

Influencia de la carga de los vehículos eléctricos en las redes de distribución secundarias

Influence of electric vehicle charging on the distribution networks

Frank Grau Merconchni^I*, Eduardo López Pérez^I, Miguel Castro Fernández^{II}, Orestes Hernández Areu^{II}

^IUniversidad de Oriente, UO. Santiago de Cuba, Cuba

^{II}Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba

*Autor de la correspondencia: decanofie@consejo.uo.edu.cu

Recibido: 16 de julio de 2023

Aprobado: 15 de noviembre de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

Desde hace varios años, la circulación de vehículos eléctricos se ha incrementado en el país, por lo que se hace necesario estudiar sus impactos en las redes de distribución secundarias. En el proceso de carga de las baterías, se emplean convertidores de potencia controlados, por lo que estas cargas son consideradas como no lineales y provocan la ocurrencia de problemas de calidad de la energía. En el trabajo se estudia, con un experimento, el efecto de los cargadores de baterías empleados en triciclos eléctricos y motorinas. Los resultados revelan que, los equipos que se emplean durante la carga de las baterías, producen armónicos en las corrientes, con valores altos de distorsión armónica. Además, se realiza un análisis del consumo energético y de combustible de estos vehículos, demostrando que los vehículos eléctricos constituyen una alternativa al transporte que presenta menor consumo de combustible, menores costos para el usuario y menor impacto medioambiental.

Palabras clave: calidad de la energía, redes de distribución, vehículos eléctricos.

For several years, the circulation of electric vehicles has increased in the country, so it is necessary to study their impacts on secondary distribution networks. In the process of charging the batteries, controlled power converters are used, so these charges are considered non-linear and cause the occurrence of power quality problems. At work, the effect of battery chargers used in electric tricycles and motorcycles is studied by an experiment. The results reveal that the equipment used during battery charging produces harmonics in the currents, with high values of harmonic distortion. In addition, an analysis of the energy and fuel consumption of these vehicles is carried out, demonstrating that electric vehicles constitute an alternative to transport that presents lower fuel consumption, lower costs for the user and lower environmental impact.

Key words: power quality, distribution networks, electric vehicles.

INTRODUCCIÓN

El vehículo eléctrico está llamado a formar parte de la movilidad diaria, debido a sus beneficios en materia de eficiencia energética y reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Así como por la reducción de emisiones contaminantes y de efecto invernadero, en un momento en el que el transporte representa la cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero [1, 2]. El sector del transporte es altamente dependiente de los combustibles fósiles (95%), lo cual tiene un doble efecto: supone una balanza energética desfavorable en países con escasos o nulos recursos petrolíferos y emisiones difícilmente controlables de contaminantes y, sobre todo de CO₂, principal responsable del cambio climático.

Cómo citar este artículo:

Frank Grau Merconchni y otros. Influencia de la carga de los vehículos eléctricos en las redes de distribución secundarias. Ingeniería Energética. 2023. 44 (3), septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

En este marco, y pese a los movimientos en el precio de la energía, se sigue promoviendo la implantación del vehículo eléctrico como una tecnología que permite descarbonizar el sector transporte [2]. En este contexto, la movilidad eléctrica contempla como criterios básicos el ahorro en términos económicos, el cuidado del medio ambiente en términos ecológicos y la eficiencia energética en términos de optimización de recursos, actuando como agente normalizador de la demanda energética, como promotor de las redes inteligentes y como catalizador de las fuentes renovables de energía [3].

Para que los vehículos eléctricos constituyan una alternativa limpia y económicamente factible, en un país en el cual la generación eléctrica está sustentada en el empleo de combustibles fósiles, es necesario que su empleo esté aparejado con el crecimiento de las fuentes renovables de energía. En los últimos años, el programa de cambio de la matriz energética en Cuba se ha visto retrasado en el cumplimiento de sus objetivos para el año 2030, dado por la agudización de la crisis y el Bloqueo Económico y Financiero al país [3]. No obstante, los vehículos eléctricos han incrementado su utilización y se han convertido en una carga frecuente en el sistema de distribución de baja tensión (BT). Considerando el auge de estos medios de transporte en el país y teniendo en cuenta que los mismos deben conectarse a la red de distribución secundaria (RDS) para la carga de las baterías, mediante el empleo de un convertidor de corriente alterna (CA) en corriente directa (CD), es importante analizar el efecto de los mismos en dichas redes.

El efecto más notable de la influencia de los vehículos eléctricos está dado por su carga. Los cargadores emplean fuentes conmutadas, por lo que son vistos desde la red como cargas no lineales. Las cargas no lineales en las redes de distribución empobrecen los indicadores de calidad, incrementando las pérdidas en líneas y transformadores y provocando otros efectos no deseados como son los disparos de las protecciones o la presencia de flicker o parpadeo. Si bien un cargador de un vehículo eléctrico no suele exceder los 600 W de potencia, el incremento en su uso y la coincidencia de la aparición de estas cargas en el tiempo puede llegar a representar problemas graves en un circuito de distribución [4].

MATERIALES Y MÉTODOS

Dado que los vehículos eléctricos deben conectarse a la RDS para la carga de las baterías mediante el empleo de un convertidor de CA – CD (cargador de batería) y que los períodos de carga, en el caso de las motorinas con baterías de litio, suelen ser de aproximadamente de 4 horas como promedio, es importante analizar el efecto que esto representa en las redes.

La evaluación de la calidad de la onda se realiza a partir de indicadores de calidad. Entre los indicadores más importantes a considerar para el caso de las redes monofásicas de BT están los siguientes [5, 6]:

- Desviación de la tensión (U_d).
- Desviación de la frecuencia (Δf).
- Distorsión armónica (DA) individual de corriente y de tensión.
- Distorsión armónica total (THD) de corriente y de tensión.

El esquema de instrumentación empleado en este trabajo está basado en la utilización de un convertidor analógico – digital, cuyo propósito es el de sensar la tensión y la corriente a la entrada del convertidor de CA – CD que se emplea como cargador de la batería del vehículo. Como convertidor analógico digital se utiliza una tarjeta de adquisición de datos (TAD) marca IOtech, de serie DAQBoard/1000.

La tarjeta realiza mediciones de los valores instantáneos de la tensión, por lo que debe prestarse especial atención a los valores máximos y mínimos de las señales y posibles picos que puedan afectar el hardware. Evidentemente, estos requerimientos imponen las exigencias que debe cumplir el circuito en estudio con sus esquemas de medición lo que conlleva a que los esquemas para la adquisición sean más complejos que cuando se emplean instrumentos que arrojan mediciones directas.

Para acondicionar las señales de tensión y corriente a medir se emplearán dos transductores. Como transductor de tensión se utilizará un autotransformador variable desde 0 hasta el 110% de la tensión de entrada y como transductor de corriente se empleará una resistencia shunt, con un valor de corriente nominal de 10 A, con una salida 75 mV por cada 1,5 A, equivalente a 0,05 Ω .

El esquema para la medición se muestra en la figura 1. Para la configuración de la TAD se empleará una entrada bipolar de tipo diferencial, empleando dos canales de la forma:

- CH0 – CH8, para la medición de la tensión.
- CH1 – CH9, para la medición de la corriente.
- GND para la referencia de tierra (punto común del sistema).

La frecuencia de escaneo será de 5 kHz y se realizarán 1500 escaneos, para un tiempo de escaneo de 0,2998 segundos, lo que se corresponde con 18 períodos de la señal para una frecuencia fundamental de 60 Hz.

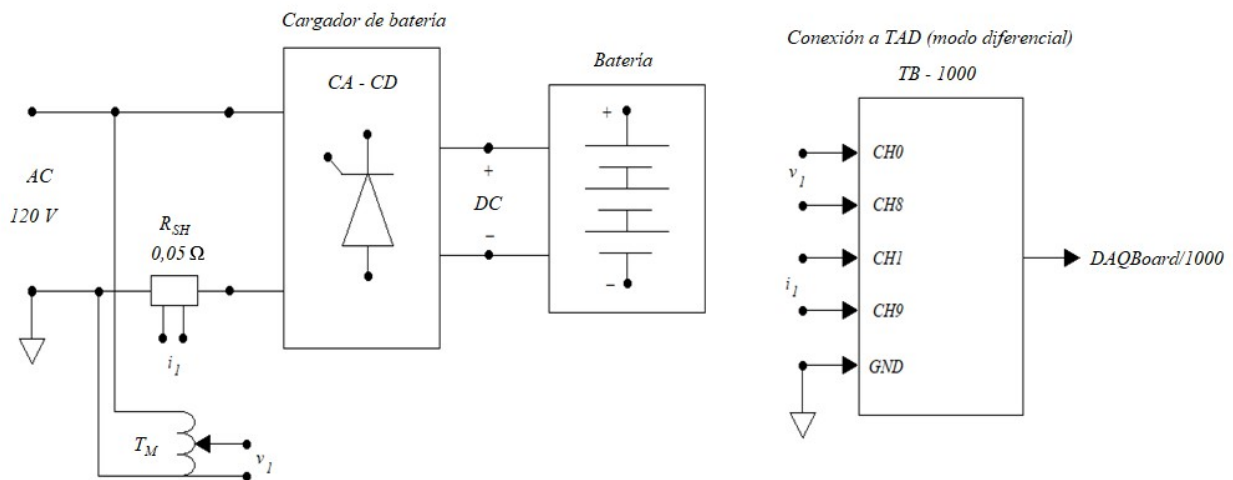


Fig. 1. Esquema para la medición empleando la TAD. Fuente: Elaboración propia

En las pruebas se emplearon dos tipos de baterías con sus cargadores, proporcionados por los fabricantes o distribuidores de los vehículos eléctricos. En este caso, se trata de un módulo de 5 baterías de Gel de 12 V y 50 Ah cada una para triciclos eléctricos de 60V y una batería de Litio de 72 V y 20 Ah para motorinas tipo scooter marca Rali.

Batería de Gel de 12 V y 50 Ah para triciclos eléctricos de 60 V

Las baterías de Gel se destacan por su menor desgaste de los electrodos, que se traduce en una vida útil más larga respecto a las baterías de plomo-ácido convencionales. La batería de Gel VRLA de la serie DZM de Chilwee, está especialmente diseñada para aplicaciones de potencia motriz, es decir, bicicletas, scooters eléctricos, triciclos eléctricos, motocicletas eléctricas y otros dispositivos que requieren una fuente de alimentación de CD [7]. Estas baterías tienen una tensión nominal de 12 V con una capacidad a 25 °C de 50 Ah, por lo que se emplea un arreglo de 5 baterías en serie para obtener un banco de 60 V y 50 Ah. Su corriente de carga máxima es de 6 A. El cargador, por su parte, tiene una tensión de CA nominal de 120 V. La tensión de carga es de 73 a 73,5 V de CD, la corriente de carga es de 3,9 a 4 A y el tiempo de carga es de 10 horas.

Batería de Litio de 72V y 20 Ah para motorinas marca Rali

La batería de Litio de 72V y 20Ah es libre de mantenimiento. Están diseñadas en composición NMC (Níquel – Manganeso – Cobalto) especialmente para aplicaciones de ciclo profundo [7]. Esta batería es usada comúnmente para vehículos eléctricos debido a su muy baja tasa de auto calentamiento, ideal para instalación en bicicletas eléctricas patinetas, scooter y otros. Estas baterías tienen una tensión nominal de 72 V, con una capacidad a 25 °C de 20 Ah. Su corriente de carga máxima es de 10 A y se fabrican para 800 ciclos de carga. El cargador, por su parte, tiene una tensión de CA nominal de 120 V. La tensión de carga es de 84 V de CD, la corriente de carga es de 5 A y el tiempo de carga es de 6 horas.

Procesamiento digital de las señales

Para el procesamiento digital de las señales adquiridas con la TAD, se empleó un programa creado con este propósito. Este programa permitió determinar los principales valores que caracterizan estas señales, tales como el valor eficaz (RMS), medio (AVG), mínimo (MIN), y máximo (MAX) de cada señal.

Por otra parte, el empleo de la herramienta de software facilitó el empleo del algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro armónico de amplitud y desplazamiento de fase de las señales de tensión y corriente, calcular el THD y determinar los valores de potencia aparente (S), activa (P), reactiva (Q), de distorsión (D), así como el factor de potencia (PF) con que opera la carga no lineal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la prueba realizada al cargador de baterías de Gel de 60 V

Las mediciones realizadas para el cargador de baterías de Gel de 60 V, arrojaron las formas de onda para la tensión y la corriente que se muestran en la figura 2.

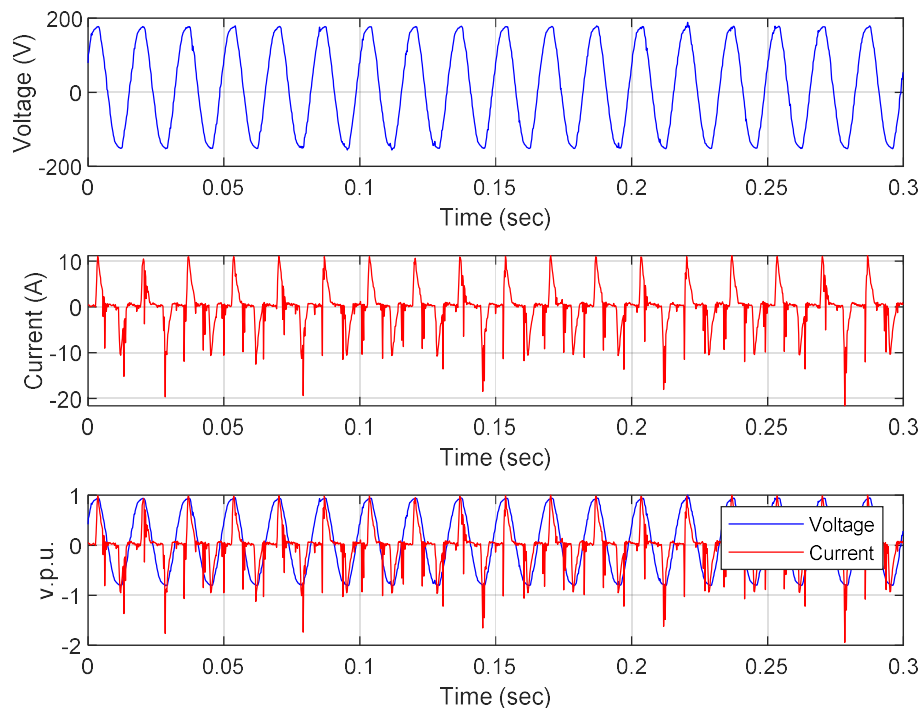


Fig. 2. Formas de onda de la tensión (azul) y la corriente (rojo) a la entrada del cargador de baterías de Gel de 60V. Los valores por unidad se determinan tomando como base el valor máximo de las señales.
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1, se resumen las magnitudes fundamentales para las señales de tensión y corriente, así como para las potencias, factor de potencia y frecuencia del sistema.

Tabla 1. Magnitudes fundamentales del sistema para el cargador de baterías de Gel de 60V. Fuente: Elaboración propia

Magnitudes	Tensión	Corriente
Valor eficaz (RMS)	119,99 V	4,415 A
Valor medio (AVG)	13,08 V	$3,92 \cdot 10^{-10}$ A
Valor máximo (MAX)	188,91 V	11,144 A
Valor mínimo (MIN)	-156,01 V	-21,602 A
THD (%)	11,4 %	99,3 %
Potencia activa (W)	321,22 W	
Potencia reactiva (VAr)	194,1 VAr	
Potencia de distorsión (VAd)	373,92 VAd	
Potencia aparente (VA)	529,78 VA	
PF	0,606	
DPF	0,93	
Defasaje (°)	21,49 °	
Frecuencia (Hz)	59,91 Hz	

Como puede apreciarse, el valor de distorsión armónica es muy elevado, tanto para la señal de tensión como para la de la corriente. Otro aspecto importante es el PF con que opera el sistema, con un valor de 0,6, aun cuando el factor de potencia de desplazamiento es elevado, con un valor de 0,93, lo que revela que el sistema posee un bajo consumo de potencia reactiva, en cambio, posee una elevada potencia de distorsión dada por el deterioro que presenta la forma de onda de la corriente por el empleo del convertidor de potencia.

Cálculo de los indicadores de calidad en la prueba realizada al cargador de baterías de Gel de 60 V

Entre las normas que se emplean en Cuba y que rigen la calidad de la energía eléctrica en las RDS se pueden mencionar las siguientes:

- La norma NC:800[8]. Reglamento Electrotécnico Cubano para instalaciones eléctricas.
- La norma IEC 61000-2-2 [9]. Establece los estándares para perturbaciones de baja frecuencia en redes públicas.
- La norma IEC 61000 -3-4 [10]. Establece los armónicos de corriente en sistemas de suministro de energía de BT para equipos con corriente nominal superior a 16 A.

A partir del cálculo de los indicadores de calidad del producto técnico es posible caracterizar la influencia de este convertidor en el sistema de suministro eléctrico de BT. En la tabla 2, se muestran los resultados de los indicadores relacionados con la desviación de la frecuencia, la desviación de la tensión y la distorsión armónica total de corriente y tensión.

Tabla 2. Indicadores de calidad del producto técnico del sistema para el cargador de baterías de Gel de 60 V. Fuente: Elaboración propia

Indicador	Valor	Norma	Criterio de evaluación
Δf (%)	0,16 %	1 % (NC 800-1:2011)	En norma
Ud (%)	-0,0083 %	± 4 % (NC 800-1:2011)	En norma
THDv (%)	11,4 %	8 % (IEC 61000-2-2)	Fuera de norma
THDi (%)	99,3 %	10 % (IEC 61000-3-2)	Fuera de norma

La comparación con las normas revela que los indicadores de desviación de la frecuencia, y de la tensión se encuentran dentro de los valores normados, en cambio, la distorsión armónica total para la tensión y para la corriente se encuentran por encima de los valores normados, siendo muy grave la situación de la distorsión armónica de la corriente.

Resultados de la prueba realizada al cargador de baterías de Litio de 72 V

Al realizar las mediciones en el cargador de baterías de Litio de 72V, las formas de onda de la tensión y la corriente obtenidas fueron aparecen representadas en la figura 3.

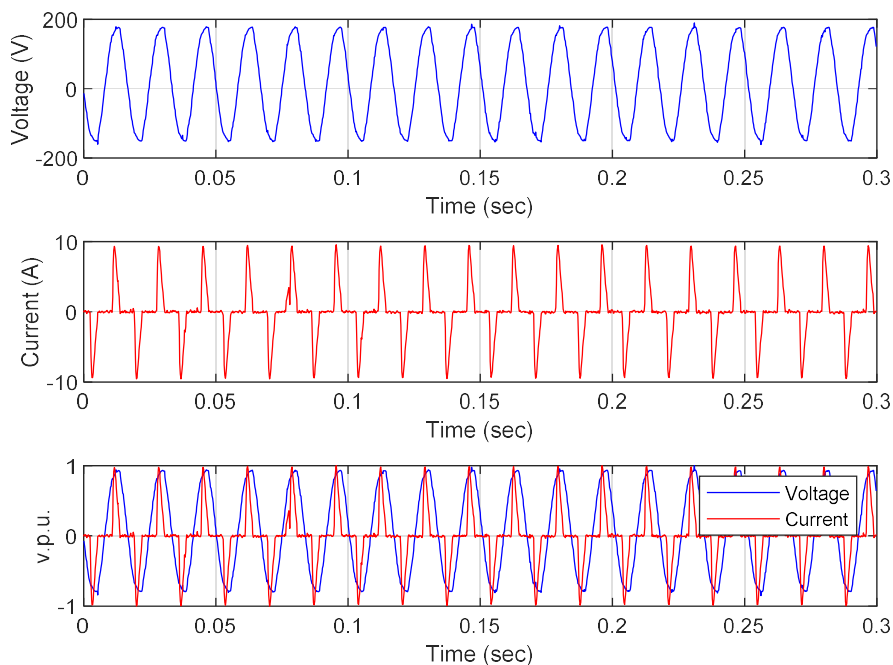


Fig. 3. Formas de onda de la tensión (azul) y la corriente (rojo) a la entrada del cargador de baterías de Litio de 72 V. Los valores por unidad se determinan tomando como base el valor máximo de las señales. Fuente: Elaboración propia

Al procesar estas señales, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Magnitudes fundamentales del sistema para el cargador de baterías de Litio de 72 V. Fuente: Elaboración propia

Magnitudes	Tensión	Corriente
Valor eficaz (RMS)	119,46 V	3,635 A
Valor medio (AVG)	12,726 V	$2,757 \cdot 10^{-16}$ A
Valor máximo (MAX)	190,04 V	9,55 A
Valor mínimo (MIN)	-161,49 V	-9,557 A
THD (%)	5,31 %	97,38 %
Potencia activa (W)	294,36 W	
Potencia reactiva (VAr)	159,1 VAr	
Potencia de distorsión (VAd)	276,75 VAd	
Potencia aparente (VA)	434,22 VA	
PF	0,678	
DPF	0,93	
Defasaje (°)	21,49 °	
Frecuencia (Hz)	59,91 Hz	

Como puede apreciarse, el valor de distorsión armónica de la corriente es ligeramente inferior al caso analizado con anterioridad, lo que se corresponde con la similitud existente entre las formas de onda de las corrientes demandadas del convertidor de la red pues ambos equipos poseen el mismo principio de funcionamiento.

En cuanto al valor del THD para la tensión se observa un mejoramiento con respecto al estudio anterior, siendo este de un 5,31%.

En este caso, el factor de potencia es ligeramente superior al del cargador de baterías de Gel. No obstante, el factor de potencia de desplazamiento es el mismo.

Cálculo de los indicadores de calidad en la prueba realizada al cargador de baterías de Litio de 72 V

En la tabla 4, se muestran los resultados de los indicadores relacionados con las desviaciones de la frecuencia y de la tensión, así como la distorsión armónica total de corriente y de tensión.

Tabla 4. Indicadores de calidad del producto técnico del sistema para el cargador de baterías de Litio de 72 V. Fuente: Elaboración propia

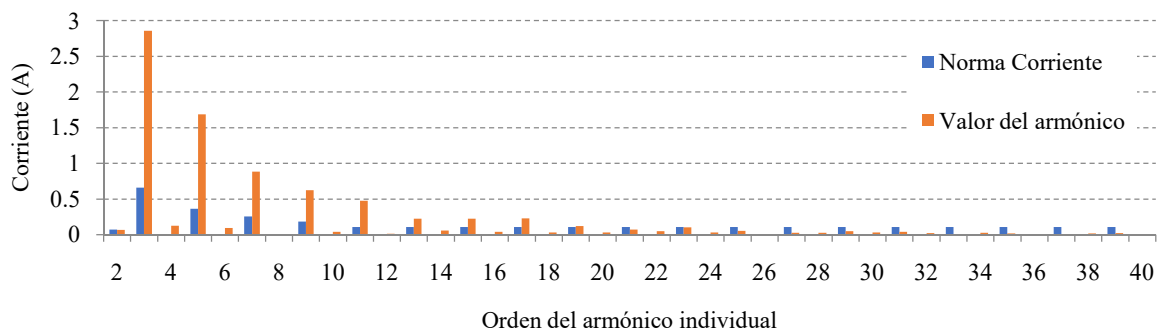
Indicador	Valor	Norma	Criterio de evaluación
Δf (%)	0,16 %	1 % (NC 800-1:2011)	En norma
Ud (%)	-0,45 %	± 4 % (NC 800-1:2011)	En norma
THD _v (%)	5,31 %	8 % (IEC 61000-2-2)	En norma
THD _i (%)	99,27 %	10 % (IEC 61000-3-2)	Fuera de norma

La comparación con los valores normados revela que los indicadores de desviación de la frecuencia, y de la tensión se encuentran dentro de los valores permisibles. La distorsión armónica total para la tensión se encuentra por debajo del valor normado, sin embargo, la distorsión armónica total para la corriente se encuentra por encima de los valores normados.

Análisis de la distorsión armónica individual de las corrientes

Los resultados presentados en las tablas 1 y 3, demuestran que el principal problema de calidad para los casos estudiados, radica en la distorsión armónica de las corrientes. Con respecto a los armónicos individuales, los cargadores de batería pueden ser clasificados como equipos de Clase B (herramientas portátiles), por lo que su distorsión armónica individual está regida por la Norma IEC 61000-3-4 [10], para niveles de compatibilidad para los armónicos individuales de la corriente en redes de BT. La figura 4, ilustra la comparativa entre los armónicos individuales presentes y los normados para este nivel de tensión.

Armónicos individuales para la corriente del cargador de baterías de Gel



Armónicos individuales para la corriente del cargador de baterías de Litio

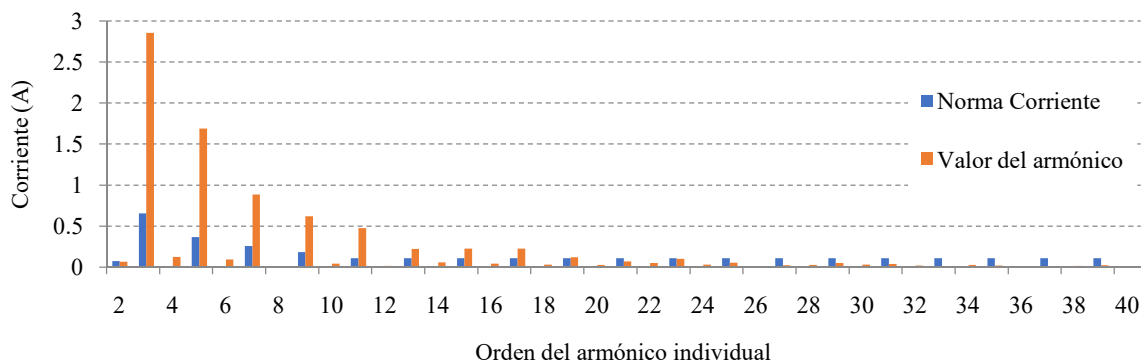


Fig. 4. Comparativa entre los valores de los armónicos individuales normados (azul) y los valores reales (rojo), para ambos casos de estudio, según Norma IEC 61000 -3-4 [10]

En el caso del cargador de Gel, todos los armónicos individuales hasta el orden 19 se encuentran por encima del valor normado según la IEC 61000 -3-4, siendo los más significativos los armónicos impares desde el orden 3 hasta el orden 17. Para el cargador de baterías de Litio, el análisis revela que se encuentran por encima del límite normado los armónicos impares hasta el orden 17.

Análisis de consumo energético y de combustible

Si bien es cierto que el paradigma del empleo de estos vehículos es que su consumo eléctrico esté fundamentado o apoyado en fuentes renovables de energía (FRE), también se debe considerar que su empleo reduce las emisiones de gases contaminantes que son inherentes a los vehículos de combustión y que en términos de consumo son más eficientes [10–13].

En general, el consumo de un vehículo de gama media, suele medirse en litros de combustible por cada 100 km recorridos. El promedio mundial de este valor oscila por debajo de los 4 litros por cada 100 km para motocicletas de hasta 250 centímetros cúbicos (cc) [11]. En términos energéticos, un litro de gasolina equivale a 8,9 kWh de energía.

La potencia consumida en el proceso de carga de los vehículos eléctricos (triciclos con baterías de 60V de 50Ah y motorinas con baterías de 72V de 20 Ah) es de 321,22 W y 294,36 W respectivamente. Considerando el tiempo de carga de las baterías dado por los fabricantes de los cargadores, la energía demandada de la red de distribución secundaria para una carga completa de un triciclo con batería de 60V de 50Ah es de 3,12 kWh, mientras para una motorina con batería de Litio de 72 V y 20 Ah, la energía demandada de la red para una carga completa es de 1,8 kWh.

Considerando que la autonomía de estos vehículos es de 60 km (para los triciclos) y 50 km (para motorinas), el consumo de energía de estos vehículos es de 5,2 kWh por cada 100 km recorridos para el caso de la batería de Gel 60 V y de 3,6 kWh por cada 100 km en el caso de la batería de Litio de 72 V. La comparación de este consumo energético, con respecto a un vehículo de gasolina de gama media, se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Comparación del consumo energético de vehículos estudiados con respecto a un vehículo de gasolina de 250 cc [11]

Tipo de Batería	Energía (kWh)	Consumo energético ($\frac{kWh}{100 km}$)	Consumo de ciclomotor de gasolina de 250 cc ($\frac{kWh}{100 km}$)	Por ciento de consumo energético de vehículos eléctricos con respecto a ciclomotor de gasolina (%)
Gel 60 V	3,12 kWh	$\frac{5,2 kWh}{100 km}$	$\frac{35,6 kWh}{100 km}$	14,6 %
Litio 72 V	1,8 kWh	$\frac{3,6 kWh}{100 km}$		10,2 %

Como puede apreciarse, el consumo de energía de estos vehículos eléctricos es de un 14,6 % (para baterías de Gel de 60 V) y de un 10,2 % (para baterías de Litio de 72 V) del consumo promedio de un ciclomotor de 250 cc, con motor de combustión a base de gasolina. Esto revela que los vehículos eléctricos son, en términos de consumo energético, mucho más eficientes que los de combustible convencional [11], logrando trasladar personas e incluso cargas con un consumo energético menor al de los motores de combustión interna. Este aspecto a favor de los vehículos eléctricos, ayuda a justificar su empleo en países en vías de desarrollo, donde el empleo de combustibles tradicionales como la gasolina tiene una dependencia elevada de las importaciones, tal y como es el caso de Cuba.

No obstante, el consumo de energía eléctrica de la red conlleva a consumo directo de combustibles fósiles. En Cuba, la generación de un kWh de energía requiere un consumo de 280g de combustible [11, 12]. De esta manera, el consumo de combustible para la carga completa del vehículo con batería de Gel de 60 V y 50 Ah es de 873,6 g, mientras que para el vehículo con batería de Litio de 72 V y 20 Ah es de 504 g de combustible fósil. De acuerdo con [13], para producir 1 litro de gasolina se requieren 2,5 litros de petróleo crudo, lo que equivale a 1975 g de este combustible. En correspondencia con este valor, el proceso de carga de las baterías de Gel 60V y 50 Ah, con una autonomía de 60 km equivale a 0,44 litros de gasolina. Entonces el consumo de estos vehículos es de aproximadamente de 0,73 litros de gasolina por cada 100 km recorridos, el cual es muy inferior a los 4 litros promedio que consume un ciclomotor de 250 cc.

En el caso de los vehículos con baterías de Litio de 72 V y 50 km de autonomía, se requieren durante las 6 horas de carga 504 g de combustible para la generación eléctrica, lo cual equivale a 0,26 litros de gasolina, resultando un consumo de 0,52 litros por cada 100 km recorridos. Evidentemente, en este análisis no se han considerado las pérdidas asociadas al proceso de generación, transmisión y distribución de esta energía eléctrica en las redes del sistema electroenergético nacional. Por otra parte, es bien conocido que la generación eléctrica en Cuba no proviene de una única fuente de generación, por lo que su consumo específico es equivalente de las distintas fuentes (térmicas, motores de combustión de Fuel o Diesel e incluso las FRE).

Análisis de costos económicos

Como es bien conocido, la tarifa del sector residencial no es fija, sino que se incrementa por rangos del consumo en kWh del usuario. Esta característica dificulta el cálculo del costo de la carga de un vehículo eléctrico para un cliente residencial. En Cuba se estima que el consumo promedio de los clientes residenciales es de 300 kWh/mes. En esta escala, el costo del último rango (251 – 300 kWh) es de 3,00 CUP por kWh. Si tomamos este costo de tarifa eléctrica residencial podemos calcular el costo de la carga de estos vehículos (ver tabla 6).

Tabla 6. Costo de facturación según Tarifa del Sector Residencial en Cuba para cada carga de los vehículos. Fuente: Elaboración propia

Tipo de Batería	Energía consumida (kWh)	Costo Tarifa Sector Residencial escala 251 – 300 kWh (CUP)	Costo de facturación de la carga para un usuario residencial (CUP)
Gel 60 V	3,12 kWh	$\frac{3,00 CUP}{kWh}$	9,36 CUP
Litio 72 V	1,8 kWh		5,40 CUP

Evidentemente, este costo es significativamente bajo en comparación con el costo del combustible (gasolina) empleado para un ciclomotor convencional. El costo del litro de gasolina para clientes particulares es de 120,00 CUP por litro. Entonces, para recorrer 100 km en un ciclomotor de 250 cc, se requeriría invertir 360 CUP en gasolina, mientras para obtener la misma autonomía con un vehículo eléctrico se facturará aproximadamente 15,60 CUP en electricidad para vehículos de Gel de 60V y 10,80 CUP en vehículos de Litio de 72 V.

Considerando que el coto del combustible equivalente en Cuba (C_{comb}) es de 294,90 USD por tonelada, es posible calcular el costo de la generación al país como: Vea ecuación (1).

$$C_E = C_{comb} \cdot Cons_{comb} \quad (1)$$

Donde: $Cons_{comb}$ es el combustible consumido para la generación eléctrica durante el proceso de carga del vehículo.

De esta forma, el costo del combustible para la generación de la electricidad es de 0,25 USD para los vehículos con baterías de Gel de 60 V y 50 Ah, mientras que para los vehículos con baterías de Litio de 72 V y 20 Ah, el costo del combustible para la generación es de 0,15 USD. Si se considera que la tasa de cambio en Cuba es de 120 CUP por cada USD, los resultados revelan que, al país le cuesta 30,00 CUP generar la electricidad para cada carga de un vehículo eléctrico de batería de Gel de 60 V y 18.00 CUP para cada carga de un vehículo con batería de Litio de 72 V. Este resultado revela que, al país le cuesta tres veces más generar la electricidad que lo que factura por su consumo residencial durante el proceso de carga, resultado que está dado fundamentalmente a que gran parte de la demanda de energía residencial está subvencionada por el gobierno.

Análisis de las emisiones de gases contaminantes

Si bien es cierto que durante su funcionamiento los vehículos eléctricos tienen cero emisiones, durante la carga demandan una energía de la red que, al no estar respaldada en su totalidad por FRE si genera gases contaminantes. Los valores medios de las emisiones de CO_2 para ciclomotores de un cilindraje entre los 125 y 500 cc es de 82g por km recorrido [11 – 13]. El factor de emisión de dióxido de carbono (FE_{CO_2}) que se emplea para determinar su impacto en la generación en el país es de 749 g por cada kWh generado. Las emisiones de CO_2 pueden calcularse entonces como: Vea ecuación (2).

$$Emisiones = E \cdot FE_{CO_2} \quad (2)$$

Donde E, es el valor de la energía demandada de la red eléctrica para la carga de cada vehículo por km recorrido. A partir de los resultados obtenidos anteriormente, se puede determinar el valor de las emisiones de CO_2 correspondientes al empleo de combustibles fósiles en la generación, obteniéndose que las emisiones correspondientes a un vehículo con batería de Gel de 60 V es de 38,9 g/km, mientras para la motorina con batería de Litio es de 26,9 g/km. En ambos casos, los valores de emisión de CO_2 obtenidos están muy por debajo del valor medio declarado por la Unión Europea para ciclomotores de gasolina en el año 2019 [13]. En este sentido, se puede decir que el empleo de estos vehículos eléctricos constituye una alternativa que, aunque no esté aún respaldada por FRE, resulta menos contaminante al medio ambiente.

CONCLUSIONES

En esta investigación, se han caracterizado dos tipos de vehículos eléctricos comercializados en el país (triciclos con baterías de 60V de 50Ah y motorinas con baterías de 72V de 20 Ah), desde un enfoque de su influencia en las RDS durante el proceso de carga de los mismos. Con el diseño del esquema de instrumentación propuesto, es posible realizar las mediciones de la tensión y la corriente demandada de la red por las dos tecnologías de baterías utilizadas. Estas mediciones a los cargadores de baterías estudiados, permiten obtener los valores fundamentales de estas señales, así como el valor de la distorsión armónica total y los armónicos individuales de las corrientes y las tensiones.

El análisis reveló que, los equipos que se emplean durante la carga de las baterías, producen armónicos en las corrientes, con valores de THD cercanos al 99%, o cual constituye un efecto nocivo en otros equipos de la red, principalmente en aquellos equipos de comunicación y receptores de radio y televisión. Al determinar la carga que representan estos equipos en la red de BT, a partir de calcular la potencia que demandada de la red y el factor de potencia con que operan, es posible realizar un análisis del consumo energético y de combustible de estos vehículos. Este análisis demostró que, los vehículos eléctricos estudiados, constituyen una alternativa al transporte que presenta menor consumo de combustible, menores costos para el usuario y menor impacto medioambiental.

REFERENCIAS

- [1] López, A. V., *et al.* "Vehículos eléctricos en Cuba: un caso de estudio de la empresa de CUBATAXI de La Habana". Ingeniería Energética, 2022, vol. 43, n. 1. ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/652/800>
- [2] Olvera Gambino, J. R., *et al.* "Gestión de gobierno por una transición de movilidad baja en carbono para la ciudad de Cienfuegos, Cuba". Revista Universidad y Sociedad, 2022, vol. 14, n. 5, p. 489-502. ISSN 2218-3620. Disponible en: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3246>

- [3] Korkeakoski, M. “State of Play for 100% Renewable Energy Futures for Cuba: Recent Changes and Challenges”. *Sustainability*, 2022, vol. 14, n. 21, e13825. MDPI AG. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/su142113825>
- [4] Miranda Hernández, J. M., & Iglesias González, M. N. “Las infraestructuras de recarga y el despegue del vehículo eléctrico”. *Observatorio Medioambiental*, 2015, vol. 18, p. 57-85. Disponible en: https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2015.v18.51285
- [5] Kennedy, B. W. “Power Quality Primer”, McGraw-Hill. 2000. ISBN 0-07-150024-3. Disponible en: https://www.academia.edu/33671381/Power_Quality_Primer_Barry_W_Kennedy
- [6] Yu, H., *et al.* “Electric vehicles integration and vehicle-to-grid operation in active distribution grids: A comprehensive review on power architectures, grid connection standards and typical applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 168, e112812. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111756>
- [7] León Vilches, C. A. “Sistema de Monitorización y Control para Cargadores Eléctricos en vehículos eléctricos”. Bachelor's thesis, Universidad de las Ciencias Informáticas. Facultad 4, 2022. Disponible en: <https://repositorio.uci.cu/jspui/handle/123456789/10628>
- [8] Código Electrotécnico Cubano NC:800. “Normas Cubanas: Reglamento Electrotécnico Cubano para instalaciones eléctricas en edificaciones”. Centro de Gestión y Desarrollo de la Calidad, Oficina Nacional de Normalización, 2020. Disponible en: <https://especialidades.sld.cu/higienepidemiologia/2018/01/31/normas-cubanas-publicadas-sustituidas-y-corregidas-durante-diciembre-de-2017/>
- [9] IEC 61000-2-2. “Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems”, 2002. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/63116>
- [10] IEC 61000-3-4. “Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater Than 16 A”. 1998. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/4151>
- [11] TrashorrasMontecelos, J. “Vehículos eléctricos”. Ediciones Paraninfo, SA, 2019. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FMqwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=veh%C3%ADculos+el%C3%A9ctricos+&ots=sI8MFIB84L&sig=GmXigOj-RXjrKd8tgUdtN7SI3EY#v=onepage&q=veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos&f=false>
- [12] Marín, P. F., & Úbeda, J. R. “Vehículo eléctrico: situación actual y perspectivas futuras”. *Economía industrial*, 2019, vol. 411, p. 11-20. Disponible en: <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/411/FR%C3%8DAS%20Y%20ROM%C3%81N.pdf>
- [13] Energía y sociedad. “La eficiencia energética del vehículo eléctrico”. Libro en formato digital (pdf). 2022. Disponible en: <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Frank Grau Merconchini: <https://orcid.org/0000-0002-0174-5309>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del esquema de instrumentación, procesamiento de los datos, la redacción del manuscrito, análisis de los resultados y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.

Eduardo López Pérez: <https://orcid.org/0009-0008-2179-6809>

Participó en el diseño del esquema de instrumentación, procesamiento de los datos, la redacción del manuscrito, análisis de los resultados y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.

Miguel Castro Fernández: <https://orcid.org/0000-0002-3983-469X>

Participó en el diseño de la investigación, la redacción del manuscrito, análisis de los resultados y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.

Orestes Hernández Areu: <https://orcid.org/0000-0002-2672-239X>

Participó en el análisis de los resultados y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.