (Parte estructural sin contar 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 del eje de los motores.

m_r : Masa de las ruedas.

R : Radio de las ruedas

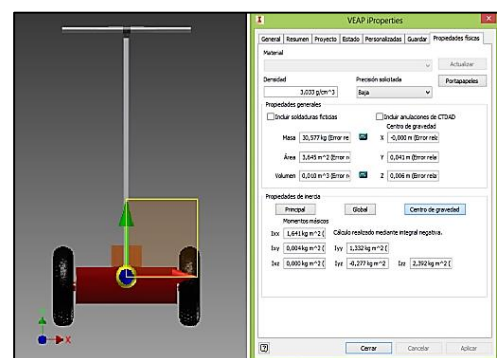
III. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.

Además de las consideraciones que se deberá tener en cuenta en la parte de diseño, se deberá tomar en cuenta los aspectos de funcionalidad del sistema en la etapa de potencia de motores y la autonomía del vehículo en donde todas estas variables vienen dada según nuestro diseño y regidos a los siguientes aspectos:

En el modelo real se tienen los siguientes datos:

m : Masa del vehículo: 30kg

M : Masa de la persona (péndulo): 70kg



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 2. Diseño estructural del VEAP en Autodesk Inventor

Etapas de potencia de motores

Para la selección y dimensionamiento de los motores, es preciso tomar en cuenta varios factores, principalmente la potencia y relaciones torque-velocidad requeridas para la aplicación. En primer lugar, como requerimiento de velocidad el vehículo deberá poder movilizarse más rápido que una persona caminando. La velocidad tomada como referencia es:

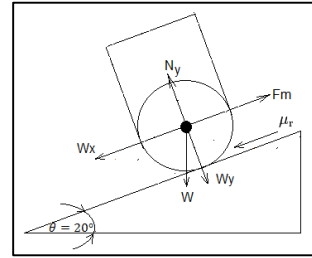
$$V = 20 \frac{km}{h} \times \frac{1000m}{1 km} \times \frac{1 h}{3600 s} = 5,56 \frac{m}{s}$$

$$v = \omega \times R$$

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{5,56 \frac{m}{s}}{0,165 m} = 33,697 \frac{rad}{s}$$

$$n = 33,697 \frac{rad}{s} \times \frac{1 rev}{2 \pi rad} = 5,36 rps = 321,78 rpm$$

A continuación, es necesario analizar las fuerzas que intervienen en el movimiento y el torque que deberá ser capaz de proporcionar el motor, se tomó como condición una rampa con una inclinación $\theta = 20^\circ$.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 3. Diagrama de cuerpo libre aplicado al proyecto

Para el cálculo se considerará que cada conjunto motor-caja reductora ejerce la fuerza F_m y que se tomará una aceleración muy pequeña, de modo que tienda a cero, debido a que únicamente se pretende calcular la fuerza que permita romper el estado de reposo e iniciar el movimiento. El peso a tomarse será 100 kg (peso del vehículo más el conductor)

$$\sum F_y = 0$$

$$N = W_y = m \times g \times \cos \theta$$

$$N = (70 + 30)kg \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times \cos 20^\circ = 921,84 N$$

$$\sum F_x = 0$$

$$2F_m - R_r - W_x = 0$$

$$F_m = \frac{[(0,035 \times 1474,94 \text{ N}) + (100 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \text{sen } 20^\circ)]}{2} = 183,89 \text{ N}$$

Ahora es necesario calcular el par de giro y potencia del motor.

$$M_n = F_m \times R$$

$$M_n = 183,89 \text{ N} \times 0,165 \text{ m} = 30,34 \text{ Nm}$$

Como consecuencia el conjunto motor-caja reductora deberá ser capaz de entregar un torque de 30 Nm en las peores condiciones.

Para el cálculo de la potencia del motor será necesario realizar el análisis en condiciones de funcionamiento sobre una superficie plana. Se asumirá que el vehículo parte del reposo y que desea llegar a su velocidad máxima, que es 20km/h, aplicando un torque constante de 30Nm (menor al máximo calculado en la peor condición). De modo que la condición pico de potencia es:

$$P_m = M_n \times \omega$$

$$P_m = 30 \text{ Nm} \times 33,697 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 1022,44 \text{ Watts}$$

De modo que el conjunto motor-caja reductora requerido debe cumplir como mínimo con las

condiciones indicadas anteriormente.

Requerimientos para la selección de las baterías

Debido a que el proyecto está enfocado en reducir las dimensiones del prototipo comercial original, se ve la necesidad de tener en cuenta el espacio que ocuparan las baterías, ya que estas no deben ser excesivamente grandes para poder cumplir con nuestro objetivo.

Una de las baterías que nos brinda ese requisito son las de polímero de litio o también conocidas como LiPo



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 4. Baterías LiPo 22.2 V, 5000mAh

Las baterías de LiPo a parte de la especificación de voltaje y corriente de la batería, también se detalla una referencia de

descarga máxima que viene expresada con un número seguido de una 'C' (30C), donde C es el amperaje de la batería. Para saber que amperaje descarga nuestra batería se tendrá que multiplicar los miliamperios de esta por el número delante de la C. Para el proyecto se cuenta con una batería de 5.000Mha y 30C, la descarga máxima a la que se puede someter esta batería sería 150.000 mAh (150Ah), con lo que se consigue proceder con el siguiente calculo:

$$C * \text{capacidad en Ah} = \text{max Amp}$$

El consumo de corriente de los motores con carga en el VEAP en una superficie plana es de 37,5 amperios. Este valor es el que se tomara como referencia para el cálculo de la autonomía ya que la mayor parte del tiempo, el vehículo circulara por superficies plana, exigiendo un consumo de corriente mucho menor que en superficies empinadas o de una superficie con mayor resistencia a la rodadura.

$$\text{Tiempo de autonomia} = \frac{\text{Carga maxima de batería}}{\text{Consumo de corriente}}$$

$$\text{Tiempo de autonomia} = \frac{150 \text{ Ah}}{(37,5 * 2)A} = 2 \text{ horas}$$

Como resultado final se obtuvo que, la autonomía de cada batería es de aproximadamente 2 horas dando un total de 4 horas para las dos baterías, dependiendo del estilo de manejo y la superficie del terreno.

Uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta sobre las baterías elegidas para nuestro proyecto; es el tiempo en que demorará en cargar las baterías. El tiempo de carga necesario que requerirá cada una de las baterías será de alrededor de 92 minutos (1 hora y media), teniendo un total para las dos baterías, de 3 horas de carga.

IV. SENSOR MPU 6050

Para tomar los datos de referencia que en este caso son los parámetros que intervienen en el péndulo invertido para el VEAP se usará el sensor inercial MPU-6050 de InvenSense. El principal motivo de la elección de este sensor es que; en un solo chip se integra un giroscopio y un acelerómetro que presenta una sobresaliente

linealidad, reduciendo de esta manera significativamente el error de desalineación que se presenta cuando se fusionan los sensores.

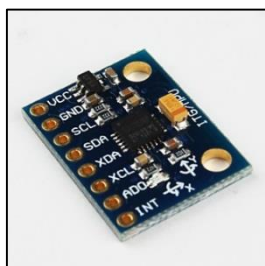


Figura 5. Sensor inercial MPU-6050

Fuente: IvenSense

Uno de los parámetros más importantes a considerar antes de realizar la estrategia de control es determinar la variable de inclinación real que se va a medir; o variable de proceso. Restando el incremento en la medida del giroscopio multiplicado por una constante K_{gg} al valor obtenido con el acelerómetro se puede disminuir este efecto indeseado. De tal forma que la variable de Proceso se puede expresar como:

$$\text{Variable de proceso} = \text{Accel} - \Delta_{gyro} * k_{gg}$$

Fuente: Castro, D & Peña, J (2011)

Ecuación 1. Variable de medición de proceso de inclinación

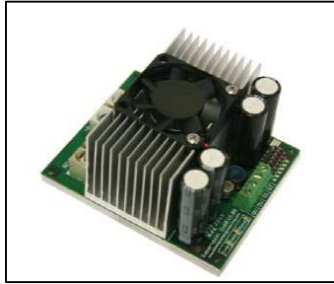
Donde es la medida tomada por el acelerómetro y es la variación entre una medida y la anterior del giroscopio. El valor final obtenido es la Variable de Proceso es usada para calcular el del sistema y las condiciones de inclinación para determina el sentido y la magnitud del giro de las ruedas.

V. UNIDAD CONTROLADORA DE MOTORES

La unidad controladora de motores será el elemento que genere el control de los motores dándoles rangos de funcionamiento que nos permita controlar la velocidad y potencia de los mismos, logrando con esto, que los motores no reciban directamente la alimentación de las baterías, y la reciban distribuidamente a través de este controlador.

La tarjeta Sabertooth 2x60 es uno de los drivers de motores más versátil, eficiente y fácil de usar. Es adecuado para robots de alta potencia, soporta hasta 120 libras en el combate o hasta 1.000 libras para la robótica de propósito

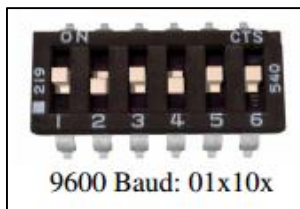
general. Puede suministrar un máximo de 60A a cada uno de los motores. Soporta picos de corriente de 120A por canal durante unos segundos.



Fuente: Dimension Engineering
Sabertooth

Figura 6. Sabertooth 2x60 dual

El controlador puede operar de tres modos diferentes: análogo, R/C o serial, para el proyecto se opta por el modo serial donde se podrá utilizarlo para el entorno en Matlab/Simulink. Para la selección de velocidad de transmisión (baud rate) el modo serial viene dado de acuerdo a la siguiente configuración



Fuente: Dimension Engineering
Sabertooth

Figura 7. Posicionamiento de interruptores para el modo serial

VI. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control será el que constará de un elemento el cual ejecutará las órdenes de estrategia de control para el proyecto establecido, logrado este controlar todo el sistema de estabilización del vehículo. El sistema desarrollo o placa microcontroladora es la STM32F407VG DISCOVERY. Se trata de una placa de desarrollo basada en el microcontrolador STM32F407VGT6.



Fuente: St STM32F4 Discovery

Figura 8. MCU STM32F407 VG

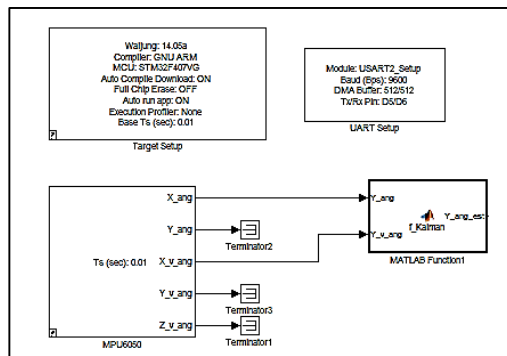
VII. ESTRATEGIA DE CONTROL MEDIANTE DIAGRAMAS DE FLUJO Y BLOQUES EN SIMULINK

Primero se establecerá la inicialización de las tarjetas de control las cuales se a elegido para proceder con la programación.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

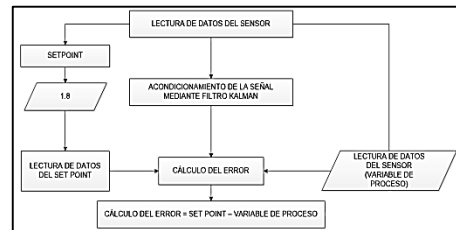
Figura 9. Inicialización de waijung, y tarjetas de control



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

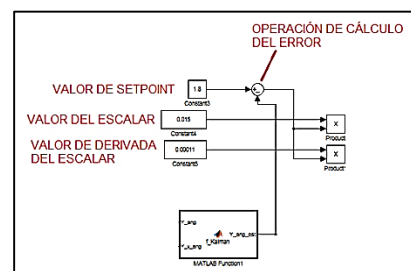
Figura 10. Inicialización tarjetas electrónicas y sensor en simulink

Luego se establece valores set point, establecido manualmente y corroborado mediante acciones de “prueba y error” durante la programación, y que conjuntamente con la lectura del sensor permitirá el cálculo del error.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

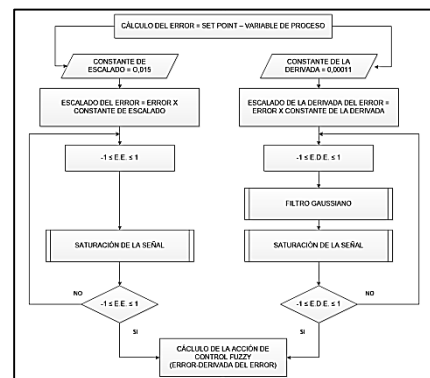
Figura 11. Lectura de datos en MPU 6050



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

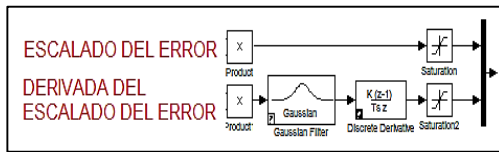
Figura 12. Cálculo del error y escalado del error simulink

La señal obtenida pasará a una saturación para llegar así al cálculo de acción de control en fuzzy.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

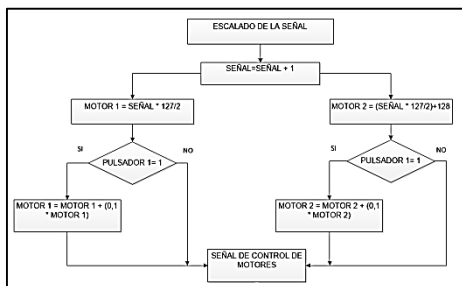
Figura 13. Cálculo para la acción de control mediante Fuzzy



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

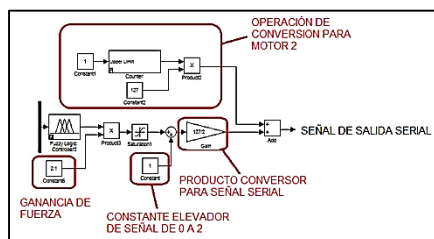
Figura 14. Valores del escalado y derivada del escalado del error

A partir de la señal obtenida se efectuará la conversión de esa señal en caracteres serial, que son requerimientos que el driver sabertooth para así poder tener el control de la señal en los motores.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

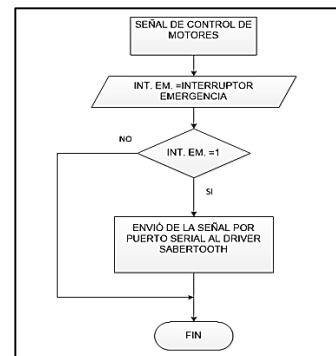
Figura 15. Salida de la señal establecida para los motores



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

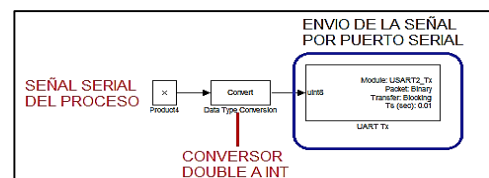
Figura 16. Etapa de conversión de señal para UART

La acción de control se verá condicionada por un interruptor de emergencia, el cual al estar en activación permitirá el flujo de datos. 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 Sabertooth, que tomará las debidas acciones en las condiciones en las que se encuentre el ángulo de inclinación.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 17. Diagrama de señal de envío hacia el controlador de motores



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 18. Condiciones de envío de señal por puerto serial

VIII. FILTRO KALMAN

Como se indicó, la medición del ángulo de inclinación se tiene un modelo que puede ser considerado lineal y que regirá el proceso del cálculo de la inclinación:

$$\hat{\text{ángulo}}_k^- = \hat{\text{ángulo}}_{k-1} + u_k * dt - w_{k-1} * dt$$

Fuente: Pozo, D. (2010)

Ecuación 2. Modelo algoritmo filtro kalman

u_k = señal acondicionada del giroscopio

dt = tiempo de muestreo

$\hat{\text{ángulo}}_k^-$ = estado estimado

$\hat{\text{ángulo}}_{k-1}$ = estado anterior

w_{k-1} = perturbación en el proceso

Ahora, también se tiene el acelerómetro como parte del sistema comportándose como un observador de éste. De esta manera la medida entregada por el acelerómetro sirve para determinar el error suscitado entre el ángulo estimado (giroscopio) y la observación realizada en un instante de tiempo. Teniendo esto presente se tiene el siguiente modelo para el observador:

$$z_k = Hx_k^- + v_k$$

Fuente: Pozo, D. (2010)

Ecuación 3. Variable de observación del acelerómetro

Claramente se aprecia que la medida entregada por el observador presenta un cierto margen de error (v_k) con respecto al valor estimado en base al giroscopio de donde:

$$v_k = z_k - Hx_k^-$$

Fuente: Pozo, D. (2010)

Ecuación 4. Margen de error en base al giroscopio

Con los antecedentes presentados anteriormente se propone el siguiente modelo para incluirlo en el algoritmo de filtro de Kalman.

$$z_k = H\hat{x}_k^- + v_k$$

Fuente: Pozo, D. (2010)

Ecuación 5. Modelo algoritmo filtro Kalman acelerómetro giroscopio

Dónde:

z_k = ángulo entregado por el acelerómetro

u_k = rapidez angular entregada por el giroscopio

$deriva = w$ = perturbaciones en el sistema expresado en [°/s]

IX. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN ESTRUCTURAL DEL VEAP

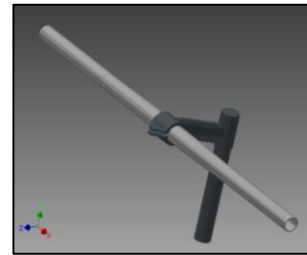
Para el diseño estructural del VEAP se analizará es la parte estructural que soportara todo el sistema, así también a los elementos que irán ensamblados en el mismo, se tomó como consideraciones importantes que es diseño está basado en no sobrepasar un peso de 30 kg en la selección de materiales



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 19. Bastidor VEAP

El mecanismo de dirección del VEAP consta de una base atornillada que se encuentra empotrado un tubo galvanizado, en la parte superior del tubo, existe un tubo perpendicular al de la base que servirá de timón para el conductor.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 20. Unión regulable del volante

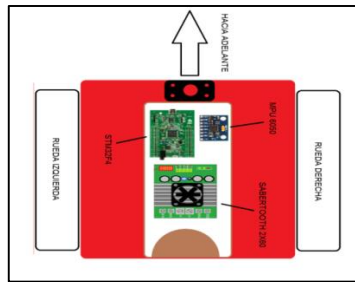
El acoplamiento de los motores irán a un soporte adecuadamente fabricado para esto dotándole de un apoyo fijo para cuando el VEAP este en movimiento.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 21. Ubicación de los motores DC

La ubicación de los componentes electrónicos viene dado de la siguiente forma:



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 22. Esquema de ubicación de componentes electrónicos

Las baterías se colocarán en la parte inferior trasera del VEAP para poder optimizar el espacio en la estructura y compensar el peso.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 23. Ubicación de las baterías

La ubicación de este interruptor de alimentación está dispuesto en la plataforma base a un costado del tubo de soporte de la dirección.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 24. Ubicación del interruptor de alimentación

El interruptor de seguridad, su esquema lo sitúa en la parte media central del volante



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 25. Ubicación del interruptor de seguridad

El control de dirección de nuestro VEAP se lo realiza por medio de pulsadores los cuales se encuentran instalados en la parte superior del volante.



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 26. Ubicación de pulsadores de dirección

X. PRUEBAS

Para la comprobación del correcto funcionamiento del VEAP se realizó pruebas de estabilidad para así poder dar un análisis final del resultado obtenido luego de nuestra investigación e implementación del sistema



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Figura 27. Prueba estática asfalto equilibrio sin manos y en un pie

Estas pruebas dieron como resultado la estabilidad que tiene el

VEAP ya que se puso a prueba soltando el volante por completo y haciendo recorrer de esta forma al vehículo dando una estabilidad adecuada evitando que la persona se caiga, además de pararse en un solo pie teniendo el mismo resultado de estabilidad.

XI. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un vehículo eléctrico autobalanceado personal (VEAP) de dos ruedas en paralelo estilo Segway, logrando satisfactoriamente el control de estabilidad y darle al vehículo la funcionalidad deseada, de modo que una persona sea capaz de trasladarse de un lugar a otro sin mayor dificultad.

La integración y programación de los sistemas electrónicos embebidos en el vehículo se ha realizado de manera exitosa, dando lugar, junto con el diseño y construcción, a que se hayan podido realizar la puesta en marcha del vehículo y esté totalmente operativo.

Se logró establecer una autonomía del VEAP de 4 horas con el uso de

dos baterías LiPo, que supera por mucho a los Segway comerciales.

Se efectuaron pruebas de funcionamiento del VEAP luego de su ensamble completo que garantizaron la seguridad de uso del mismo.

Los costos de construcción fueron rotundamente satisfactorios, ya que con el uso de materiales reciclados y adquiridos en el mercado nacional redujo enormemente su valor económico para poder fabricarlos en serie.

BIBLIOGRAFÍA

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

[2] Pereira, E. & Rivera, C. (2012). Diseño e implementación de un vehículo auto balanceado. Caracas, Universidad Central de Venezuela.

[3] Castro, D. & Peña, J. (2011). Diseño y construcción de un prototipo experimental de un vehículo eléctrico autobalanceado unipersonal VEAU. Bucaramanga,

Universidad Industrial de Santander.

[4] Pontón, P., & Armijos, C. (Septiembre 2010). Diseño, construcción y control de un vehículo eléctrico de un eje unipersonal. Quito, Escuela Politécnica Nacional.

[5] Pozo, D. (Febrero 2010). Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio. Quito, Escuela Politécnica Nacional.

[6] Moreno, L. (Junio 2009). Vehículo Autobalanceado sobre dos Ruedas. Santiago de Chile, Universidad de Chile.

[7] Arenas, M. (2008). Diseño e implementación de un sistema de adquisición de aceleraciones con procesamiento mediante microcontrolador. Sevilla, Universidad de Sevilla.

BIOGRAFÍA



Víctor Velasco

Nació en Quito provincia de Pichincha en Ecuador.

Actualmente es egresado de la carrera de Ingeniería Automotriz en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Realizó sus prácticas preprofesionales en Casabaca Toyota S.A., Metrocar S.A. y Automotores Continental.



Edison Pilicita

Nació en Machachi provincia de Pichincha en Ecuador.

Actualmente es egresado de la carrera de Ingeniería Automotriz en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Realizó sus prácticas preprofesionales en Acería del Ecuador Adelca, Taller Automotriz a diesel y gasolina, entre otras.



Freddy W. Salazar

Nació en Latacunga provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es

Ingeniero Electromecánico y cuenta con un masterado en Gestión de la Energía de la Universidad Técnica de Cotopaxi Latacunga-Ecuador. Actualmente es docente del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE en la ciudad de Latacunga-Ecuador.



José Quiroz

Nació en Latacunga, es Ingeniero Automotriz, Estudios de Posgrado en

Autotrónica, Gestión del Aprendizaje, Maestría en Energía. Actualmente es director de Carrera Tecnología Automotriz, y docente del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE en la ciudad de Latacunga-Ecuador.

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Víctor Manuel Velasco Ulco y Edison Enrique Pilicita Caiza bajo mi supervisión.

ING. FREDDY SALAZAR

DIRECTOR DEL PROYECTO

ING. JOSÉ QUIROZ

CODIRECTOR DEL PROYECTO

ING. JUAN CASTRO

DIRECTOR DE LA CARRERA

DR. FREDDY JARAMILLO

SECRETARIO ACADÉMICO