

Diseño y simulado del sistema de propulsión de un triciclo eléctrico

Yamir Sánchez Torres

correo electrónico: yamir@tesla.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Artículo Original

Resumen

Los vehículos eléctricos son una opción a tener en cuenta para sustituir sus homólogos de combustión, y así disminuir la actual dependencia de los combustibles fósiles. El trabajo trata sobre el diseño y simulado del sistema de transmisión de un triciclo eléctrico. En el desarrollo se obtuvo una ecuación para describir la dinámica del movimiento del vehículo, mediante la cual fue posible caracterizar el desempeño del mismo, haciendo uso del programa de simulación Matlab®R2013b. Como resultado se muestran las gráficas de fuerza tractiva contra velocidad y las de velocidad y distancia recorrida con respecto al tiempo. Se realizó una comparación del consumo energético y la autonomía de la versión eléctrica con respecto a la original, con motor de combustión interna de gasolina.

Palabras claves: simulación, triciclo eléctrico, consumo energético, autonomía

Recibido: 29 de septiembre del 2016 Aprobado: 5 de enero del 2017

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de las naciones debe primeramente establecer políticas encaminadas a reducir la dependencia del petróleo. En este sentido, la industria del automóvil se encuentra en un proceso de reestructuración en pos de las energías limpias, donde la aparición del vehículo eléctrico (VE) es un claro ejemplo [1]. Actualmente existe una variada gama de vehículos eléctricos en el mercado, no obstante la oferta de la gama de pequeño formato es muy reducida y las opciones posibles tienen una pobre autonomía. En Cuba, existen desde hace algunos años los triciclos de combustión, los cuales se emplean en las oficinas postales, en la empresa de reciclaje de materias primas y existe un grupo muy peculiar que son los Cocotaxis.

El vehículo eléctrico no emite gases contaminantes y su contaminación acústica es muy reducida, por lo que resulta idóneo para el transporte de personas dentro de las ciudades. Por otra parte se tiene que es necesaria la sustitución del motor y la transmisión en la mayoría de estos equipos que están en explotación hoy en día, debido a las abundantes roturas por su prolongado uso.

Por lo anterior, en este trabajo se diseña y evalúa un sistema de tracción eléctrico de baterías capaz de sustituir a los sistemas actuales con motor de combustión interna de gasolina que equipan los mismos, con semejantes prestaciones, relacionada con la autonomía, la cual

depende de la capacidad de las baterías y el consumo energético del motor, pues dividiendo la capacidad de las baterías entre el consumo se puede tener una aproximación de la autonomía [1,2].

MATERIALES Y MÉTODOS

En este acápite se calculan las principales fuerzas de resistencia al movimiento presentes en el Cocotaxi con motor de combustión interna de gasolina y con motor eléctrico, para así obtener la característica tractiva de cada uno, para compararlas, y así evaluar si es favorable la conversión desde el punto de vista de la dinámica del vehículo [3, 4].

Fuerza de resistencia a la rodadura:

$$F_{rr} = f_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta \quad (1)$$

$$f_{rr} = f_o + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2,5} \quad (2)$$

El cálculo de f_{rr} está basado en resultados experimentales. En este trabajo se seleccionó un valor para el mismo de 0,010 [3].

Fuerza de resistencia aerodinámica:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot (v \mp v_v)^2 \cdot C_x \cdot A \quad (3)$$

Fuerza debida a la pendiente:

$$F_{\alpha} = G_T \cdot \sin\theta \quad (4)$$

Una vez definidas las expresiones de las fuerzas de resistencia al movimiento del vehículo se pasa a determinar la característica tractiva [3]. Para obtener los valores de fuerza tractiva (F_T) para cada una de las relaciones engranadas se usa la expresión:

$$F_T = \frac{M_T \cdot \eta_T}{rd \cdot i_{CT}} \quad (5)$$

El radio dinámico puede calcularse por medio de la expresión (6). Para vehículos ligeros suele tomarse el valor de deformación λ entre 0,12 y 0,14 [3].

Los valores de altura del perfil del neumático (b) y el diámetro de la llanta (d) son usados para calcular el radio dinámico (r_d).

$$r_d = \left[\frac{d}{2} + b(1 - \lambda) \right] 0,0254 \quad (6)$$

El diámetro de la rueda del triciclo es de 12 pulgadas y el perfil es de 5, el radio dinámico es de 0,26 m.

Para calcular la relación de transmisión total del sistema (i_{CT}), se utiliza la siguiente expresión [3]:

$$i_{CT} = i_{CV} i_{PP} \quad (7)$$

Fuerza máxima de tracción:

Cuando la fuerza tractiva máxima ($F_{T_{m\acute{a}x}}$), excede a la fuerza de adherencia máxima entre el neumático y superficie de rodadura ($F_{T_{m\acute{a}x}}$), las ruedas patinan, y toda la potencia del motor se pierde en rozamiento entre el neumático y el camino. Esto es una limitante en la selección del grupo propulsor. Para que no exista patinaje debe cumplirse que $F_{T_{m\acute{a}x}} < F_{\mu_{m\acute{a}x}}$ [3].

$$F_{\mu_{m\acute{a}x}} = \mu_{m\acute{a}x} \cdot G_T \quad (8)$$

Los valores de los coeficientes de adherencia son experimentales y dependen del terreno, siendo el de neumático sobre asfalto seco de 0,8. Una vez garantizada la adherencia, la velocidad que puede alcanzar el vehículo (v), en kilómetros por horas se puede calcular por la expresión (9) [3]:

$$v = 0,377 \cdot rd \cdot i_{CT} \cdot n_m \quad (9)$$

Para que se produzca el movimiento de la máquina debe cumplirse que la fuerza tractiva sea capaz de vencer todas las fuerzas de resistencia al movimiento, o sea [3]:

$$F_T > F_{RR} + F_{\alpha} + F_{RA} + F_i \quad (10)$$

En este caso, este tipo de vehículo no está diseñado para remolcar ningún implemento, por lo que la fuerza de resistencia del implemento (F_i), en la expresión (10) se desprecia. Luego la fuerza de inercia (F_i), puede calcularse mediante la expresión (11):

$$F_i = m_T \cdot a \quad (11)$$

Mediante la fórmula (12) se obtienen los valores de aceleración para distintos puntos [3]:

$$a = \frac{F_T - F_{RA} - F_{RR}}{G_T \cdot \delta_m} \cdot g \quad (12)$$

Para calcular el coeficiente de las masas reducidas (δ_m), cuando no se conocen los momentos de inercia de las diferentes piezas del sistema de transmisión y ruedas, se puede acudir a la siguiente expresión empírica simplificada (13). A: Constante empírica con valores entre 0,04-0,06 [3, 4].

$$\delta_{mi} = 1,04 + \frac{A}{(i_{CV})^2} \quad (13)$$

Luego el factor dinámico máximo ($D_{m\acute{a}x}$), que caracteriza la capacidad tractiva del vehículo, puede determinarse por la expresión (14) [3]:

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{F_{T_{m\acute{a}x}}}{G_T} \quad (14)$$

Para la determinación de la pendiente máxima de ascenso se utiliza [3]:

$$\alpha_{m\acute{a}x} = \tan^{-1}(D - f_{RR}) \quad (15)$$

Obtención de la característica tractiva del Cocotaxi de gasolina:

En este caso el sistema de transmisión y el bastidor, corresponden al triciclo marca Piaggio, modelo Ape TM. Para conocer la curva característica exterior de velocidad del motor, se recurrió a graficar los valores expresados en el catálogo del fabricante [5]. Dicha característica se muestra en la figura 1. También se pueden apreciar las especificaciones técnicas de fábrica del triciclo en la tabla 1 [5].

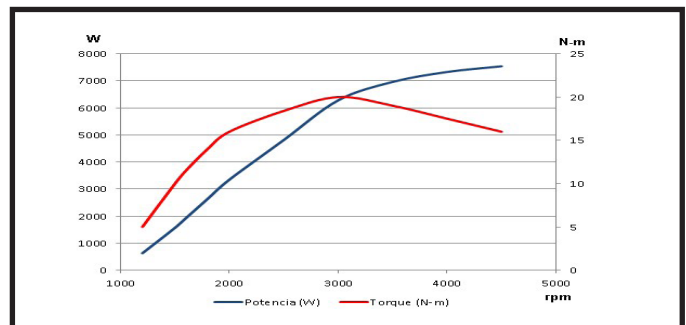


Fig. 1. Característica exterior de velocidad del motor de gasolina.

Tabla 1 Características técnicas del Cocotaxi con sistema de transmisión del triciclo PiaggioApe TM			
Datos Cocotaxi de gasolina			
C_x	0,25	A_T	1,93 m ²
Ancho	1,48 m	$m_{\text{ocupantes}}$	240,00 kg
Altura	1,63 m	$*F_{\mu_{\text{máx}}}$	6317,64 N
f_{rr}	0,01	B	0,80
G_{total}	7 897,05 N	ρ_a	1,22 kg/m ³
$m_{\text{vehículo}}$	565,00 kg	M_{total}	805,00 kg

*Valor de $F_{\mu_{\text{máx}}}$ para el vehículo con todas las plazas ocupadas.

Una vez conocidos los valores de las resistencias al movimiento, para cada una de las velocidades que toma el triciclo, en cada una de las cuatro marchas engranadas, se pasa a construir la característica tractiva, la cual se puede apreciar en la figura 2 [3].

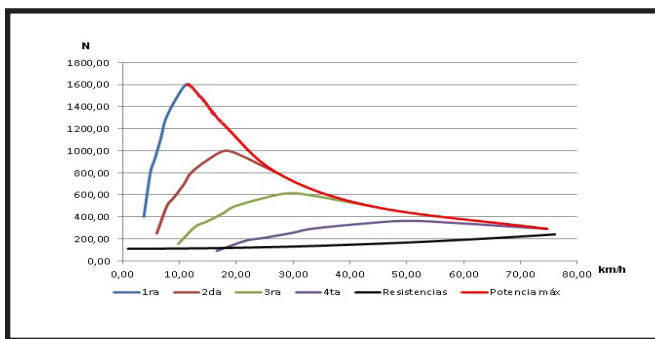


Fig. 2. Característica de velocidad del Cocotaxi con motor de gasolina.

En la figura 2 también se muestra la hipérbola de potencia constante (línea de color rojo), así como la suma de las resistencias al camino y aerodinámica (línea de color negro) [3, 4].

En el caso de la fuerza tractiva máxima, corresponde a la primera marcha y a unas revoluciones de 3 000 rpm del motor y su valor es de 1 600 N (figura 2). Esto corresponde a 800 N por cada rueda tractiva trasera y se queda muy por debajo del valor de la fuerza de adherencia máxima, la cual es de 5 061,96 N.

Fue necesario obtener la posición horizontal del centro de gravedad [6], la cual se encuentra a 900 mm del eje trasero, teniendo en cuenta el vehículo ocupado solo por el chofer, como se muestra en la figura 3. Este valor se obtuvo mediante las reacciones R_t con valor de 3 954,65 N y R_d de 2 372,80 N, haciendo momento así en la rueda delantera se tiene la distancia del centro de gravedad al puente trasero. Por otro lado, la reacción trasera por cada rueda es de $3 954,65/2=1977,32$ N, mayor que los 800 N de fuerza tractiva, siendo $F_{\mu_{\text{máx}}} > F_T$ por lo que no hay patinaje.

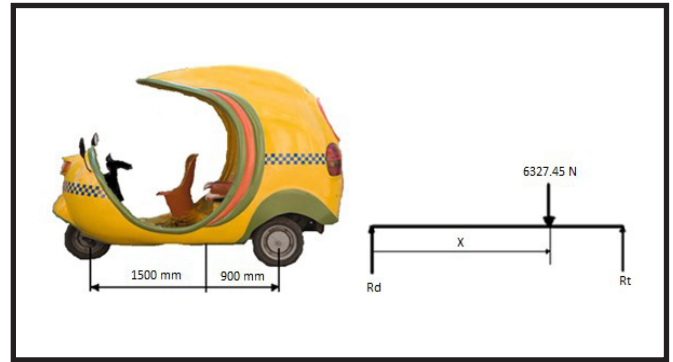


Fig. 3. Posición horizontal del centro de gravedad del Cocotaxi de gasolina y diagrama de cargas.

Obtención del ángulo de pendiente máxima a ascender [3]:

Desarrollando las ecuaciones (14) y (15) se puede obtener el ángulo de pendiente máxima del camino que puede ascender, en este caso 10,92°.

Aceleración máxima posible a obtener [3]:

Para tener una idea de la aceleración máxima, en primera velocidad, se puede recurrir a la ecuación (12), la cual es de 0,21 m/s².

Obtención de la característica tractiva del Cocotaxi eléctrico:

Para la obtención de la característica tractiva del triciclo eléctrico, se parte de las mismas deducciones y ecuaciones matemáticas utilizadas para el cálculo del triciclo de gasolina.

El motor eléctrico seleccionado para sustituir el de gasolina es de 5 kW trabajando a 48 V, con un peso de 11kg, modelo HPM48-5 000, de la marca Golden Motors, es del tipo de corriente directa sin escobillas (BLDC). En la figura 4 se ha representado el comportamiento del torque y la potencia del mismo en función de las revoluciones por minutos [7, 8].

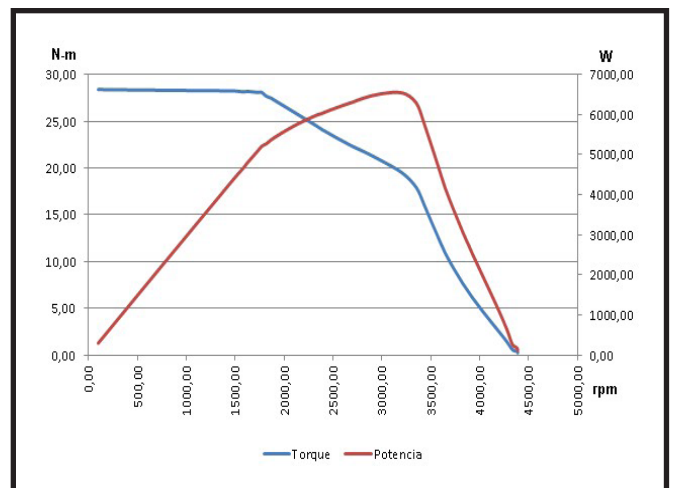


Fig. 4. Comportamiento del torque y la potencia en función de la frecuencia de rotación.

Para proporcionar la energía necesaria en el vehículo, se van a utilizar ocho baterías de 12 V cada una y 90 Ah de capacidad, de ciclo profundo, cada una con un peso de 30 kg, por lo que en total suman 240 kg. No obstante, en el momento de la conversión, al vehículo se le sustraen los 55 kg del motor de gasolina y la transmisión, se eliminan también el depósito de gasolina, de aceite, la batería y algunos accesorios que en total suman 85 kg, lo que en general hace que de los 240 kg que se sumarían de las baterías en realidad solo se adicionen 155 kg. Las baterías se conectan cuatro en serie, y cuatro en paralelo, de esta forma se cuenta con un banco de 48V y 360Ah, todo lo cual brinda una energía máxima de 17 280 Wh pico [8, 9].

Luego, las características dinámicas del triciclo, tales como el peso total y la posición horizontal del centro de gravedad, difieren en comparación con las del de gasolina. El peso total del eléctrico tan solo ocupado por el chofer, es de 7 955,91 N, o sea, una masa de 811,7 kg, aproximadamente 166 kg más que en el de gasolina. Con estos valores se evidencia que el centro de gravedad se traslada 30 cm a la derecha con respecto a la posición que el mismo tenía en el vehículo de gasolina, acercándose al eje trasero, por lo que es favorable para la tracción, las reacciones de los ejes son $R_g = 1\,988,98\text{ N}$, $R_f = 5\,966,93\text{ N}$ [6].

Una vez seleccionado el motor con su curva de funcionamiento, se pasa a calcular los valores de resistencia al movimiento (tabla 2), tal como se hizo para el de gasolina, sustituyendo los valores del triciclo eléctrico, representados en la tabla 3.

Con los valores de las resistencias al movimiento y la característica del motor, se puede pasar a obtener la característica de velocidad del triciclo eléctrico, la cual se muestra en la figura 5.

En la característica de velocidad se observa que en ella se representa una sola curva de fuerza tractiva, de color azul, lo que significa que este vehículo no cuenta con diferentes relaciones de transmisión, sino con una relación de transmisión de valor 0,15, o sea, por cada 10 vueltas del motor la rueda tractiva da una vuelta y media. El motor eléctrico es capaz de asumir todo el rango de velocidades, venciendo las fuerzas de resistencia al movimiento, curva de color rojo. Es de destacar que en este caso no existen zonas de ausencia de potencia.

La intersección de las dos curvas en un punto cercano a los 60 km/h representa que este vehículo es capaz de llegar a una velocidad máxima de más de 55 km/h y posee un valor de fuerza tractiva máxima de 655 N, que divididos entre las dos ruedas motrices dan una fuerza de 327,5 N en cada una, los cuales deben compararse con la fuerza de adherencia máxima del Cocotaxi solo ocupado por el chofer, sin pasajeros, para garantizar que en el momento de salida, con máxima aceleración no ocurra patinaje, mediante la ecuación (3), tal y como se muestra a continuación [3, 4, 9].

$$F_{\mu_{\max}} = G_T \cdot \mu_{\max} \geq F_T$$

$$F_{\mu_{\max}} = 9\,525,51 \cdot 0,8 = \frac{7\,620,40}{2} = 3\,810,20\text{ N}$$

$$F_{\mu_{\max}} (\text{De cada rueda}) = 3\,810,20\text{ N} \div F_T = 327,5\text{ N}$$

Tabla 2

Valores obtenidos de las fuerzas de resistencia al movimiento del Cocotaxi eléctrico

Velocidad km/h	Frecuencia rotación rpm	Fuerza Tractiva N	Potencia Tractiva W	Fra N	Frr N	ΣF N	Potencia Resistiva W
1,00	69,00	655,40	182,06	0,02	95,26	95,28	26,47
10,00	680,00	653,71	1 815,83	2,27	95,26	97,53	270,91
20,00	1420,00	651,93	3 621,67	9,09	95,26	104,34	579,68
30,00	2 045,00	606,82	5 056,67	20,45	95,26	115,70	964,19
40,00	2 705,00	514,45	5 715,56	36,35	95,26	131,61	1 462,28
50,00	3 405,00	372,81	5 177,78	56,80	95,26	152,05	2 111,84
60,00	4 110,00	111,02	1 850,00	81,79	95,26	177,04	2 950,73

Tabla 3

Datos del triciclo con motor eléctrico

Datos Cocotaxi eléctrico			
Cx	0,25	m_{motor}	11,00 kg
Ancho	1,48 m	$m_{\text{ocupantes}}$	240,00 kg
Altura	1,63 m	$F_{\mu_{\max}}$	7620,41 N
frr	0,01	B	0,80
i_{CT}	0,15	μ	0,80
η_T	0,90	$m_{\text{baterías}}$	240,00 kg
$m_{\text{vacío}}$	731,00 kg	m_T	971,00 kg

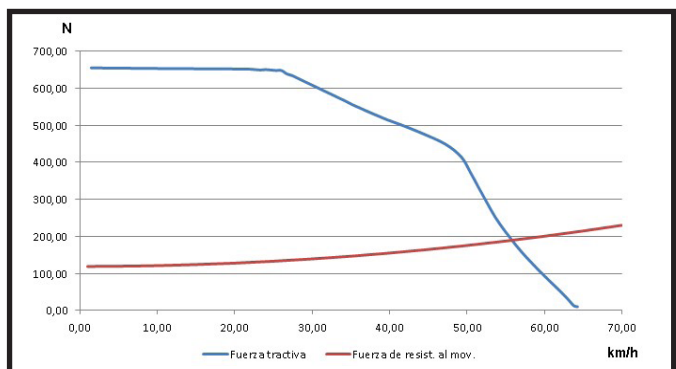


Fig. 5. Característica tractiva del Cocotaxi eléctrico.

Al observar que la $F_{\mu_{\max}}$ es mucho mayor que la F_t de cada rueda, se puede asegurar que no habrá patinaje en terreno asfaltado, con coeficiente de adherencia de $\mu=0,8$, pero incluso en un terreno tan desfavorable como la tierra mojada, con un coeficiente de adherencia de $\mu=0,35$, se tiene que la $F_{\mu_{\max}}=1\,666,9\text{ N}$; por lo que en un camino de tierra mojada, la fuerza tractiva de adherencia máxima en cada rueda sería de $1\,666,9\text{ N}$, mucho mayor que los $327,5\text{ N}$ de fuerza tractiva capaz de dar la transmisión, por lo que tampoco habrá patinaje. Esto es favorable pues así este triciclo puede ser usado también en zonas rurales [3, 4].

Observando la característica tractiva, pudiera pensarse que el motor de 5 kW está sobredimensionado, pues la suma de las fuerzas de resistencia a la rodadura y aerodinámica nunca superan los 200 N en todo el rango de velocidades, pero esto no es del todo real, pues esa gran fuerza tractiva del motor es necesaria para vencer la inercia y la fuerza producto del ascenso de pendientes. Para comprobar en realidad el comportamiento del triciclo eléctrico, se recurre a modelar la dinámica del mismo [10].

En primer lugar se tiene la ecuación diferencial de primer orden (16), la cual relaciona todos los coeficientes necesarios a tener en cuenta en el cálculo en el desempeño del vehículo [6, 10].

$$\frac{M_T}{r_d \cdot i_c} \eta_T = f_r G_T + 0,5 \rho A_T C_x (V)^2 + \left[m_T + I \frac{(i_c)^2}{\eta_T (rd)^2} \right] \frac{dV}{dt} \quad (16)$$

Al no conocerse a ciencia cierta el valor del momento de inercia del motor eléctrico "I", tampoco el de las ruedas ni el del mecanismo de engranajes del diferencial en la ecuación (16), se puede sumar un 5% a la masa del vehículo [4], expresión (17).

$$\frac{M_T}{r_d \cdot i_c} \eta_T = f_r G_T + 0,5 \rho A_T C_x (V)^2 + [m_T + (m_T 0,05)] \frac{dV}{dt} \quad (17)$$

Luego, con algunas transformaciones a la ecuación (17) se llega a (18).

$$\frac{dV}{dt} = \left[\frac{M_T \eta_T}{1,05(m_T) r_d (i_c)} - \frac{f_r G_T}{1,05(m_T)} \right] - \left[\frac{0,5 \rho A_T C_x}{1,05(m_T)} \right] (V)^2 \quad (18)$$

En el caso del motor de corriente directa sin escobillas, como el HPM48-5000, el torque permanece constante desde las revoluciones por minuto mínimas hasta un valor denominado frecuencia crítica ω_c , $1\,800\text{ rpm}$ en este caso, que corresponden a 28 km/h (figura 6). Es por ello que la fuerza tractiva máxima es constante hasta esa velocidad. Después que se supera la ω_c , el valor del torque cambia y puede modelarse mediante la expresión (19) [6, 10].

$$M_T = M_{T_{\max}} - k\omega \quad (19)$$

En el caso específico de este motor, se comprobó que para el rango desde $1\,800$ hasta $3\,300\text{ rpm}$, el torque decrece de acuerdo con la siguiente expresión (20):

$$M_T = 38,87 - 0,058\omega \quad (20)$$

De acuerdo con lo anterior y sustituyendo todos los valores correspondientes, se tiene que para los valores de $\omega < \omega_c$, la ecuación (18) toma la forma (21).

$$\frac{dV}{dt} = 0,563 - 0,000\,29(V)^2 \quad (21)$$

Luego, la ecuación se puede arreglar, tomando la forma de la expresión (22):

$$V_{n+1} = V_{0\Box} + \delta t (0,563 - 0,000\,29V_{n\Box}^2) \quad (22)$$

Para $\omega > \omega_c$, la ecuación (18) toma la forma (23), y con los mismos arreglos que en el caso anterior, se tiene la expresión (24).

$$\frac{dV}{dt} = 0,673 - 0,034V - 0,000\,29(V)^2 \quad (23)$$

$$V_{n+1} = V_{0\Box} + \delta t (0,673 - 0,034V - 0,000\,29V_n^2) \quad (24)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones que describen el movimiento del vehículo, se puede realizar la simulación de la dinámica del triciclo. Para esto fue utilizado el programa Matlab®R2013b. En la figura 6 pueden observarse las gráficas del comportamiento de la velocidad y distancia recorrida del Cocotaxi en función del tiempo.

Por último, haciendo uso de la ecuación (12), se tiene que el ángulo de pendiente máxima del camino posible a ascender por el triciclo eléctrico es de $3,36^\circ$ ó $5,8\%$. [6, 10, 11].

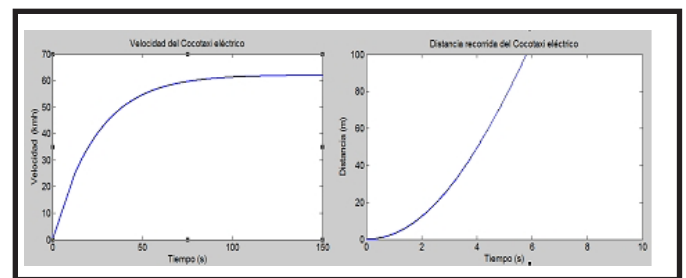


Fig. 6. Comportamiento de la velocidad y la distancia recorrida del Cocotaxi eléctrico.

RESULTADOS

Mediante el resultado obtenido en la simulación, representado por la figura 6, se aprecia que el triciclo eléctrico tiene una característica tractiva que lo hace capaz de llegar a una velocidad de 55 km/h sin mayor dificultad. Alcanza los 40 km/h en 30 s , que es la velocidad normada

en ciudad, y en este tiempo habrá recorrido 600 m. No obstante, las cualidades dinámicas del triciclo son inferiores a las del de gasolina, pero cumple con las expectativas de un vehículo de paseo citadino y con la ventaja ambiental de que el motor eléctrico de tracción no expulsa gases contaminantes en su funcionamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se nota que el motor, con una potencia de 5 kW, no está sobredimensionado realmente, pues a pesar de que las resistencias aerodinámicas y de rodadura no son elevadas, si lo son las de inercia y la producida por la inclinación del camino, debido fundamentalmente al peso del vehículo que es considerable, producto fundamentalmente del peso de las baterías, las cuales representan el 30 % del peso total.

En cuanto al rendimiento energético, en el caso del triciclo de combustión, por datos del fabricante se tiene un índice de consumo de 1,5 L de gasolina en 50 km recorridos, estos 1,5 L de gasolina representan 13,35 kWh de energía, consumidos en una hora a 50 km/h. En el caso del Cocotaxi eléctrico, a 50 km/h, debe vencer una fuerza de resistencia de 152,05 N, según la tabla 6. Al recorrer también 50 km en una hora a dicha velocidad, consume 2,11 kWh debido a resistencias al movimiento. Si se tiene en cuenta que a 50 km/h el motor eléctrico gira a 3 400 rpm, trabajando a 80 % de eficiencia, datos de fábrica, y se asume una eficiencia del sistema de transmisión de 90 %, se tiene que el motor demanda 2,93 kWh de las baterías. O sea, el triciclo de combustión consume 10,42 kWh (1,17 L) más que el eléctrico, en los 50 km recorridos.

En cuanto a la autonomía, transitando por la ciudad, a una velocidad promedio de 50 km/h y con una energía de 17,3 kWh almacenada en las baterías, el triciclo eléctrico pudiera recorrer 6 h, o sea, 300 km.

DISCUSIÓN

Una vez observados los datos anteriores se evidencia que los vehículos eléctricos son más eficientes que los de motor de combustión. No obstante, a través de los años, los vehículos de combustión han desplazado a los eléctricos. La respuesta está en la densidad energética, un tanque con 18 L de gasolina, como el que lleva el triciclo Piaggio Apé TM, pesa 15 kg y es suficiente para que el triciclo recorra 300 km, con un consumo de 6 L en 100 km, según fabricante. En el caso del triciclo eléctrico, para recorrer 300 km, se necesitan 8 baterías de 12 V y 90 A cada una, que en total tienen una masa de 240 kg, la misma que 3 ocupantes con una masa de 80 kg cada uno. Por otra parte, para recargar el tanque de gasolina del triciclo de combustión bastan unos 10 min., mientras que para recargar las 8 baterías del eléctrico se necesitan entre 8 y 10 h en una toma común de 110 V.

CONCLUSIONES

Se obtuvo una ecuación para describir la dinámica del vehículo eléctrico y se simuló la dinámica del mismo, haciendo uso del programa Matlab® R2013b. Se obtuvieron las gráficas de fuerza tractiva en función de la velocidad, así como las gráficas de velocidad y distancia recorrida en función del tiempo. Por último se realizó un análisis del consumo energético del triciclo y la autonomía para ambas motorizaciones, demostrándose la mayor eficiencia de la tracción eléctrica comparada con la térmica.

Simbología empleada

Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
F_{RR}	Fuerza de resistencia a la rodadura	n_m	Frecuencia de rotación del motor en rpm
f_{rr}	Coeficiente de resist. a la rodadura	m_T	Masa total del vehículo
f_o, f_s	Coeficientes que dependen de la presión del neumático	i_{pp}	Relación de transmisión del puente propulsor
i_{cvi}	Relación de transmisión de las diferentes marchas de la caja de cambio	λ	Coeficiente de deformación del neumático
m	Masa que soporta la rueda	B	Coeficiente de llenado del área frontal
g	Aceleración de la gravedad	R_t	Reacción del eje trasero
V	Velocidad del vehículo	M_T	Torque del motor
V_v	Velocidad del viento	r_d	Radio dinámico de las ruedas
ρ	Densidad del aire	μ	Coeficiente de adherencia
C_x	Coeficiente de resistencia	$F_{\mu max}$	Fuerza de adherencia máxima
A_T	Área frontal proyectada	F_T	Fuerza tractiva
α	Pendiente del camino	F_α	Fuerza de resistencia al ascenso
η_T	Eficiencia del sistema de transmisión.	F_{RA}	Fuerza de resistencia aerodinámica
i_{CT}	Relación de transmisión total	F_i	Fuerza de inercia
δ_m	Coeficiente de las masas reducidas	ω	Frecuencia angular del motor
R_d	Reacción del eje delantero	G_T	Peso total del vehículo

REFERENCIAS

1. **MOHAMEDA, Hannana.** "Hybrid electric vehicles and their challenges", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Oslo, 2014, vol. 29, pp.135-150.
2. **MARTIN, Mruzek; LUBOŠKUČERA, Dalibor.** "Analysis of Parameters Influencing Electric Vehicle Range." En actas de 9th International Scientific Conference Transbaltica, Faculty of Engineering, International Islamic University, Malaysia, 2015, pp. 121-123.
3. **GENTA, Gregory.** "Motor Vehicle Dynamics, Modeling and Simulation", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore, 2006, vol. 7, pp. 28-33.
4. **SZCZEPANIAK, Cezary.** *Teoría del automóvil*. La Habana: Combinado Poligráfico Evelio Rodríguez Curbeo, 1994, 275 pp.
5. Piaggio & Co. SPA. "Piaggio Vespa Car specs" [en línea] [ref. de 10 de junio 2016] Disponible en web: vc-piaggio@es.piaggio.com.
6. "Obtainig the center of gravity location" [en línea] [ref. julio de 2016]. Disponible en web: http://www.thecar-tech.com/subject/auto_eng/car_center_of_gravity.
7. **GOLDEN MOTOR INC.**, "HPM48-5000 Motor test curve" [en línea] [ref. de 10 de junio 2016]. Disponible en web: www.goldenmotor.com.
8. **NARASIMHAM, Shekeena.** "Hybrid control of brushless DC motor for variable speed application", International Journal of Computer Science and Management Research. 2012, vol. 1, Issue 3, pp.83-88.
9. **JAMES, Lowry.** *Electric vehicle technology explained*. Swindon, Second edition, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2012, 328 pp. ISBN: 978-1-119-94273-3.
10. **FARHAM, Salem.** "Modeling and controller design for PMDC motor, using different control strategies and verification using MATLAB/Simulink". Submitted and accepted but not published yet to I.J. Intelligent Systems and Applications, Submission ID 124, 2012.
11. **VELTMAN, Doncker.** "Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control". Springer, 2011.

AUTOR

Yamir Sánchez Torres

Ingeniero Mecánico, Profesor Asistente, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Design and Simulation, of an Electric Tricycle Propulsion System

Abstract

Electric vehicles are a promising candidate to substitute the conventional, and to reduce fossil fuel dependency. This paper presents the design and simulation of the propulsion system of the electric tricycle. An equation that defines the dynamics of the vehicle was obtained, the program Matlab® R2013b was used to simulate its performance. As a result, the graph of tractive effort vs. speed, and velocity and distance traveled versus time of the tricycle are displays. Finally the energy consumption and the range of the electric version were compared with the internal combustion one.

Key words: simulation, electric tricycle, energy consumption, range anxiety