

Consumo de Energía de un Vehículo de Tracción Eléctrica

Se presenta en este escrito, una metodología para calcular los consumos de energía de un vehículo de tracción eléctrica, bajo diferentes condiciones de: peso, pendiente, tráfico y grado de desarrollo tecnológico del vehículo.

LUIS SUAREZ FLOREZ
Ingeniero Electricista
M.S. en Potencia
Profesor Asistente, Universidad Nacional.

NOMENCLATURA

- A** : Superficie frontal del vehículo.
- a** : Aceleración del vehículo.
- d** : Desaceleración del vehículo.
- D** : Distancia en terreno plano o pendiente en ascenso, a la cual se le ha restado la distancia recorrida en los procesos de frenado.
- D_P** : Idem anterior para pendiente en descenso.
- D_B** : Distancia recorrida en descenso en pendientes.
- E** : Energía total solicitada a la red.
- E_{IR}** : Energía solicitada a la red para acelerar las masas de inercia.
- E_{FR}** : Energía reintegrada a la red en los procesos de frenado.
- E_{RR}** : Energía solicitada a la red para vencer los rozamientos.
- E_{PR}** : Energía solicitada a la red para vencer la pendiente en ascenso.
- E_{PB}** : Energía solicitada a la red para vencer la pendiente en descenso.
- E_{PFR}** : Energía reintegrada a la red al descender la pendiente.
- F_R** : Fuerza de rozamiento.
- g** : Gravedad.
- h** : Altura de la pendiente.
- J** : Momento de inercia polar.
- m** : Masa del vehículo.
- N** : Número de paradas por kilómetro.
- v** : Velocidad lineal.
- v_m** : Velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo.
- W** : Velocidad angular.
- α** : Angulo de la pendiente.
- μ₁** : Coeficiente de rozamiento.
- μ₂** : Coeficiente de fricción del aire.
- τ₁** : Pérdidas de energía del motor.
- τ₂** : Pérdidas en el equipo electrónico.

Actualmente existe gran interés, tanto a nivel mundial como a nivel nacional, en emplear vehículos de transporte accionados por energía eléctrica. La decisión de emplearlos estará sujeta a los resultados de innumerables estudios, entre ellos el análisis económico y el análisis de los balances de energía. Para llevar a cabo estos estudios es necesario cuantificar el consumo de energía de los vehículos eléctricos.

A conseguir estos consumos apunta la metodología que se describe en este artículo. El análisis se hace

suponiendo un vehículo que opera bajo ciertas condiciones de peso, pendiente, velocidad y tráfico. Además se tiene en cuenta el grado de refinamiento tecnológico que tenga el equipo de tracción.

El consumo de energía se desglosa en los siguientes:

$$E_I = m \frac{V^2}{2} + J \frac{W^2}{2}$$

E_I es la energía necesaria para acelerar el móvil hasta la velocidad v . En el caso de desacelerar y para ciertos equipos de tracción, dicha energía puede ser devuelta a la red eléctrica.

$$E_R = F_R \times D$$

E_R es la energía necesaria para vencer los rozamientos que se oponen al avance del vehículo.

$$E_P = mh$$

E_P es la energía que tiene en cuenta los cambios de energía potencial de vehículo. Cuando se sube una pendiente será positiva, indicando que el vehículo absorbe energía, cuando descende será negativa indicando que el vehículo entrega energía.

Las energías E_I , E_R y E_P deben ser afectadas para tener en cuenta las pérdidas de energía en el equipo de tracción. Luego de esto su suma dará el consumo de energía del vehículo.

ENERGIA NECESARIA PARA ACELERAR EL VEHICULO

Se distinguen dos etapas en el proceso de aceleración, que en el vehículo convencional se cumplen así: En la primera etapa el vehículo se acelera desde el reposo hasta una velocidad de alrededor del 25%² de la máxima velocidad, en esta etapa utiliza el llamado arranque reostático y las pérdidas de energía se pueden demostrar³ que suman un valor igual a E_I .

En la segunda etapa el vehículo se acelera a velocidades superiores al 25% de la máxima velocidad, para ello se actúa sobre la excitación de los motores, y en este caso las pérdidas son las normales del motor, esto es

La expresión para la energía solicitada a la red de electricidad será:

$$E_{IR} = 2.0(m \frac{V^2}{2} + j \frac{W^2}{2}) \quad (1)$$

$$V < 0.25V_m$$

$$E_{IR} = (1.0 + \dots)(m \frac{v^2 - 0.25V_m^2}{2} + J \frac{W^2 - 0.25W^2}{2}) \quad (2)$$

$$V > 0.25V_m$$

En vehículos equipados con tecnología moderna se suprime el arranque reostático y se reemplaza con un arranque mediante dispositivos electrónicos con pérdidas de energía τ_2 . En la segunda etapa de aceleración el consumo de los dos vehículos es igual. Se tiene entonces para el vehículo moderno:

$$E_{IR} = (1.0 + \dots)(1.0 + \dots)(mV^2 + jW^2)$$

Para $V < 0.25V_m$

Para $V > 0.25V_m$

Se utiliza la ecuación (2)

Al comparar las ecuaciones 1 y 3, y teniendo en cuenta que τ_1 y τ_2 toman valores del orden del 4% al 10% y se puede concluir que el balance energético en el proceso de aceleración favorece grandemente al vehículo equipado con tecnología moderna. Esto es en particular importante en vehículos de servicio urbano, que deben parar y arrancar continuamente y donde no se alcanzan altas velocidades.

ENERGIA PARA VENCER LOS ROZAMIENTOS

Se expresa como:

$$E_{RR} = F_R \times D \times (1 + \dots) \quad (3)$$

$$E_{RR} = (M_1mg + M_2V^2A) D(1 + \dots)$$

El término que está en función de la velocidad toma en cuenta la fricción debida al viento, y es importante solo a velocidades altas como en el caso del tren, para el caso del trolley-bus se puede despreciar.

La distancia D , debe evaluarse teniendo en cuenta que en los procesos de frenado no se consume energía. Luego habrá que restarle a la distancia bajo estudio, un término igual a $v^2/2d$ por cada proceso de frenado.

La energía consumida para vencer los rozamientos se afecta solamente por las pérdidas atribuidas a los motores:

Se procede así, incluso para el caso de vehículos con tecnología moderna, por considerar que para velocidades superiores al 25% de la máxima velocidad los motores se conectan directamente a la red, por tanto se obvia el equipo electrónico de los vehículos con tecnología moderna.

La ecuación 3 no debe utilizarse para el caso de descenso de pendientes, la razón se estudiará posteriormente.

ENERGIA PARA DESACELERAR

Para que un móvil desacelere debe perder la energía cinética que almacena. En el caso de un vehículo, parte de esta energía se utiliza en vencer los rozamientos que se oponen al avance del vehículo, avance medido desde el momento en que se inicia la acción de frenado hasta que esta finaliza. Lo que

resta de la energía cinética se hace desaparecer en la siguiente forma:

En los vehículos convencionales se disipa en forma de calor al aplicar frenos mecánicos, o ciertos frenos eléctricos como el reostático o el de corrientes de Eddy.

En vehículos equipados con tecnologías complicadas, se dispone una serie de circuitos electrónicos que pueden reintegrar a la red cifras del orden del 60% del total de la energía cinética del vehículo. Estos vehículos también utilizan frenos mecánicos con el objeto de controlar y asegurar el frenado.

En este caso se debe incluir en la sumatoria de energías, un sumando dado por E_{FR} :

$$E_{FR} = 0.6(1/2 mV^2 + 1/2 jW^2) \times \frac{1}{(1 + \tau_1)(1 + \tau_2)}$$

El término E_{FR} es negativo para indicar que es energía devuelta a la red, y está afectado por las pérdidas τ_2 del equipo electrónico, y τ_1 de los motores que funcionan en este momento como generadores.

ENERGIA POTENCIAL

En el caso de vencer o descender una pendiente hay un cambio de la energía potencial del vehículo que debe ser tenida en cuenta.

Al vencer la pendiente el vehículo recibe energía de la red eléctrica en la cuantía dada por $E_{PR} = (mgh)(1 + \tau_1)$

Esta expresión es válida tanto para vehículos convencionales como para aquellos de tecnología moderna, si se supone que el ascenso se hace con el motor conectado directamente a la red, obviándose el empleo de los circuitos electrónicos.

Al descender el vehículo entrega energía, esta se computará en el balance energético con el siguiente criterio.

Sea $m g \text{ sen } \alpha$ la expresión que da la fuerza que impulsa al vehículo en el sentido de la pendiente.

Si se cumple que:

$$F_R - m g \text{ sen } \alpha > 0$$

Querrá decir que el vehículo deberá tomar energía de la red para lograr avanzar, ya que la sola fuerza ocasionada por la pendiente no alcanzará a vencer la fuerza de rozamiento F_R .

El vehículo tomará energía de la red según la siguiente expresión:

$$E_{PB} = (F_R - m g \text{ sen } \alpha) D_p(1 + \tau_1)$$

La magnitud D_p es igual a la distancia D_B que cubre el vehículo en descenso, restándole la distancia recorrida en los procesos de frenado.

Si se cumple que:

$$F_R - m g \text{ sen } \alpha < 0$$

Querra decir que el vehículo necesita aplicar frenos para descender la pendiente en forma controlada. En vehículos convencionales estos frenos disipan la energía en forma de calor. En vehículos de tecnología moderna y tal como se vio en el numeral 1.3., se podrá aplicar frenos que reintegren a la red el exceso de energía en el descenso. En este caso se sumaría al balance de energía el término E_{PFR} .

$$E_{PFR} = - (m g \text{ sen } \alpha - F_R) D_B$$

$$(1 + \tau_1)(1 + \tau_2)$$

Es de anotar que se tienen en cuenta las pérdidas del circuito electrónico y de los motores, que están trabajando como generadores.

APLICACION DE LA METODOLOGIA

En este apartado se aplica el procedimiento estudiado, para hallar el consumo de energía de un trolley del tipo ZIU, de servicio actualmente en Bogotá. Los datos del trolley se dan en la Tabla 1. Este tipo de trolley corresponde a los vehículos de tecnología convencional, para el trolley equipado con tecnología moderna se suponen las mismas especificaciones dadas en la Tabla 1.

TABLA 1

Especificaciones del trolley Tipo ZIU, y otros valores para el ejemplo calculado.

Fuente. Referencia 2.	
Peso vehículo vacío	10.000 kg.
Peso total vehículo	14.000 kg.
Momento de inercia polar (J)	5 Kg-mt ²
Velocidad máxima teórica (vm)	60 Km/hora
Velocidad máxima teórica (vm)	60 Km/hora
Velocidad máxima alcanzada	40 Km/hora
Coefficiente de fricción ()	14.8 Kgr/ton.
Aceleración (a)	1.3 m/seg ²
Desaceleración (d)	1.3 m/seg ²
Pérdidas del motor	10%
Pérdidas del circuito electrónico	6%
Velocidad angular máxima	330.5 rad/seg.

Primero se trabaja para un kilómetro de terreno plano y con condiciones de tráfico tales que se llega a velocidades hasta de 40 kilómetros por hora, y con un número variable de paradas por kilómetro.

Seguidamente se analiza el caso de un recorrido con pendiente del 5%, un kilómetro en ascenso y uno en descenso. Y con las mismas condiciones de tráfico del caso anterior. En todos los casos se supuso un peso total de 14.000 kilogramos. Los resultados se muestran en la Figura 1.

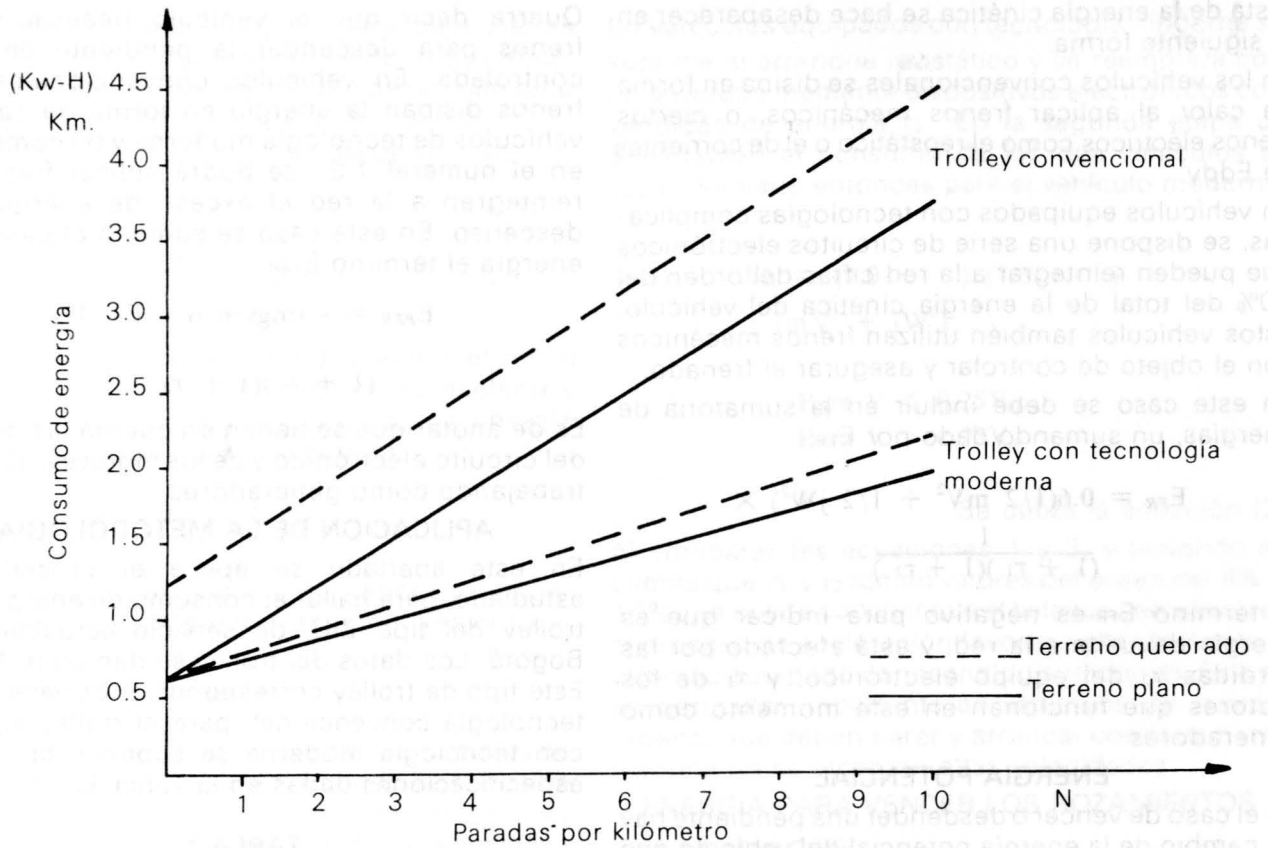


FIGURA 1. Consumos de energía en función del número de paradas por kilómetro.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta es flexible en cuanto permite encontrar el consumo energético del vehículo de tracción eléctrica, en función de las condiciones específicas en las cuales va a operar, esto es: peso, equipo de tracción utilizado, topografía del recorrido y las condiciones del tráfico: número de paradas y velocidad alcanzada.

En un análisis más detallado se puede evaluar la energía utilizada en los servicios de iluminación y ventilación del vehículo, y también desglosar las pérdidas del equipo de tracción en fijos y variables.

Las cifras del ejemplo se comparan con promedios de consumo conocidos dando resultados que, si bien no aseguran la bondad del procedimiento empleado, tampoco lo niegan. Así los promedios de consumo para el trolley en diferentes ciudades de Europa y Canadá, oscilan entre 1.3 y 2.4 Kw-Hora⁵,

cifras éstas que encuentran correspondencia con las de la Figura 1. En una red de metro, cuyos vehículos convencionales fueron reemplazados por vehículos modernos se han contabilizado ahorros de energía superiores al 20%¹. En la Figura 1 y para el caso de 1 parada por kilómetro, los ahorros del vehículo moderno son del 19% y el 47% según el terreno.

El consumo de un bus diesel tipo Pegasso en Bogotá es de 0.167⁴ galones de ACPME por kilómetro; esta cifra puesta en KW-hora es de 7.2 KW-hora por kilómetro (utilizando la relación de 1 galón de ACPME por 43.2 KW-hora). Este consumo se compara con los de la Figura 1, el más alto encontrado allí es de 4.5 KW-h., es decir, que en el peor de los casos el consumo de energía del trolley es de solo el 65.5% del correspondiente al bus diesel.

BIBLIOGRAFIA

Wagner, Rudolph, **A new concept on Trolley Technology**. Power Engineering, Siemens, Sept-Oct. 1980.

Marín Danilo y otros. **Análisis de Consumos Energéticos de Vehículos de Tracción Eléctrica**. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional, Bogotá, 1982.

M. Chilikin, **Electric Drive**. Mir Publishers, Moscow, 1970.

Informe de Costos. Empresa Distrital de Transporte Urbano, Bogotá, abril, 1976.

Wilkins W. y otros. **The Trolley Coach Development and State of the Art**. Rosen and Wallace Inc., Denver, 1979.