

Evaluación del impacto medioambiental en la utilización de motores eléctricos para aplicaciones de tracción ferroviaria.

Juan Francisco Cano Díaz

Departamento de Ingeniería Eléctrica.
Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú.
Universitat Politècnica de Catalunya
Av. Victor Balaguer 1, 08800 Vilanova i la Geltrú

Resumen

En el presente trabajo se compara la mejora en el impacto medioambiental y el ahorro económico obtenido gracias a utilizar el motor asíncrono trifásico 1TB220 del tren 447, en lugar del motor de corriente continua de excitación serie GEE326 del tren 446, durante su ciclo de vida de 30 años, en la línea R2 Sud de Vilanova i la Geltrú a Barcelona Estació de França. Para evaluar el impacto medioambiental y ahorro económico, se ha decidido utilizar la metodología MEERP (Methodology for Ecodesign of Energy-related Products), metodología propuesta por la Unión Europea.

1. Introducción

En la actualidad cada vez tiene más importancia utilizar productos más sostenibles, optimizando el uso de recursos materiales y energéticos, lo cual produce un ahorro energético y por lo tanto ganancias para las empresas y para el medio ambiente. Es por ello que en estos tiempos de debilidad económica, las empresas afrontan nuevos retos como la búsqueda de materiales innovadores y estrategias para la minimización del consumo energético. Además, un mayor ahorro energético muestra una diferencia importante respecto a la competencia.

El objetivo principal del presente trabajo es evaluar el impacto medioambiental en la utilización de motores eléctricos para aplicaciones de tracción ferroviaria, concretamente los utilizados en la unidad eléctrica 446 y 447 de Rodalies de Renfe, que son respectivamente el motor de corriente continua GEE326 y el motor asíncrono trifásico 1TB2220.

Para evaluar el impacto medioambiental serán utilizadas diferentes metodologías simplificadas de análisis del ciclo de vida (LCA) como son la metodología MEEUP (Methodology for the Eco-Design of Energy Using Products) y la metodología MEERP, metodologías propuestas por la Unión Europea. Se comparará la diferencia entre ambas para utilizar la más apropiada en este trabajo. Para familiarizarse con ambas metodologías, se utilizan dos ejemplos de motores de inducción trifásicos convencionales de diferentes eficiencias energéticas.

Una vez conocidas las herramientas de las metodologías anteriores, se seleccionan las variables necesarias para poder analizar el impacto medioambiental de los motores del trabajo, estudiando en concreto la línea de Rodalies R2 Sud de Estació de França a Vilanova i la Geltrú.

Mediante la obtención de los circuitos equivalentes de cada motor se calculan sus respectivos consumos energéticos, teniendo en cuenta las condiciones de carga y de funcionamiento. Este punto es muy importante, pues una buena aproximación del circuito equivalente es vital para poder obtener unos cálculos de consumo energético del tren próximo a la realidad.

Posteriormente se calcula la energía total consumida por el motor de cada unidad de tren.

Por último se evalúa el impacto medioambiental de cada motor en la línea ferroviaria estudiada y se realiza un estudio económico, comparando los resultados obtenidos a partir de la utilización de los dos tipos de motores mediante ratios específicos propios de la tracción ferroviaria.

2. Comparación metodologías MEEUP y MEERP.

El análisis del ciclo de vida de un producto consiste en cuantificar los impactos medioambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia (extracción, fabricación, distribución, utilización y desecho). Para ello se introducen unas entradas (principalmente la lista de materiales que conforma el producto y el consumo energético) y mediante un proceso de cálculo se obtienen las salidas, diferenciando éstas en diferentes categorías como calentamiento global, residuos, etc.



Fig. 1. Análisis ciclo de vida de un producto.

Para comparar las metodologías MEEUP y MEERP se ha analizado el caso genérico de un motor de inducción con diferentes eficiencias, llegando a la conclusión de que las dos metodologías usan diferentes ratios para obtener los resultados de impacto medioambiental. Se ha decidido usar la metodología MEERP, que cumple con la directiva 2009/125/CE, por ser la más actualizada de las dos.

3. Aplicación de los motores eléctricos en la tracción ferroviaria.

Las primeras líneas ferroviarias que se edificaron eran de corriente continua, existiendo en aquellos tiempos tres tipos de motores: el motor de corriente continua, el motor síncrono y el motor asíncrono. Por falta de evolución de la electrónica de potencia, el más sencillo de regular era el de continua. El motor de corriente continua con excitación en serie es el más idóneo para la tracción eléctrica, ya que presenta un par de arranque elevado y sus inconvenientes de no poder funcionar sin carga y que la velocidad disminuye al aumentar la carga se adaptan perfectamente en tracción (adaptando la curva característica par-velocidad del motor a la característica par-velocidad que requiere la carga).

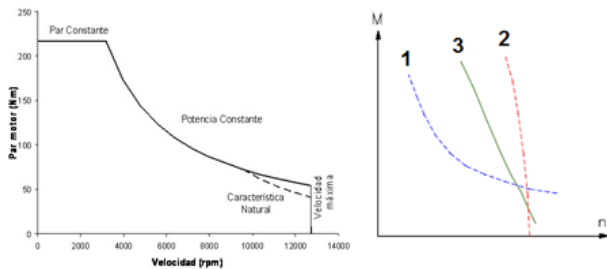


Fig. 2. Curva límite de tracción (Izquierda) y curvas par-velocidad del motor de corriente continua con excitación serie (1), paralelo e independiente (2) y mixta (3).

A partir de 1990, el motor instalado por excelencia es el asíncrono trifásico, hecho posible gracias a la evolución de la electrónica de potencia. Comparándolo con su competidor, el motor de corriente continua, las principales ventajas son:

- Mejor relación peso/volumen: un menor peso y volumen permite instalar mayor potencia por bogie y ser menos agresivo a la vía.
- Menor mantenimiento: funciona hasta que se degradan los aislantes, no tiene escobillas (como el motor de corriente continua).
- Alta fiabilidad de funcionamiento: Motor robusto y resistente.

4. Motores eléctricos de las unidades 446 y 447.

El motor de la unidad 447 es asíncrono trifásico de 6 polos con rotor en cortocircuito con las siguientes características nominales:

Con.	V (V)	I (A)	Pu (kW)	N (rpm)	cos fi	f (Hz)
Y	1800	127	320	1900	0,82	96

Tabla 1. Características nominales motor unidad 447.

A partir de los datos anteriores se obtiene un rendimiento nominal de 98,56 % y un par nominal de 1608,3 Nm.

El accionamiento eléctrico del motor asíncrono de la unidad 447 es el siguiente:

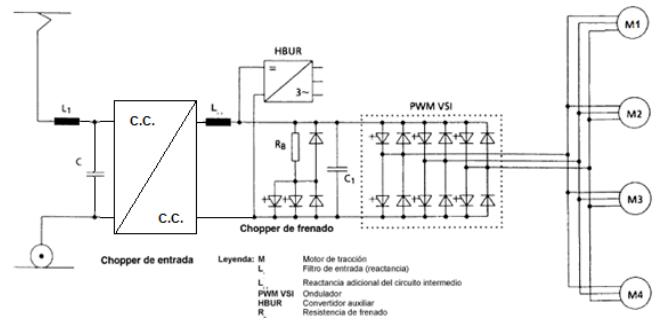


Fig. 3. Accionamiento eléctrico motor unidad 447.

Como se aprecia en la figura anterior, está formado por un filtro de entrada (que protege al sistema de posibles sobretensiones en la catenaria y filtra armónicos), un troceador reductor y un ondulator.

La variación de velocidad se realiza variando la relación tensión-frecuencia (V/f) hasta tensión nominal. Una vez alcanzada ésta, para seguir aumentando la velocidad se aumenta la frecuencia.

El motor de la unidad 446 es de corriente continua con excitación en serie. Contiene 4 polos principales y 4 auxiliares. Además incorpora un bobinado de compensación en los polos principales. Los valores nominales son:

V (V)	I (A)	Pu (kW)	N (rpm)
1500	218	300	1450

Tabla 2. Características nominales motor unidad 446.

A partir de los datos anteriores se obtiene un rendimiento nominal de 91,74 % y un par nominal de 1975,72 Nm.

El accionamiento eléctrico del motor de corriente continua excitación serie de la unidad 446 es el siguiente:

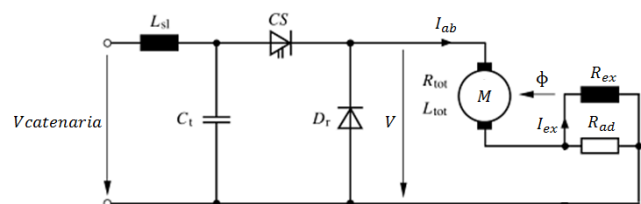


Fig. 4. Accionamiento eléctrico motor unidad 446.

Como se aprecia en la figura anterior, está formado por un filtro de entrada y un troceador reductor (chopper).

La forma de regular la velocidad del motor es:

- Hasta llegar a la tensión nominal: Variar la tensión de alimentación del motor.
- Alimentado a tensión nominal: Variar la corriente de excitación, implementando resistencias en paralelo con la resistencia de excitación.

Ambos trenes son traccionados por ocho motores mediante los bogies. La disposición de los motores en un bogie es la siguiente:

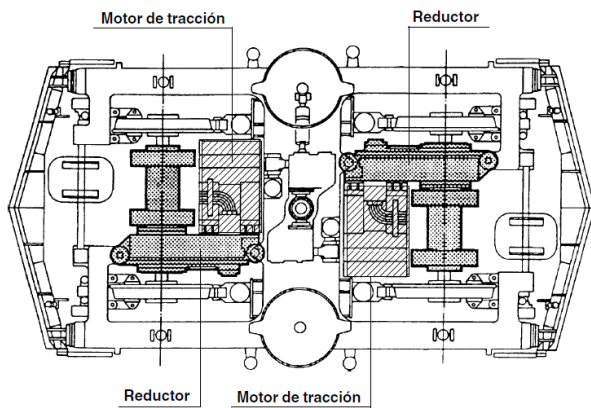


Fig. 5. Disposición motores eléctricos en bogie.

5. Circuitos equivalentes de los motores de las unidades 446 y 447.

- Motor asíncrono 1TB220 (unidad 447):

Para el motor asíncrono trifásico de la unidad 447 son estudiados dos circuitos equivalentes en régimen permanente, el clásico (CE clásico) y el mejorado (CE mejorado) que incluye todas las pérdidas del motor, incluyendo, respecto de las pérdidas que contempla el CE clásico, las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales en carga.

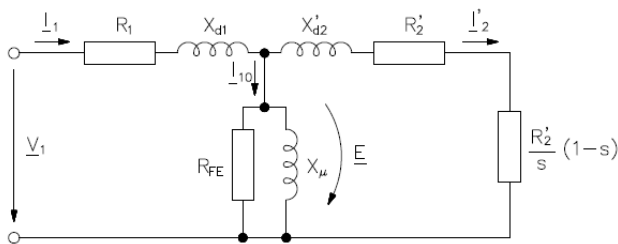


Fig. 6. Circuito equivalente clásico por fase del motor asíncrono.

Dónde:

R_1 = Resistencia estator.

X_{d1} = Reactancia estator.

R'_2 = Resistencia rotor referida a estator.

X'_{d2} = Reactancia rotor referida a estator.

R_{FE} = Resistencia de pérdidas en el hierro.

X_μ = Reactancia magnetizante.

s = Deslizamiento.

V_1 = Tensión de alimentación.

I_1 = Corriente absorbida.

E = Fuerza electromotriz (f.e.m) inducida en el rotor.

I_{10} = Corriente rama de vacío.

I'_2 = Corriente rotor, referida a estator.

$\frac{R'_2}{s} \cdot (1-s)$ = Término que representa la potencia mecánica desarrollada por el motor.

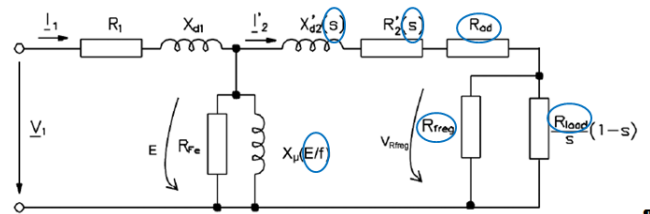


Fig. 7. Circuito equivalente mejorado por fase del motor asíncrono. Respecto al CE clásico, se destacan las diferencias.

Este circuito incorpora diferentes cambios importantes respecto al anterior, considerando:

- 1) Variación de la inductancia magnetizante (L_μ) respecto la f.e.m (E) y la frecuencia de red (f). (Este hecho implica considerar los efectos de saturación, ya que E/f es proporcional al flujo magnético).
- 2) Resistencia de pérdidas en el hierro (R_{FE}) en función de la inducción y de la frecuencia.
- 3) Pérdidas mecánicas proporcionales a la velocidad del motor.
- 4) Pérdidas adicionales en carga (P_{ad}), pérdidas de naturaleza difíciles de evaluar que dependen de factores de diseño y de fabricación del motor, calculadas como pérdidas joule en la resistencia adicional (R_{ad}).
- 5) Resistencia de carga (R_{load}).
- 6) Parámetros del rotor en función del deslizamiento ($X'_{d2}(s)$; $R'_2(s)$).

Se comparan gráficamente los resultados obtenidos al analizar los dos circuitos con respecto a los ensayos en carga facilitados por Renfe, apreciando la mejora obtenida mediante el circuito equivalente mejorado.

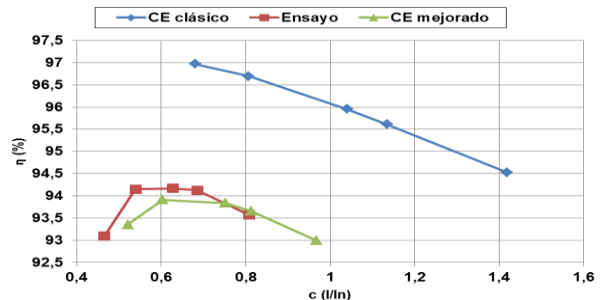


Fig. 8. Rendimiento en función del índice de carga.

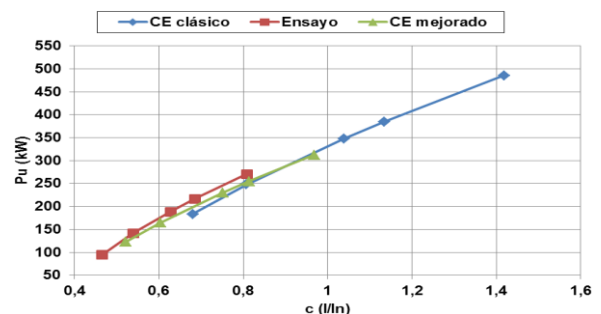


Fig. 9. Potencia útil en función del índice de carga.

- Motor de corriente continua GEE326 (unidad 446):

El circuito equivalente en régimen permanente utilizado para el motor de corriente continua excitación serie de la unidad 446 es el siguiente:

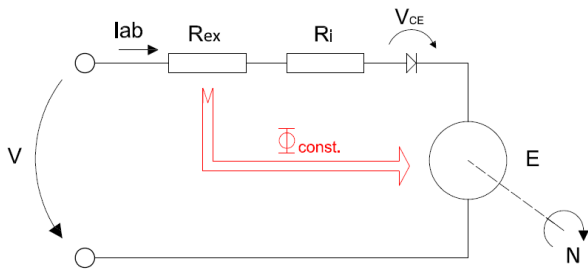


Fig. 10. Circuito equivalente motor corriente continua excitación serie.

Dónde:

R_{ex} = Resistencia de excitación (También conocida como resistencia de polos principales).

R_i = Resistencia de inducido.

V_{CE} = Caída de tensión en el conjunto colector-escobillas.

E = F.e.m inducida.

Cabe añadir que las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales en carga se consideran posteriormente en el análisis del circuito anterior, para tenerlas en cuenta en el cálculo de la potencia útil y del par útil, así como del rendimiento.

También se dispone de un ensayo en carga del motor facilitado por Renfe. Se han comparado gráficamente los resultados del ensayo con los resultados del análisis del circuito equivalente (CE).

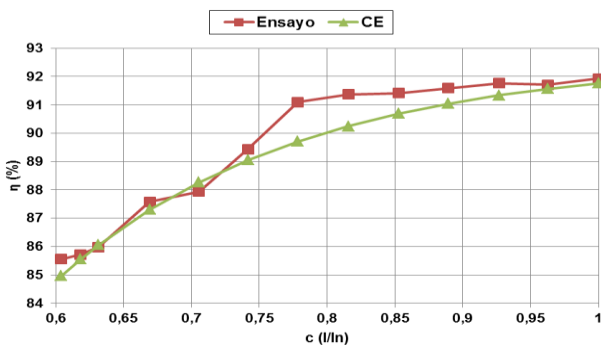


Fig. 11. Rendimiento en función de la velocidad del motor.

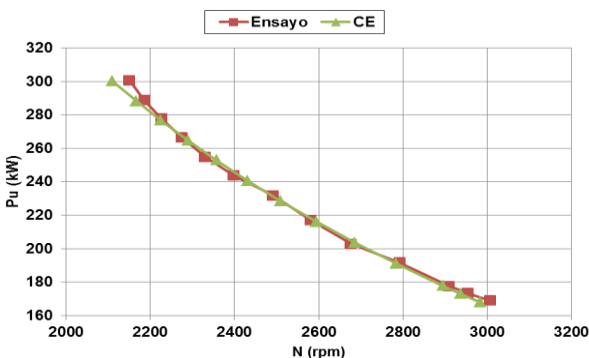


Fig. 12. Potencia útil en función de la velocidad del motor.

5. Cálculo del consumo de energía anual en la línea ferroviaria Vilanova-Barcelona.

Para el cálculo de consumo de energía anual de los motores de las unidades 446 y 447 se ha escogido el trayecto R2 Sur de Rodalies de Vilanova i la Geltrú a Barcelona Estació de França (figura 13).



Fig. 13. Trayecto R2 Sur de Rodalies.

A partir del procedimiento de cálculo establecido, de los datos necesarios de cada tren (extraídos de la información aportada por Renfe, figura 14), de la obtención de la fuerza resistente al avance y el uso de las hojas de cálculo elaboradas para analizar los circuitos equivalentes de los motores, se obtiene el consumo de energía en cada tramo de la línea indicada.

Cabe aclarar primero el listado de hipótesis para este estudio:

- 1) Rendimiento constante del motor en cada tramo.
- 2) Rendimiento constante del convertidor de potencia.
- 3) Potencia útil del motor en cada tramo obtenida de forma media.
- 4) Curva trapezoidal que relaciona la velocidad del tren en función del tiempo en cada tramo.
- 5) Rendimiento de transmisión constante.
- 6) Fuerza resistiva al avance obtenida mediante valores aerodinámicos aconsejados.
- 7) No se considera el freno regenerativo, ni por tanto el consumo de los servicios auxiliares del tren.
- 8) Se considera siempre el tren con la máxima carga y con funcionamiento normal de tracción (8 motores).
- 9) No se consideran incidencias, por tanto se cumplen las velocidades por tramo establecidas, los horarios de operación en días laborables, en días festivos, y paradas por mantenimiento.
- 10) Aproximación de velocidad lineal del tren respecto de la velocidad angular del motor mediante ecuación facilitada por Renfe.

Tren 446 (motor corriente continua)	Tren 447 (motor asincrono trifásico)
<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento transmisión (%) = 90 • Relación de transmisión = 3,59 • Diametro rueda (m) = 0,89 • Potencia nominal motor (kW) = 300 • Número de motores tractores en condiciones normales de funcionamiento = 8 • Masa máxima tren (T) = 219,6 • Aceleración (m/s²) = 0,5 • Rendimiento convertidor (%) = 98 • Velocidad máxima tren (km/h) = 100 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento transmisión (%) = 90 • Relación de transmisión = 4,82 • Diametro rueda (m) = 0,89 • Potencia nominal motor (kW) = 320 • Número de motores tractores en condiciones normales de funcionamiento = 8 • Masa máxima tren (T) = 216,1 • Aceleración (m/s²) = 0,5 • Rendimiento convertidor (%) = 98,5 • Velocidad máxima del tren (km/h) = 120

Fig. 14. Datos utilizados de los trenes 446 y 447.

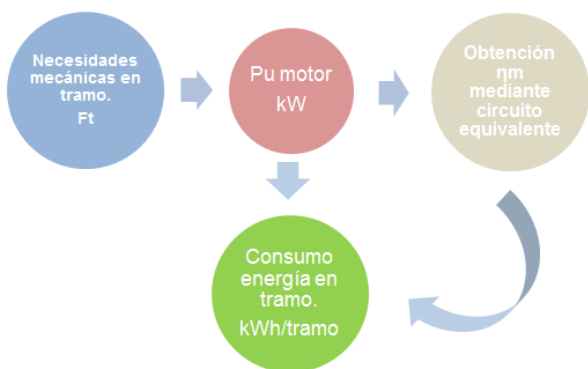


Fig. 15. Procedimiento para obtener la energía consumida por tramo.

Se aproxima de forma trapezoidal la curva característica de velocidad lineal del tren en función del tiempo para cada tramo entre paradas del tren, simplificando así el método de cálculo, ya que posibilita obtener las distancias de arranque, de velocidad constante y de deceleración mediante el cálculo de áreas simples como la del rectángulo para la aceleración y deceleración y la del cuadrado para el tramo de velocidad constante.

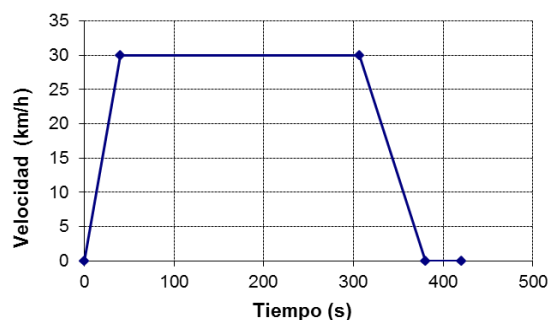


Fig. 16. Trapezoide velocidad del tren en función del tiempo en tramo Vilanova i la Geltrú-Sitges con tren 446.

Los valores conocidos (facilitados por Renfe) a tener en cuenta para su obtención son:

- Distancia entre paradas.
- Velocidad máxima de tramo.
- Velocidad máxima del tren.
- Distancia de frenado (1,5 km).
- Tiempo de parada del motor (aproximado mediante cronómetro).

Se calcula la potencia útil media del motor por tramo, y una vez obtenida esta potencia, mediante las hojas de cálculo de los circuitos equivalentes, se obtiene el rendimiento del motor. En la energía total consumida por trayecto se han considerado los rendimientos del motor, del convertidor de potencia y de la transmisión.

A partir del número de viajes del tren en días laborables y festivos (15 en cada caso), la distancia del trayecto (49,4 km) y las paradas en taller por mantenimiento (32 días laborables al año), se obtiene la energía anual consumida. Conociendo la energía consumida por distancia y la distancia anual recorrida, se obtiene la energía consumida

anual por cada motor (205,618 MWh/año el motor de la unidad 446 y 171,71 MWh/año el motor de la unidad 447).

En la figura 17 se presentan los consumos de energía obtenidos en cada uno de los tramos de la línea ferroviaria estudiada con la dos unidades.

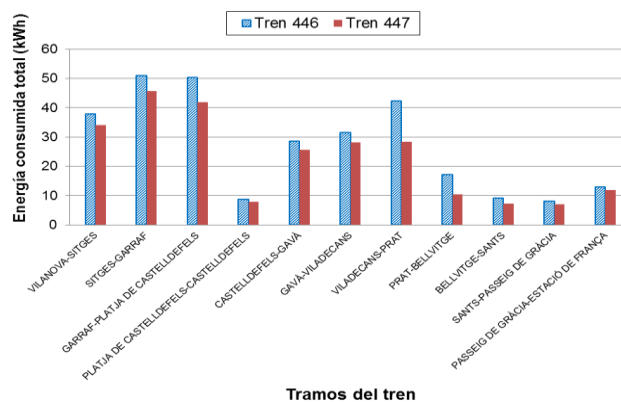


Fig. 17. Energía consumida total (kWh) en cada tramo.

6. Evaluación del impacto medioambiental debido a los motores eléctricos en la línea ferroviaria Vilanova-Barcelona.

Mediante la energía consumida anual de cada motor por distancia, la distancia recorrida anual, la vida útil del motor y el desglose de materiales de cada motor facilitados por Renfe, se procede a analizar el impacto medioambiental con la metodología MEERP durante el ciclo de vida de cada motor, estimado en 30 años.

Cabe comentar que los indicadores de impacto medioambiental se calculan de forma automática a partir de los índices de impacto (ratios) que la metodología simplificada aplica en la hoja de cálculo. Estos índices de impacto están basados en un mix de energía establecido por la Unión Europea.

A partir del análisis del ciclo de vida para cada motor se ha calculado el impacto medioambiental en cada caso. En la figura 18 se presenta el resultado de la reducción porcentual que se obtiene utilizando el motor de la unidad 447 en lugar del motor de la unidad 446.

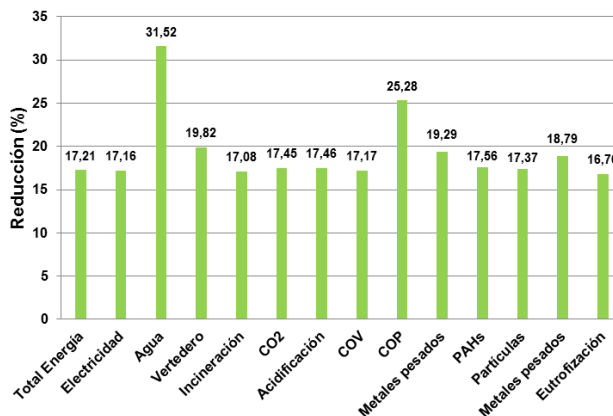


Fig. 18. Reducción del impacto medioambiental en cada indicador (%) durante el ciclo de vida al usar el motor asíncrono trifásico en lugar del motor de corriente continua.

Además cabe destacar la importancia de la reducción de emisiones al aire del dióxido de carbono (CO₂), gas que regula el calentamiento global de la Tierra, por ello se muestra gráficamente:

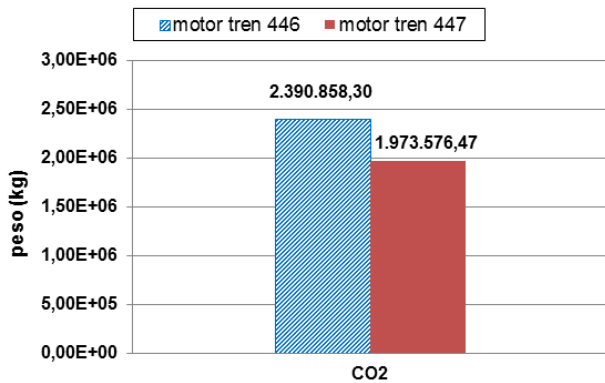


Fig. 19. Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida en cada unidad

Se aprecia una reducción de 417,28 toneladas de CO₂, que dividido entre la distancia recorrida anual del tren en km, se obtiene un ratio de ahorro de emisiones de 1,53 gr CO₂/km.

Respecto al resultado económico obtenido utilizando la metodología MEERP, queda evidenciado que el coste económico durante el ciclo de vida es favorable al uso del motor de inducción de la unidad 447. La diferencia de los costes totales calculados muestra que el ahorro económico durante todo el ciclo de vida es de 75.572 € (0,92 ctos/km).

7. Conclusiones

En la actualidad el ahorro energético es una de las prioridades de cualquier producto que consume energía, es por esto que se considera uno de los temas con mayor auge actualmente.

El objetivo principal del presente trabajo consiste en comparar el impacto medioambiental y el ahorro energético obtenido en la utilización del motor asíncrono trifásico del tren 447, en lugar del motor de corriente continua de excitación serie del tren 446, durante su ciclo de vida en la línea R2 Sud de Vilanova i la Geltrú a Barcelona Estació de França.

La utilización de la herramienta MEERP para el análisis del ciclo de vida de forma simplificada (y la comparación efectuada con su antecesora MEEUP), han permitido de forma relativamente sencilla y directa establecer una evaluación medioambiental acorde con la normativa propuesta por la Unión Europea.

Se puede decir que el procedimiento utilizado para calcular la energía consumida anual en tracción ferroviaria ha sido el adecuado, ya que se ha comparado el resultado obtenido del cálculo efectuado en tren 447 con otro de muy similares características, el Civia 465, del que se disponen de datos de referencia.

Comparando la energía consumida anual de cada motor de estudio del trabajo, como era de esperar, los resultados han sido favorables hacia el motor asíncrono trifásico, con un ahorro anual de 33,87 MWh (0,12 kWh/km), de ahí que sea el motor más utilizado actualmente en la tracción

ferroviaria. Además, respecto al análisis del ciclo de vida mediante la metodología MEERP, el mayor impacto medioambiental en la fase de uso justifica la importancia de mejorar el rendimiento en los motores de tracción. Comparando los datos en todo el ciclo de vida del producto, se consiguen varios ahorros medioambientales como 417,28 toneladas de CO₂ (1,53 gr CO₂/km) y un ahorro económico de 75.572 € (0,92 cts./km).

El proyecto se podría mejorar modelizando el motor y la carga en régimen dinámico y obteniendo valores reales de inercias del motor, inercia de la transmisión y los coeficientes de rozamiento estático y dinámico. Una posibilidad es estudiar con los circuitos en régimen permanente del trabajo en una serie de instantes de tiempo o bien, como mejor opción implementar los circuitos equivalentes de los motores en régimen dinámico, hecho que implica usar alguna herramienta de cálculo más potente, como Matlab-Simulink. No obstante para este último, transcurrido el régimen dinámico, también valdrían los circuitos en régimen permanente de este estudio. Una de las dificultades de trabajar con los circuitos equivalentes en régimen dinámico de los motores sería mejorar los circuitos equivalentes que se usan actualmente, e incluir en ellos todas las pérdidas del motor. La inclusión de todas las pérdidas ha podido realizarse en los circuitos equivalentes de régimen permanente, y ha quedado demostrado en el trabajo la importancia de cuantificar todas las pérdidas del motor por su influencia en el consumo de energía y en la valoración del impacto medioambiental durante la fase de uso del motor.

Escogí este proyecto porque en el grado de ingeniería eléctrica me ha sido de especial interés tanto las máquinas eléctricas rotativas como el control mediante sus accionamientos, además me interesó el hecho de poder evaluar el impacto medioambiental de un caso real en el sector ferroviario. Durante el desarrollo del mismo, he comprobado que ha sido una buena elección, porque a pesar de las dificultades como añadir un listado de hipótesis, buscar información necesaria, correcto uso de las hojas de cálculo...todo esto me ha servido para aprender a trabajar a partir de unos datos que se disponen y poder conseguir un resultado lo más próximo a la realidad.

Referencias

- [1] *Electric traction (chapter 43)*. [en línea]. España. [Consulta: 16 Mayo 2015]. Disponible a: <http://es.slideshare.net/mhmdenab/ch-43> 46924459<
- [2]: Alberto Garcia Álvarez, *Energía y emisiones en FC*, 2ª edición noviembre 2010. [en línea]. España. [en informe].
- [3]: Norma española UNE-EN 60034-2-1 (octubre 2009): *Máquinas eléctricas rotativas, métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y el rendimiento a partir de ensayos* (excepto las máquinas de vehículos de tracción) [en archivo].