



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Evaluación de un go-kart eléctrico con baterías de Ion-Litio y Níquel - Hidruro Metálico

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ

Autor:

ANDRES FERNANDO IDROVO PAUTA

Director:

ING. GUSTAVO ÁLVAREZ COELLO. MSC

CUENCA – ECUADOR

2020

DEDICATORIA:

A Dios en primer lugar por las bendiciones otorgadas a lo largo de esta etapa de preparación. A mis padres hermanos y mi novia por su apoyo incondicional y desinteresado. A cada uno de los docentes de la Universidad quienes me compartieron sus conocimientos e hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

AGRADECIMIENTO:

Quiero expresar mi gratitud hacia la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, y de manera especial al Ing. Gustavo Álvarez por su guía y aporte para el desarrollo del presente proyecto, así como al Ing. Daniel Cordero, PhD., por su soporte en la aplicación del modelo matemático de dinámica vehicular y al Ing. Efrén Fernández, PhD., por su colaboración en los procesos de carga de las baterías.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA:.....	1
AGRADECIMIENTO:.....	2
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	3
ÍNDICE DE GRAFICOS	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
I. INTRODUCCIÓN	8
II. MATERIALES Y EQUIPOS.....	9
III. METODOLOGIA	11
IV. RESULTADOS	14
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	15
VI. REFERENCIAS	15

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Disposición de elementos en el chasis.	9
Fig. 2 Densidad de energía volumétrica en función de la densidad de energía másica de las baterías recargables [9].	9
Fig. 3 Conjunto de baterías Níquel - Hidruro Metálico.....	10
Fig. 4 Conjunto de baterías Níquel - Hidruro Metálico.....	10
Fig. 5 Configuración de celdas de Níquel - Hidruro Metálico	10
Fig. 6 Alltrax SR – 48400.....	10
Fig. 7 GPS VBOX Sport	11
Fig. 8 Software Alltrax Toolkit	11
Fig. 9 Piñón 34 dientes y piñón 17 dientes mecanizado.....	11
Fig. 10 Diagrama de conexión de componentes.....	12
Fig. 11 Área frontal fotografía.....	12
Fig. 12 Área frontal dibujada.....	12
Fig. 13 Peso del go-kart incluyendo baterías.....	12
Fig. 14 Modelo de dinámica vehicular - Mat Lab - Simulink	13
Fig. 15 Pista para pruebas de go-kart	14
Fig. 16 Curvas de modelo de dinámica vehicular en 5 segundos.....	14
Fig. 17 Curvas de Torque – Velocidad angular en el piñón conductor	14

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I	12
TABLA II	13
TABLA III	14
TABLA IV	14

EVALUACIÓN DE UN GO-KART ELÉCTRICO CON BATERÍAS DE ION-LITIO Y NÍQUEL - HIDRURO METÁLICO

RESUMEN

Enmarcados en la transición hacia el uso de la electricidad como fuente de energía en la automoción, la presente investigación aborda la determinación de la capacidad de aceleración de un vehículo tipo go-kart provisto de un motor eléctrico. Las fuentes de energía aplicadas son baterías de Ion-Litio y de baterías de Níquel – Hidruro Metálico, cada una de ellas combinadas con dos configuraciones de relación de transmisión. Los resultados obtenidos en pista, comparados con un modelo matemático de dinámica vehicular, corroboran que la combinación más efectiva es la que utiliza baterías de Ion-Litio y una relación de transmisión de 2:1. La variación porcentual de los resultados de hasta el 16.68% se obtiene a través del programa Mat Lab – Simulink. Dicha variación, mayor en las simulaciones con relación de transmisión 1:1, se la atribuye al requerimiento inicial de energía a las baterías en el arranque del vehículo para vencer la inercia.

Palabras claves: Baterías de Níquel-Hidruro Metálico, baterías de Ion-Litio, go-kart, capacidad de aceleración, modelo de dinámica vehicular de capacidad de aceleración.



Ing. Robert Rockwood Iglesias

Coordinador de Carrera



Ing. Gustavo Alvarez Coello

Director del Trabajo de Titulación



Andres Fernando Idrovo Pauta

Autor

EVALUATION OF AN ELECTRIC GO-KART WITH ION-LITHIUM AND NICKEL BATTERIES - METALLIC HYDRIDE

ABSTRACT

In the transition context towards the use of electricity as a source of energy in the automotive industry, this investigation pretends to determine the acceleration capacity of a go-kart type vehicle equipped with an electric motor. The energy sources applied were Lithium-Ion and Nickel-Metal Hydride batteries, each one combined with two transmission ratio configurations. The results obtained in the track, compared with a mathematical model of vehicle dynamics, corroborates that the most effective combination was the one that uses Lithium-Ion batteries and a transmission ratio of 2:1. The percentage variation of the results up to 16.68% were obtained through the program Mat Lab - Simulink. This variation, which is greater in the simulations with a 1:1 transmission ratio, was attributed to the initial energy requirement of the batteries when starting the vehicle to overcome inertia.

Keywords: Nickel-Metal Hydride batteries, Lithium-Ion batteries, go-kart, acceleration capacity, acceleration capacity, vehicle dynamics model of acceleration capacity.



Eng. Robert Rockwood Iglesias

Faculty Coordinator



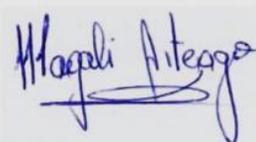
Eng. Gustavo Álvarez Coello

Thesis Director



Andrés Fernando Idrovo Pauta

Author



Translated by



Andres Idrovo

Evaluación de un go-kart Eléctrico Con Baterías de Ion-Litio y Níquel-Hidruro Metálico

Andres Fernando Idrovo Pauta

Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería en Mecánica Automotriz, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
andres110792@hotmail.com

Resumen— Enmarcados en la transición hacia el uso de la electricidad como fuente de energía en la automoción, la presente investigación aborda la determinación de la capacidad de aceleración de un vehículo tipo go-kart provisto de un motor eléctrico. Las fuentes de energía aplicadas son baterías de Ion-Litio y de baterías de Níquel – Hidruro Metálico, cada una de ellas combinadas con dos configuraciones de relación de transmisión. Los resultados obtenidos en pista, comparados con un modelo matemático de dinámica vehicular, corroboran que la combinación más efectiva es la que utiliza baterías de Ion-Litio y una relación de transmisión de 2:1. La variación porcentual de los resultados de hasta el 16.68% se obtiene a través del programa Mat Lab – Simulink. Dicha variación, mayor en las simulaciones con relación de transmisión 1:1, se la atribuye al requerimiento inicial de energía a las baterías en el arranque del vehículo para vencer la inercia.

Palabras claves: Baterías de Níquel-Hidruro Metálico, baterías de Ion-Litio, go-kart, capacidad de aceleración, modelo de dinámica vehicular de capacidad de aceleración.

Abstract— In the transition context towards the use of electricity as a source of energy in the automotive industry, this investigation pretends to determine the acceleration capacity of a go-kart type vehicle equipped with an electric motor. The energy sources applied were Lithium-Ion and Nickel-Metal Hydride batteries, each one combined with two transmission ratio configurations. The results obtained in the track, compared with a mathematical model of vehicle dynamics, corroborates that the most effective combination was the one that uses Lithium-Ion batteries and a transmission ratio of 2:1. The percentage variation of the results up to 16.68% were obtained through the program Mat Lab - Simulink. This variation, which is greater in the simulations with a 1:1 transmission ratio, was attributed to the initial energy requirement of the batteries when starting the vehicle to overcome inertia.

Keywords: Nickel-Metal Hydride batteries, Lithium-Ion batteries, go-kart, acceleration capacity, acceleration capacity, vehicle dynamics model of acceleration capacity.

I. INTRODUCCIÓN

La utilización de fuentes no convencionales de energía para el transporte es un tema de interés mundial. Si bien desde los inicios de la era del automóvil, en la disputa entre los vehículos con motores a combustión y los vehículos eléctricos, estos últimos quedaron rezagados debido a las limitaciones de autonomía de sus baterías, esta realidad empezó a cambiar a raíz de la aparición de los vehículos híbridos actuales, que dieron paso a la llegada de los vehículos eléctricos fundamentados en el hecho de que la autonomía de baterías mejoró notablemente y el precio de estas disminuyó aproximadamente un 85% en la última década[1].

En cuanto a los vehículos tipo go-kart, en 2010, el proyecto “The Cap Kart v2.0” del Massachusetts Institute of Technology, desarrolló un go-kart con un peso de 113 kg sin considerar el peso del conductor, el cual utilizaba un motor de 7.5 kW de potencia, alimentado por una batería de Ion Litio de 39.6 V, con 40Ah de capacidad conectada en serie a un ultra condensador de 110F a 16 V. Este go-kart, con una relación de transmisión fija de 3.2:1 alcanzaba una velocidad máxima de 64 km/h en 4.68 segundos [2] .

Desde el año 2014, enmarcada en la transición hacia un automovilismo ecológico [3], se origina la Formula E que es el equivalente de la Fórmula 1 para vehículos eléctricos. Cabe recalcar que desde entonces en la misma Fórmula 1 ya se implementa un sistema híbrido para la recuperación de energía llamado ERS el cual genera aproximadamente 160 HP adicionales durante 33 segundos por vuelta a través de unidades motor-generator, que aprovechan tanto la energía cinética de frenado, MGU-K, como la energía térmica que expelle el turbocompresor, MGU-H, almacenándola en baterías para luego aportar potencia adicional al vehículo mejorando su eficiencia [4].

En la categoría de go-kart de competición, a pesar de que principalmente este tipo de vehículos están equipados con motores de combustión, en Francia por ejemplo, los IUT siglas en francés para “Instituts Universitaires de Technologie”, junto con varias escuelas de ingeniería y escuelas secundarias vocacionales promueven específicamente el uso de un go-kart eléctrico como un apoyo educativo [5]. En 2018 Blue Shock Race, una empresa europea dedicada a la construcción de

equipamiento para go-karts eléctricos proporcionó un kit completo para el campeonato francés de e-karts, el cual incluía un motor Motenergy ME1118 de 4.5 kW de potencia nominal, el controlador SEVCON GEN4 de 48 V, la batería de Ion-Litio y el cargador para todos los competidores [6].

En el Ecuador, el impulso actual hacia el uso de vehículos híbridos y eléctricos por parte del gobierno, mediante la reducción de impuestos sobre esta tecnología [7], genera una amplia expectativa e impulsa al desarrollo local del conocimiento de este campo de la movilidad.

Teniendo como antecedente el trabajo de modificación realizado a un go-kart en la Universidad el Azuay en el que se sustituyó el motor de combustión interna de gasolina por uno eléctrico [8] se presenta la oportunidad de comparar dos fuentes de energía como son las baterías de Níquel-Hidruro Metálico en comparación con baterías de Ion-Litio.

Las baterías de Ion-Litio poseen una mayor densidad energética con respecto a las de Níquel-Hidruro Metálico aproximadamente en un 30% [9]. Se realiza para el presente artículo la comparación entre estas dos tecnologías mediante pruebas de capacidad de aceleración de un go-kart eléctrico.

En el estudio de la dinámica de un automóvil, la capacidad de aceleración está determinada por el tiempo que le toma a un vehículo llegar a determinada velocidad a partir de otra o del reposo, por ejemplo, se mide el tiempo transcurrido para que el vehículo alcance la velocidad de 50 km/h partiendo del reposo [10].

Al aplicar ecuaciones de fuerzas sobre el vehículo en sentido longitudinal, aparecen en primer lugar fuerzas resistivas y en oposición a estas fuerzas resistivas, está el esfuerzo tractor proporcionado por el motor. Si el esfuerzo tractor supera a las fuerzas resistivas habrá una fuerza neta que impulsará al vehículo con un movimiento uniformemente acelerado [11].

Siendo el objeto del presente estudio determinar la capacidad de aceleración, se utiliza una relación de transmisión fija y se justifica la aplicación de una relación de transmisión de reducción con el fin de ganar un mayor torque inicial, sacrificando la velocidad final que el vehículo podría llegar a alcanzar.

Por último, con la aplicación un modelo matemático de dinámica vehicular ajustado a las características de los componentes empleados en las pruebas de capacidad de aceleración como son principalmente el motor, las baterías, y las características físicas del go-kart, se pretende demostrar en que proporción es superior una tecnología de baterías con respecto a la otra de una manera teórica que sustente los resultados de las pruebas físicas.

II. MATERIALES Y EQUIPOS

A. Chasis

El chasis sobre el cual se trabaja es un FA Victory MA15 equivalente a un Original Tony Kart Racer 40 y en el que se realizaron las adecuaciones necesarias para que sea posible montar, tanto las baterías de Níquel-Hidruro Metálico, como las de Ion-Litio, de tal manera que los elementos de control estén ubicados de una manera segura para el conductor y para el funcionamiento del vehículo Fig. 1.

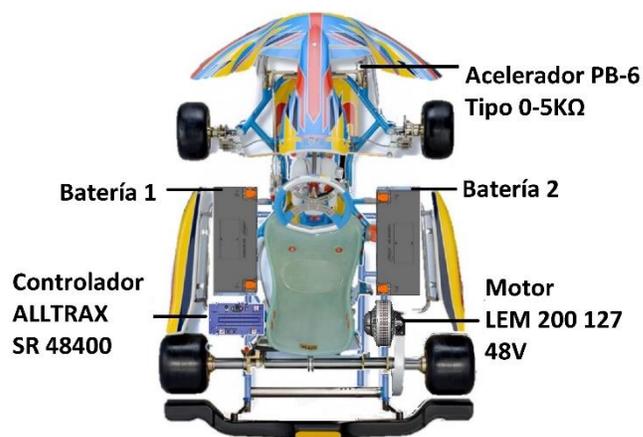


Fig. 1 Disposición de elementos en el chasis.

B. Baterías

Tal como puede apreciarse en la Fig. 2, las baterías de Ion-Litio tienen una mayor densidad energética, y energía específica con respecto a las baterías de Níquel-Hidruro Metálico. Estos dos tipos de baterías serán utilizados en las pruebas de capacidad de aceleración del presente artículo.

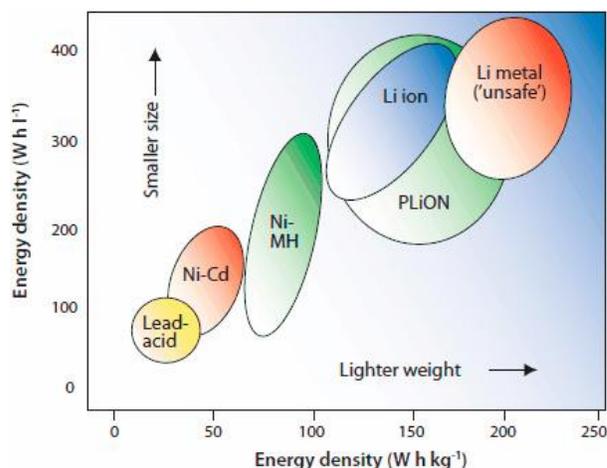


Fig. 2 Densidad de energía volumétrica en función de la densidad de energía másica de las baterías recargables [9].

1) *Baterías de Ion-Litio*: (Terminal positivo de aleación de níquel, manganeso y cobalto (NMC) y terminal negativo de grafito natural). Obtenidas de “Samsung SDI ESS 192S1P

Rack". Esta química de baterías es la más comúnmente aplicada en vehículos eléctricos como el Nissan Leaf, el Chevrolet Volt y los BMW i3 e i8 [12] aunque con diferente configuración en cuanto a la cantidad de celdas. Específicamente las baterías utilizadas en el presente proyecto, Fig. 3, tienen una capacidad de 68 Ah, un voltaje nominal de 58.4 V obtenidos de 2 módulos de 8 celdas cada uno conectados en serie. Cada celda aporta con 3.65 V de voltaje nominal y suman un peso total de 44 kg [13].



Fig. 3 Conjunto de baterías Níquel - Hidruro Metálico

2) *Baterías de Níquel-Hidruro Metálico:* (Terminal positivo de oxidróxido de níquel (NiOOH) y terminal negativo de aleación de hidruro metálico). Obtenidas del Toyota Prius de tercera generación y del cual se utilizaron 24 celdas de 7.2 V de voltaje nominal con una capacidad de 6.5Ah y un peso de 1040 gramos cada una.[14]. Para las pruebas, cada celda fue cargada individualmente obteniendo 7.2 V en cada una, para así poder armar 2 conjuntos de 12 celdas cada uno que sumen un voltaje de 57.6 V con una capacidad de 19.5 Ah tal como se muestra en las Fig. 4 y Fig. 5.



Fig. 4 Conjunto de baterías Níquel - Hidruro Metálico

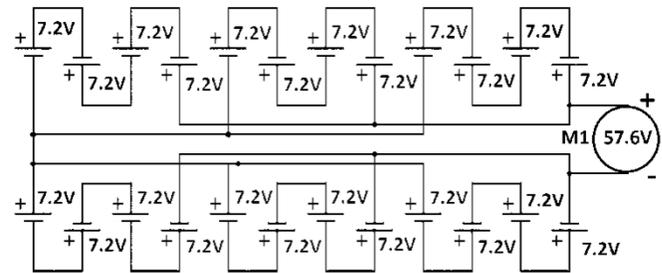


Fig. 5 Configuración de celdas de Níquel - Hidruro Metálico

C. Motor:

El motor que se utilizó es un LEM 200-127 de escobillas de 48 V el cual posee una potencia nominal de 8.55 kW y un torque nominal de 31.5 Nm a 2592 RPM [15].

D. Transmisión:

Se utilizan para las pruebas dos relaciones de transmisión fijadas mediante piñones conductores de 34 y 17 dientes y un conducido de 34 dientes para obtener relaciones de 1:1 y 2:1 respectivamente. La aplicación de estas relaciones de transmisión se justifica por la necesidad de comparar la configuración inicial con la que cuenta el go-kart, 1:1, frente a la relación 2:1, siendo esta última una propuesta de optimización en busca de una mejor aceleración, sacrificando la velocidad final del vehículo pues esta no es objeto del presente estudio.

E. Equipo de control

La energía proporcionada por las baterías se gestiona a través de un controlador de Motor de CC, Fig. 6, modelo Alltrax SR - 48400, el cual distribuye la corriente desde las baterías hacia el motor según la señal recibida desde un regulador de velocidad potenciométrico "Pot Box PB6", el cual tiene un rango de funcionamiento de 0-5 kΩ. La corriente para llegar al motor fluye a través de un contactor electromecánico de 48 V a 400 A y un fusible de 400A para CC [16].



Fig. 6 Alltrax SR - 48400

F. Equipo de obtención de datos

1) *GPS*: Para la obtención de la velocidad se utilizó un GPS VBOX Sport, Fig. 7, con una precisión de 0.01 km/h y una frecuencia de obtención de datos de 20 Hz [17].



Fig. 7 GPS VBOX Sport

2) *Alltrax Toolkit*: Para la obtención de los voltajes y corrientes de motor y batería a través del controlador se utiliza el software Alltrax Toolkit, Fig. 8, el cual es un Software compatible con el controlador de corriente Alltrax SR – 48400 y permite exportar dichos valores con una frecuencia de obtención de datos de 1 Hz [16].

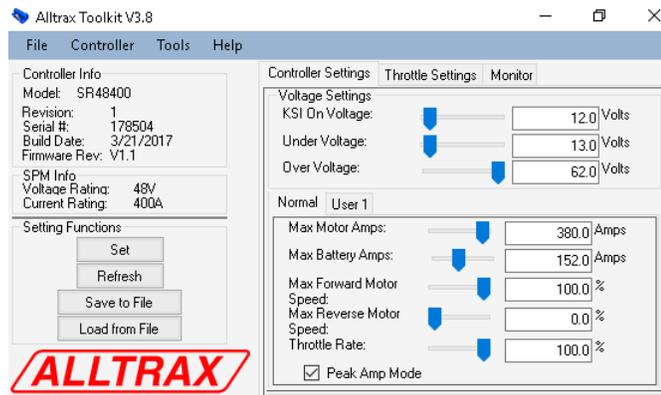


Fig. 8 Software Alltrax Toolkit

3) *Multímetro digital*: Con el fin de controlar que la descarga de las baterías no sea excesiva se instrumentó al go-kart con un multímetro digital ubicado justo atrás del volante para que sea de fácil visualización para el conductor.

III. METODOLOGIA

A. Armado de conjunto de baterías.

Para las baterías de Níquel-Hidruro Metálico se utilizó 24 celdas de baterías nuevas, pertenecientes al conjunto de baterías de un Toyota Prius de 2da generación, cuya configuración ya fue especificada en la Fig. 3 y de esta manera se obtuvo los 57.6 V requeridos.

Para las baterías de Ion-Litio, al ser selladas únicamente se constató su estado de carga y se las conectó en serie para obtener los 58.4 V requeridos.

B. Adecuación del chasis

Para que sea posible montar dos tipos de baterías con geometrías diferentes se utilizaron dos láminas de aluminio, ubicadas sobre el chasis a la izquierda y derecha del conductor. A dichas placas se les practicó agujeros para la sujeción de las baterías mediante pernos con contratuerca, así como para su propia sujeción contra el chasis. De la misma manera fijó el controlador de corriente al lado izquierdo del go-kart, quedando al lado derecho la base para el motor con agujeros que permitieron ajustar la distancia entre el eje del motor y el eje posterior donde están las ruedas motrices.

C. Montaje de elementos de transmisión.

Con el fin de poder utilizar dos relaciones de transmisión, se montó sobre el eje del motor dos elementos que porten los piñones conductores de 17 y 34 dientes respectivamente.

Para el montaje del piñón de 17 dientes se mecanizó el estriado central original del piñón de tal manera que sea posible montarlo sobre el eje liso con un solo chavetero del motor, así como utilizar su chaveta original. Para el montaje del piñón de 34 dientes se utilizó el elemento porta piñón con el que ya contaba el go-kart. Los piñones se muestran en la Fig. 9. Se utilizó estas relaciones de transmisión debido a que se analizó la diferencia entre la que se encontraba instalada, la relación de transmisión 1:1 con 2 piñones de 34 dientes y por otro lado, la relación de transmisión 2:1 con un piñón de fácil acceso en el mercado como es el de 17 dientes.



Fig. 9 Piñón 34 dientes y piñón 17 dientes mecanizado.

D. Instrumentación del go-kart

Se utilizó el puerto para conexión USB 2.0 del controlador de corriente Alltrax 48400 de donde se obtuvieron los datos de corrientes y voltajes de baterías y motor con una frecuencia de obtención de datos de 1 Hz. Se utilizó también un GPS para la obtención de datos de velocidad y posicionamiento del go-kart con una frecuencia de obtención de datos de 20 Hz. Debido a la limitación en cuanto a la frecuencia de obtención de datos

del controlador con respecto al GPS, fue necesario utilizar los datos del GPS con una frecuencia de 1 Hz limitando su capacidad.

El diagrama de conexión de los componentes utilizados en el go-kart se muestra en la Fig. 10 [16].

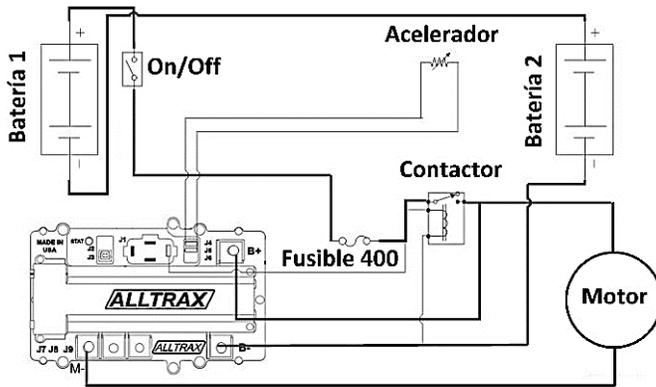


Fig. 10 Diagrama de conexión de componentes

E. Obtención del área frontal.

A través del programa Autodesk Inventor, partiendo de una fotografía tomada perpendicular al suelo y paralela al frontal del vehículo, se realizó la determinación del área frontal mediante el área proyectada del vehículo y tomando como medida de referencia que la trocha delantera mide 1230 mm. El área frontal obtenida es de 0.907 m². El área se indica en las Fig. 11 y Fig. 12.



Fig. 11 Área frontal fotografía

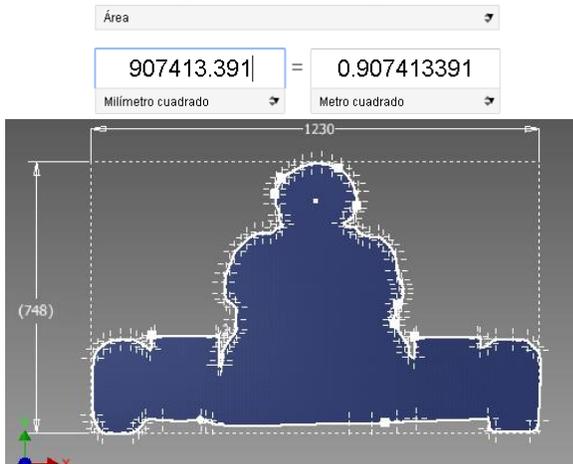


Fig. 12 Área frontal dibujada

F. Pesaje del vehículo y del conductor

Se realizó el pesaje del go-kart pues dicho valor es requerido en el modelo de dinámica vehicular. Al vehículo con un peso de 111.5 kg incluido baterías, como se indica en la Fig. 13. Se le sumó el peso de 70 kg del conductor, con lo que el peso total alcanzó los 181.5 kg



Fig. 13 Peso del go-kart incluyendo baterías.

G. Determinación de la capacidad de aceleración

Mediante la aplicación del numeral 9.1.4 del protocolo de pruebas SAE J1491:2006 "Acceleration Response Time" donde el objetivo es determinar el tiempo que le toma al vehículo alcanzar las 30 mph (48.3 km/h) se determinó la capacidad de aceleración de cada combinación de baterías y relación de transmisión a través de las mediciones del GPS.

H. Aplicación del modelo de dinámica vehicular.

Para la aplicación del modelo de dinámica vehicular de capacidad de aceleración se definió, como se indica en la TABLA I, las constantes físicas que describen tanto al vehículo como a su entorno.

TABLA I

CONSTANTES Y SIMBOLOGIA UTILIZADA

Constante	Símbolo	Valor	Unidad
Área Frontal	A	0.907	m ²
Coefficiente de resistencia a la rodadura	f_r	0.025	[-]
Coefficiente de resistencia al arrastre	C_d	0.8	[-]
Densidad del aire	ρ_a	0.93	kg/m ³
Eficiencia transmisión	η_{td}	0.90	[-]
Gravedad	g	9.81	m/s ²
Masa	M	181.5	kg
Angulo de pendiente	θ	0	°
Radio Dinámico	R_d	0.129	m
Torque constante de motor según la corriente	T_c	0.15	Nm/A

Por otro lado la simbología utilizada para definir las variables se indica en la TABLA II

TABLA II

VARIABLES Y SIMBOLOGIA UTILIZADA

Variables	Símbolo	Unidad
Aceleración	a	m/s^2
Fuerza en rueda	Fr	N
Fuerza de arrastre	Fd	N
Fuerza de resistencia a la rodadura	Rx	N
Fuerza de resistencia a la pendiente	Rg	N
Inercia	Ri	N
Masa equivalente	me	Kg
Relación total de transmisión	Ntd	[-]
Torque de motor	τm	Nm

En el modelo de dinámica vehicular aplicado, la velocidad $V [m/s]$, se obtiene de la integral de la aceleración a , del diagrama de fuerzas que intervienen en el movimiento del vehículo[20].

De esta manera, partiendo de la ecuación para la Fuerza en rueda, Fx [20], ésta se expresa como:

$$Fx = Fd + Rx + Rg + Ri \quad (1)$$

La Fuerza en rueda también está determinada por:

$$Fx = \frac{\tau m * Ntd * \eta td}{Rd} - me * a \quad (2)$$

De la ecuación (2), la masa equivalente de los elementos que se encuentran en rotación (me) está determinada por [20]:

$$me = M * mf - M \quad (3)$$

A su vez el factor de masa, mf , que por definición es la combinación de la masa efectiva y la masa equivalente [20], está determinado por:

$$mf = 1 * 0.04 * 0.0025 Ntd^2 \quad (4)$$

De la ecuación (1), la fuerza de arrastre (Fd), la fuerza de resistencia a la rodadura (Rx), la fuerza de resistencia a la pendiente (Rg), y la inercia (Ri) están determinadas por[20]:

$$Fd = \frac{1}{2} Cd * A * \rho a * V^2 \quad (5)$$

$$Rx = M * g * fr * Cos \theta \quad (6)$$

$$Rg = M * g * Sen \theta \quad (7)$$

$$Ri = M * a \quad (8)$$

Reemplazando (3) en (2) se obtiene:

$$Fx = \frac{\tau m * Ntd * \eta td}{Rd} - (M * mf * a) + (M * a) \quad (9)$$

Reemplazando (5), (6), (7), (8) y (9) en (1) se obtiene la aceleración a quedando como expresión final:

$$a = \frac{\frac{\tau m * Ntd}{Rd * \eta td} - \left(\frac{A * V^2}{2(Cd * \rho a)^{-1}} \right) - \left(\frac{fr * Cos \theta}{(M * g)^{-1}} \right) - \left(\frac{Sen \theta}{(M * g)^{-1}} \right)}{(M * mf)} \quad (10)$$

Los valores de Torque de motor (τm) se obtienen de una tabla $[\omega, \tau m]$ en la que cada valor de torque tiene una velocidad angular correspondiente en RPM.

Por un lado, esta velocidad angular fue obtenida de la velocidad lineal del vehículo (obtenida del GPS) en función de su radio dinámico. El valor de ω sirve para consultar su correspondiente τm [20] se obtienen de:

$$\omega = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{60V}{2\pi R d} \right) * Ntd \right) \quad (11)$$

Donde V corresponde a cada uno de los valores de velocidad obtenidos de la simulación.

El torque de motor (τm) se obtienen de:

$$\tau m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C * Tc) \quad (12)$$

Donde C corresponde a los valores medidos de corriente de motor en amperios obtenidos en cada prueba a través del software Alltrax Toolkit del controlador de corriente.

En la Fig. 14 se ilustra el modelo de dinámica vehicular aplicado en Mat Lab – Simulink.

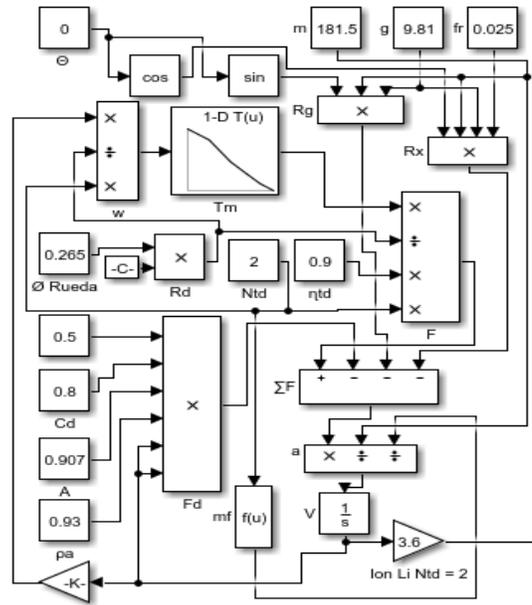


Fig. 14 Modelo de dinámica vehicular - Mat Lab - Simulink

IV. RESULTADOS

Las pruebas se realizaron en un tramo de asfalto de 50 m de longitud, plana y sin pendiente como se muestra en la Fig. 15.



Fig. 15 Pista para pruebas de go-kart

Se realizaron 10 pruebas con las baterías de Ion-Litio con cada relación de transmisión y 4 pruebas con las baterías de Níquel-Hidruro Metálico con cada relación de transmisión. Las capacidades de aceleración según la configuración de tipo de baterías y relación de transmisión alcanzadas se presentan en la Tabla III. La precisión de obtención de datos de la velocidad es de ± 0.01 km/h.

TABLA III

RESULTADOS DE CAPACIDAD DE ACELERACION SEGÚN LA RELACION DE TRANSMISION

Ntd	Ion-Litio		Níquel – Hidruro Metálico	
	Velocidad (km/h)	Tiempo. (s)	Velocidad (km/h)	Tiempo. (s)
2	45.64 \pm 0.37	4.92 \pm 0.07	23.18 \pm 0.31	4.75 \pm 0.20
1	27.67 \pm 0.06	4.68 \pm 0.15	15.59 \pm 0.27	4.50 \pm 0.29

Tomando como referencia la combinación de baterías de Ion-Litio con la relación de transmisión 2:1 con la cual, la capacidad de aceleración obtenida fue de 45.64 \pm 0.37 km/h en 4.92 \pm 0.07 segundos, las otras combinaciones utilizadas presentan, en comparación con la primera, una menor capacidad de aceleración en un intervalo de tiempo similar.

De esta manera, si en lugar de utilizar la relación de transmisión de 2:1 se utiliza una 1:1 se reduce la velocidad alcanzada un 40%. Si en lugar de reemplazar la relación de transmisión se reemplazan las baterías de Ion-Litio por baterías de Níquel-Hidruro Metálico se reduce la velocidad alcanzada un 49%. Por último, si se reemplazan tanto la relación de transmisión de 2:1 a 1:1 y las baterías de Ion-Litio por baterías de Níquel-Hidruro Metálico reduce la velocidad alcanzada un 65%.

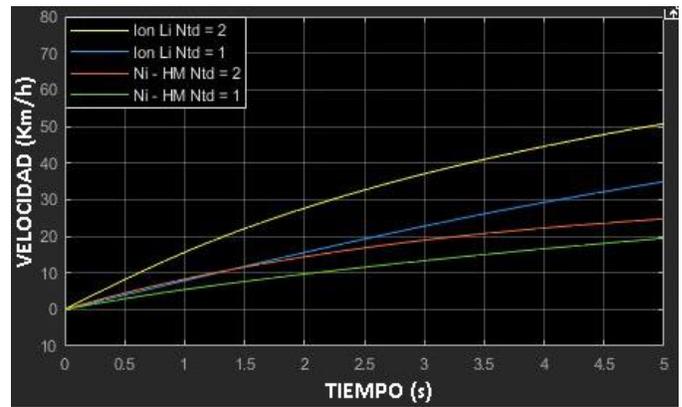


Fig. 16 Curvas de modelo de dinámica vehicular en 5 segundos

Con respecto al modelo de dinámica vehicular las curvas de velocidad están simuladas para un tiempo de 5 segundos, como se indica en la Fig. 16, en la cual el tiempo en segundos está en el eje de las abscisas y la velocidad en km/h en el eje de las ordenadas.

Las diferencias entre los resultados medidos con respecto a los obtenido en 5 segundos tanto en la simulación como en las pruebas prácticas se expresan porcentualmente en la Tabla IV.

TABLA IV

DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE VELOCIDAD MEDIDA Y VELOCIDAD CALCULADA SEGÚN MODELO

Ntd	ION-LITIO			NÍQUEL - HIDRURO METÁLICO		
	V Calculada (km/h)	V Medida (km/h)	$\Delta\%$	V Calculada (km/h)	V Medida (km/h)	$\Delta\%$
2	50.28	45.64	9.23%	24.16	23.18	4.06%
1	33.21	27.67	16.68%	18.05	15.59	13.63%

Las curvas de toque – velocidad angular utilizadas en el modelo de dinámica vehicular se muestran en la Fig. 17.

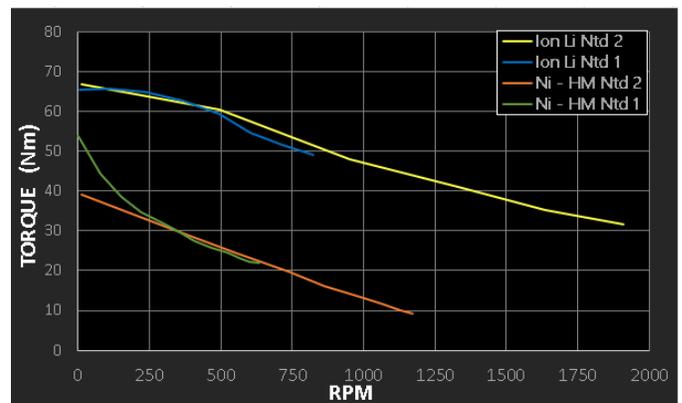


Fig. 17 Curvas de Torque – Velocidad angular en el piñón conducido

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando los resultados de capacidad de aceleración obtenidos en pista, comparados con los que se obtiene del modelo de dinámica vehicular se puede afirmar que el modelo predice los resultados de la velocidad alcanzada con una variación porcentual de hasta un 16.68%, corroborando que la más efectiva de las combinaciones es la que utiliza las baterías de Ion-Litio y una relación de transmisión de 2:1.

Se consideró como eficiencia total de transmisión el 90% según la bibliografía consultada asumiendo que esta eficiencia representa posibles falencias en la óptima alineación y montaje del piñón del eje conductor con respecto al piñón del eje conducido y generando esfuerzos resistivos no deseados en la cadena de transmisión.

La variación porcentual de los resultados obtenidos en las pruebas y en la simulación, mayor en la relación de transmisión 1:1 con respecto a la relación de transmisión 2:1, se la atribuye al requerimiento inicial de energía a las baterías en el arranque del vehículo para vencer la inercia.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Cuenca que aportó al proyecto con el préstamo de las baterías de Ion-Litio. Al Ing. Daniel Cordero, PhD., por su soporte y tutoría en la aplicación del modelo matemático de dinámica vehicular y al Ing. Efrén Fernández, PhD., por su colaboración y supervisión en los procesos de carga de las baterías. Por último, pero no menos importante mis más sinceros agradecimientos al Ing. Gustavo Álvarez por su asesoría y acompañamiento en cada etapa de la realización de este artículo.

VII. REFERENCIAS

- [1] J. Castells, “Los precios de las baterías llegan a mínimos históricos en 2018,” 2018.
- [2] J. Starcher, E. Moriarty, K. Colton, and S. Banzaert, “The Cap Kart (v2.0),” 2010. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/first/kart/#specs>.
- [3] W. Golebiowski and P. law Kubiak, “Analysis of Vehicle Dynamics Parameters for Electric Go-Kart (eKart) Design,” vol. 21, no. 3, 2017.
- [4] D. Madier, “THE FORMULA 1 HYBRID POWER UNITS 2014-2015,” *F1-Forecast*. pp. 10–15, 2015.
- [5] T. Lequeu, B. Bidoggia, Y. Derrien, and N. Godefroy, “Two Examples of Pedagogical Applications of Electrical Go-Karts Keywords,” 2007.
- [6] K. Stumps, “¡Primer lugar para Harald en un kart eléctrico!” 2019. [Online]. Available: [https://www.e-kart.fr/1605-first-place-for-harald-on-an-electric-go-](https://www.e-kart.fr/1605-first-place-for-harald-on-an-electric-go-kart)

kart.

- [7] M. A. Castillo and D. Serrano, “240 Vehículos Eléctricos Circulan En El País,” *D. El Comer.*, 2018.
- [8] A. Luzuriaga, “Adecuación de un tren motriz de un go kart de combustión interna a una de propulsión eléctrica provista de baterías de Ni MH,” 2018.
- [9] I. Mártil, “Baterías de ion-litio: pros y contras,” 2019. [Online]. Available: <https://blogs.cdecomunicacion.es/ignacio/2019/03/20/baterias-de-ion-litio-pros-y-contras/>.
- [10] M. Cassani, “Marcelo Cassani ’ s Blog,” pp. 8–11, 2010.
- [11] A. Mozota, “EL MOVIMIENTO DE LOS VEHÍCULOS.” 2011.
- [12] Vertiv, “El Surgimiento De Las Baterías De Iones De Litio En Los Centros De Datos,” 2017.
- [13] SAMSUNG SDI CO LTD, “Energy Storage System for home.” 2015.
- [14] Primearth EV Energy Co Ltd, “Módulo de batería NP2.” 2019.
- [15] Lynch Motor Company Ltd, “MOTORS LEM-200 Overview Data.” 2016.
- [16] “Operators Manual Alltrax SR 48-400,” 2017.
- [17] “VBOX Sport Datasheet.” .
- [18] D. Pabón, “Diseño de un kart de pista,” 2012.
- [19] L. Vanegas, “Introducción a los accionamientos de máquinas,” pp. 1–30, 2012.
- [20] T. D. Gillespie, *Fundamentals of vehicle dynamics Analysis*. 1992.