

Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica



Francisco Javier Olea

Ingeteam

Monografías **ElecRail** / 2

Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica

Francisco Javier Olea

Ingeteam



Con la subvención del Centro de Estudios y experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2007-038-20IAPM.

© Francisco Javier Olea

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto ElecRail, 2010

ISBN: 978-84-89649-86-6

Depósito Legal: M-12056-2012



ÍNDICE

ÍNDICE	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. TECNOLOGÍA AC (Corriente Alterna) FRENTE A TECNOLOGÍA DC (Corriente Continua)	5
2.1. Análisis de adherencias disponibles	5
2.2. Recuperación de energía en el proceso de frenado	8
2.3. RAMS y LCC	8
2.4. Otros aspectos	9
2.5. Conclusiones	9
3. EFICIENCIA DE LAS CADENAS DE TRACCIÓN DE TECNOLOGÍAS AC (Corriente Alterna)	11
3.1. Comparativa entre las distintas máquinas rotativas destinadas a la tracción ferroviaria	11
3.1.1 Máquina de corriente continua (DC)	11
3.1.2 Máquina Síncrona convencional (AC)	12
3.1.3 Máquina Asíncrona de rotor de jaula de ardilla	13
3.1.4 Máquina Síncrona de imanes permanentes (AC)	15
3.1.5 Conclusiones	16
3.2. Comparativa entre transformadores de tracción monofásicos	17
3.2.1 Reactancia de cortocircuito	17
3.2.2 Transformadores de 15 Kv $16^{2/3}$ Hz	19
3.2.3 Transformadores de 25 kV 50 Hz	19
3.2.4 Conclusiones	20
3.3. Comparativa entre convertidores de tracción	20
3.3.1 Dispositivos de conmutación	20
3.3.2 Conclusiones	21
3.4. Rendimiento en las reductoras	22
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	24

1. INTRODUCCIÓN

El objeto del presente documento es realizar un análisis comparativo de la tecnología de corriente alterna frente a la tecnología de corriente continua y su eficiencia en las cadenas de tracción eléctrica destinada a material ferroviario rodante.

A pesar de que en la actualidad la tecnología de corriente alterna trifásica está ampliamente extendida en los vehículos de nueva construcción, en España así como en el resto del mundo, existe un número muy elevado de vehículos ferroviarios, especialmente locomotoras eléctricas y diesel-eléctricas, que siguen incorporando tecnología de corriente continua. En estas unidades, a primera vista, se suele suponer que su eficiencia es igual de buena que la de las unidades de corriente alterna trifásica, pero analizando todos los factores, que en ellas influyen, en este documento se pretende mostrar que existe una diferencia considerable a tener en cuenta que se traduce en pérdida de efectividad y ahorro energético.

Adicionalmente a esta comparativa y centrándose en las cadenas de tracción de corriente alterna trifásica, se realiza un análisis enfocado en el rendimiento de los distintos equipos que intervienen en la cadena de tracción de corriente alterna, tratando de apuntar hacia las soluciones que pudieran resultar más eficientes.

2. TECNOLOGÍA AC (Corriente Alterna) FRENTE A TECNOLOGÍA DC (Corriente Continua)

Desde aquellos primeros años al principio de la década de los 70, cuando ABB Tracción comenzó a apostar e impulsar la tecnología trifásica de corriente alterna (AC), frente a la convencional o chopper de corriente continua (DC) en Europa, esta tecnología ha ido consolidándose, llegando a ser a día de hoy la única tecnología aplicada en vehículos de nueva construcción, con alguna rara excepción.

Las razones por las que poco a poco, la tecnología trifásica ha ido imponiéndose desde aquellos primeros años hasta nuestros días han sido muchas, siendo las principales las que se describen a continuación.

2.1. Análisis de adherencias disponibles

El coeficiente de fricción entre rueda y carril en condiciones de vía en buenas condiciones, limpia y seca se sitúa entre un 40% y un 45%, para cualquier tipo de vehículo ferroviario sobre carriles.

La característica de adherencia que presenta una unidad o locomotora, depende de la capacidad del equipo de tracción y su control de convertir el coeficiente de fricción rueda carril disponible en utilizable en cada momento.

Esta capacidad de adhesión rueda carril disponible, varía drásticamente entre las distintas unidades en función del equipo e tracción y control que incorporen, llegando a pasar de entre el 18% y el 20% de las primeras unidades con control y equipo de tracción DC sin sistema antipatinaje hasta valores de entre el 37% y el 40% en unidades dotados de cadena de tracción trifásica controlados por microprocesador.

Existen tres razones fundamentales por las que las cadenas de tracción trifásicas ofrecen valores tan altos de adherencia:

Si en una cadena de tracción DC estándar ocurre un patinaje, existe la tendencia del motor de corriente continua con excitación serie a embalarse, debido a la reducción de corriente y flujo que sufre, llegando incluso a velocidades de rotura mecánica, si no se reduce la carga o esfuerzo rápidamente. Esto es debido a que durante este proceso de patinaje en rueda, la velocidad de la misma se incrementa rápidamente, el coeficiente de fricción cae drásticamente a valores inferiores al 10% y como los motores están conectados entre sí, la única opción de corregir es la reducción de esfuerzo. En consecuencia, la máxima adherencia se consigue operando con unos márgenes de seguridad en adherencia considerables muy por debajo de los valores teóricos posibles. Por esta razón, los valores de adherencia máximos disponibles, dados por las normas como la UIC parecen tan conservadores hoy en día.

Sin embargo, los sistemas de corriente alterna AC, operan de un modo muy distinto, con resultados mucho mejores. La velocidad de la máquina asíncrona viene impuesta por la frecuencia que el control establece en el convertidor de tracción (velocidad de sincronismo) menos el pequeño deslizamiento del entorno

del 2% que ésta precisa para dar par. Por lo tanto, como la maquina asíncrona, funcionando como motor, en ningún caso puede exceder la velocidad de sincronismo impuesto desde el convertidor, cualquier patinaje que se produzca es mínimo (del valor del deslizamiento). Además se detecta muy rápidamente y se realiza una corrección casi instantánea.

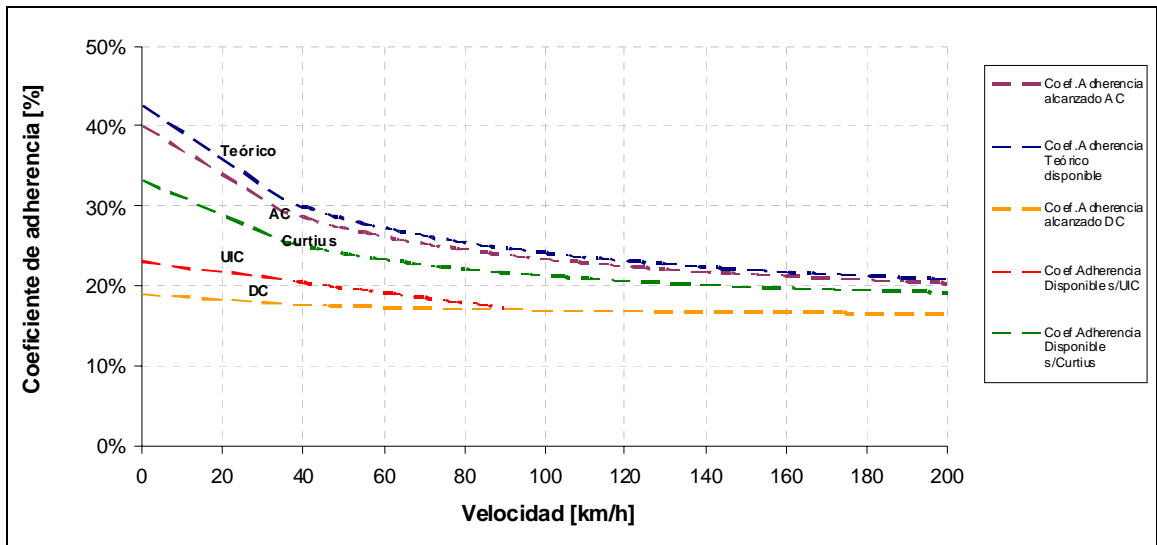
Las cadenas de tracción de corriente continua (DC), típicamente operan con un número de muescas en el combinador de mando que imponen una serie de modos y puntos de funcionamiento que corresponden a unos determinados niveles de potencia para cada uno. Sin embargo, este sistema que es sencillo y efectivo a la hora de operar, no produce un par constante del motor de tracción, dado que la potencia es el producto de par por velocidad. Por lo tanto el esfuerzo de tracción varía significativamente para cada uno de las posiciones del combinador de mando, o puntos de potencia, dependiendo de la velocidad, haciendo imposible obtener la máxima adherencia.

Los equipos de tracción de corriente alterna (AC) sin embargo, pueden controlar el par de motor a un nivel concreto establecido por el control, permitiendo que el esfuerzo de tracción en rueda sea prácticamente constante, obteniendo unos rangos de adherencia los más elevados posibles.

La tercera razón por la cual los equipos de tracción de corriente alterna (AC) proveen mejoras en la adherencia, sobre todo en las locomotoras y cabezas tractoras, es a través de la compensación de transferencia de peso entre bogies. Cuando una locomotora está arrastrando una carga, el peso tiende a transferirse desde los ejes del bogie delantero hacia los ejes del bogie trasero, debido al momento que ejercen los motores de tracción sobre el total de la estructura del bastidor. Cuando se alcanzan los valores máximos del esfuerzo de tracción, el peso en el bogie delantero puede ser reducido sobre un 20%. El esfuerzo de tracción aplicable, es proporcional al peso adherente disponible en las maquinas, luego en un sistema DC donde los motores son alimentados por una fuente común, el esfuerzo de tracción será limitado por la capacidad de adhesión del bogie más ligero. De esta manera, en efecto, el peso equivalente de la locomotora es reducido en más o menos un 20%.

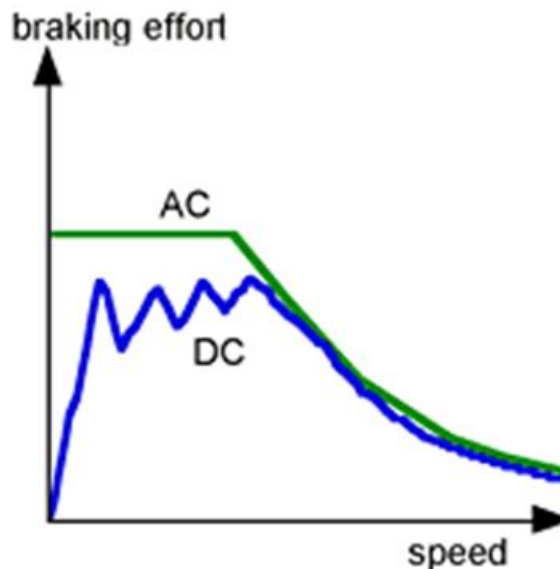
Como conclusión de este apartado, se puede afirmar que la combinación de la eliminación del patinaje en rueda junto con la compensación de la transferencia de peso provee al sistema AC de tracción, una adherencia de entre el 37% y el 39% contra el 18% al 20% del viejo sistema DC. Por lo tanto, las cadenas de tracción AC pueden garantizar el mismo esfuerzo tractor que las cadenas DC con la mitad de peso adherente o dicho de otro modo con la misma carga por eje, pueden ofrecer el doble de esfuerzo tractor.

Figura 1. Curvas de adherencia disponibles y obtenidas con cadenas de tracción AC y DC



El esfuerzo de freno disponible en llanta de las unidades, también es función de la adherencia disponible. Por esta razón, el freno electrodinámico en locomotoras y unidades de tracción dotados de cadenas de tracción de alterna (AC) pueden garantizar el mismo esfuerzo de freno que las cadenas DC con la mitad de peso adherente o dicho de otro modo con la misma carga por eje, pueden ofrecer el doble de esfuerzo de frenada. Además, las cadenas de tracción AC permiten ir decelerando hasta velocidad 0 con freno electrodinámico, cosa que era imposible con las cadenas de tracción DC.

Figura 2. Comparativa del esfuerzo de freno obtenido con cadenas de tracción AC y DC en función de la velocidad



2.2. Recuperación de energía en el proceso de frenado

En el caso de de las cadenas de tracción en corriente continua (DC), se precisan una serie de contactores de potencia que maniobren para permitir cambiar el sentido de la corriente de excitación del motor de tracción DC, cada vez que la unidad deba frenar con freno electrodinámico, con la pérdida de fiabilidad que ello supone. Por otro lado, la energía recuperada en la frenada, habitualmente es disipada en las resistencias de freno, dado que el equipo de tracción DC, no puede imponer una tensión constante a lo largo de todo el proceso de frenada en Bornes de las maquinas. Por esta razón, las cadenas de tracción en corriente continua se desconectan o aíslan de la catenaria durante dicho proceso de frenado.

En las cadenas de tracción trifásicas de corriente alterna, la energía cinética del tren es trasformada en energía eléctrica a través de los motores de tracción y el convertidor asociado a los mismos, sin la necesidad de ningún dispositivo electromecánico que maniobre. Con solo modificar la consigna de frecuencia y par impuestas a las maquina de tracción en el control del convertidor de tracción, el equipo cambia el signo de la potencia y comienza a frenar. De este modo, el tren tiene la capacidad de devolver toda la energía regenerada durante el frenado a catenaria (a excepción de las pérdidas por los rendimientos de la cadena de tracción), si la catenaria (y las cargas que cuelguen de la misma) pueden absorber dicha energía.

En una unidad de tren dotado de una cadena de tracción de corriente alterna trifásica, aproximadamente el 66% de la energía de tracción es regenerada en la frenada, en forma de energía devuelta a la red.

En este análisis, se omite voluntariamente, de qué otras formas se puede aprovechar dicha energía regenerada a la catenaria, cuando ésta no es receptiva, aunque cabe resaltar que Ingeteam dispone de soluciones muy novedosas y energéticamente eficientes para dar solución a dicha problemática.

La recuperación de la energía de frenado y su reutilización por otras unidades, supone una significativa mejora del rendimiento energético de los trenes dotados de sistemas de tracción de corriente alterna (AC) y contribuye además con la adecuación de las entidades explotadoras de material ferroviario a las políticas medioambientales y de ahorro energético de la Comunidad Europea de los últimos años.

2.3. RAMS y LCC

En cuanto a la Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad, Seguridad (RAMS) y costes del ciclo de vida de un vehículo ferroviario (LCC), tan solo se quiere dar una pincelada indicando que en los vehículos ferroviarios dotados de cadenas de tracción de corriente alterna trifásica (AC), la ventaja es considerable frente a los vehículos dotados de cadenas de tracción de corriente continua DC,. Para cada tipo de vehículo, Locomotoras, EMU's, LRV's, Tranvías etc., los valores cambian y en este documento no se pretende entrar a analizarlos, pero en cualquier caso, sí cabe decir que los índices de RAMS para los vehículos dotados de cadenas de tracción AC

superan a los vehículos dotados con cadenas de tracción DC con creces, mientras que con los costes de mantenimiento y LCC ocurre lo contrario.

Las cadenas AC ofrecen:

- Mayores índices de fiabilidad MTBF o MKBF, dado que los sistemas AC tienen muchos menos componentes electromecánicos, carecen de árbol de levas, motores con dispositivos de conmutación mecánicos, etc., cuya fiabilidad es muy inferior a los componentes de estado sólido utilizados en tecnologías de corriente alterna.
- Mayores índices de disponibilidad de unidades, dado que además de que las cadenas de tracción AC ofrecen mayores índices de fiabilidad, el mantenimiento es más simple y la reparación de averías es mucho más rápido debido a los sistemas de diagnóstico que disponen y que apoyan y centran al mantenedor de un modo eficaz.
- Menores costes de mano de obra de mantenimiento y piezas de parque dado que desaparecen la mayoría de contactores, árboles de levas motores con colector y dispositivos de conmutación mecánica, etc., frente a los motores asíncronos que apenas tienen más mantenimiento que un engrasado de rodamiento cada 500.000 o 1.000.000 de kilómetros. Un sistema DC en una de locomotora podría pasar de costar entorno a 2,5 €/km frente a 0,7 €/km para una locomotora AC moderna.
- Mayor seguridad

2.4. Otros aspectos

Por último, cabe citar que las cadenas de tracción de corriente alterna (AC) pueden mantener altas prestaciones en largos periodos de tiempo a bajas velocidades, mientras que las cadenas de tracción DC se recalientan seriamente si operan largos periodos de tiempo dando altas prestaciones a baja velocidad. Las cadenas de tracción DC pueden trabajar en régimen continuo a partir de velocidades de entorno a 20km/h y las DC prácticamente desde 0 km/h

2.5. Conclusiones

Tomando en consideración el hecho de los sistema AC de tracción, eliminan en gran medida la posibilidad de producirse patinajes en rueda, junto con la compensación de la transferencia de peso, que los controles de dicha tecnología realizan entre los ejes delanteros y traseros, se provee a los vehículos con adherencias rueda-carril de entre el 37% y el 39% contra el 18% al 20% de los vehículos dotados con el viejo sistema de tracción DC.

Por otro lado desde el punto de vista de RAMS y LCC en la actualidad los vehículos dotados de sistema de tracción AC son mucho más eficientes (mejores RAMS y menores LCC), tal y como se cita en párrafos anteriores.

Además, el solo hecho de que los vehículos dotados de tracción AC sean más ligeros que los vehículos dotados de tracción DC, para dar las mismas prestaciones, hace que en la vida útil de 30 años, se ahorren cantidades de energía enormes, por el simple hecho de no consumir en acelerar y decelerar masas adicionales, incrementando y incrementando su energía cinética inútilmente.

Por último, si a las razones anteriormente citadas, le añadimos que en los vehículos dotados de cadenas de tracción de corriente continua, raras veces son capaces de devolver la energía cinética que recuperan en la frenada a catenaria, esta tecnología queda en clara desventaja frente a la trifásica de corriente alterna.

Por lo tanto, se concluye que los nuevos vehículos ferroviarios deben estar dotados de equipos de tracción trifásicos de corriente alterna sin lugar a dudas. Otra discusión que no era objeto de este informe, pero que se aborda parcialmente en el siguiente apartado, es qué tipo de tecnología trifásica es la más óptima (sincronía, asíncrona, síncrona de imanes permanentes, etc.).

3. EFICIENCIA DE LAS CADENAS DE TRACCIÓN DE TECNOLOGÍAS AC (Corriente Alterna)

Una vez de concluir que existe una clara supremacía de los sistemas de tracción trifásicos de corriente alterna frente a los sistemas de tracción de corriente continua convencionales, en este apartado se pretende realizar un breve análisis de la eficiencia energética de los principales elementos que componen una cadena de tracción de corriente alterna.

Para ello, se han analizado los rendimientos de los distintos motores de tracción de corriente alterna (síncrona convencional, asíncrona de jaula de ardilla y síncrona de imanes permanentes) entre si y frente a la tradicional maquina de corriente continua en función de las potencia en eje.

Por otro lado se analizan también los rendimientos del transformador principal de los equipos alimentados con catenarias en alterna, tanto para 15 kV 16 2/3 Hz así como las catenarias de 25 kV 50 Hz, realizando una comparativa.

Para concluir se realiza un análisis de eficiencia de las distintas tecnologías de convertidores de tracción asociados a sus estrategias de control.

3.1. Comparativa entre las distintas máquinas rotativas destinadas a la tracción ferroviaria

3.1.1 Máquina de corriente continua (DC)

Las maquinas de corriente continua, en cuanto a principio de funcionamiento y control, son simples y de alta fiabilidad, si están bien mantenidos. Además, ofrecen muy altos pares de arranque, sobre todo en la topología en la que la excitación de la maquina se conecta en serie con el inducido (topología habitualmente utilizada en tracción ferroviaria).

Por otro lado y en los inicios de la tracción ferroviaria, se utilizó esta máquina, porque podía conectarse directamente a las catenarias de corriente continua y también en las de alterna, en combinaciones serie paralelo diversas, sin ninguna conversión ni transformación de energía adicional a la simple utilización de grupos de resistencia en serie entre los motores y la catenaria de modo que éstas limitasen su corriente máxima.

Sus principales inconvenientes frente a otros tipos de maquinas destinadas a la tracción ferroviaria son las siguientes:

- Tienen un colector de delgas desnudas sobre las que conmutan las escobillas y sobre las que a menudo se producen flashes si mecánicamente no está todo muy bien ajustado: Exige mucho mantenimiento.

- Muy sensible a la polución y sobre todo al polvo de grafito que se acumula en los colectores, porta escobillas y zonas próximas a estas, facilitando la producción y conducción de la corriente durante los flashes.
- Maquinas muy pesadas y voluminosas, donde la relación potencia/peso y potencia /volumen es muy inferior que en las maquinas síncronas y asíncronas de corriente alterna.
- Muy sensibles a los calentamientos y sobrecargas temporales, que deforman los colectores degradando la calidad de la conmutación.
- Ante las pérdidas de adherencia entre rueda y carril, tienden a embalarse, provocando los flashes en colector e incluso llegando al deterioro mecánico por sobre-velocidad en colectores y delgas.
- Rotor bobinado y con salida a cada delga del colector => Rotor costoso y complejo.
- Elevados costes de mantenimiento, debido en gran parte al desgaste de escobilla, reposición de éstas, requieren limpieza y rectificado de colectores periódicamente.
- Rendimientos inferiores frente a las maquinas síncrona y asíncrona.

En cuanto a los rendimientos, estos valores oscilan entre el 90% y el 94%

Ver Gráfica 6: Comparativa de la eficiencia entre las distintas maquinas de tracción, en función de la potencia en eje de las mismas.

3.1.2 Máquina Síncrona convencional (AC)

La maquina síncrona convencional, es una máquina que permite avanzar con respecto a la máquina de corriente continua, porque por un lado es una maquina fácil de controlar, permite tener el control de la excitación por separado y por otro lado tiene un devanado estatórico trifásico de corriente alterna, totalmente aislado, alimentado por un convertidor de tracción, cuyos algoritmos de control son relativamente simples.

Esta máquina no tiene colector, aunque sigue teniendo dos anillos rozantes a través de los que se alimenta la bobina de excitación ubicada en el rotor, pero su problemática y mantenimiento es muy inferior al de la máquina de corriente continua.

Por principio de funcionamiento intrínseco de la maquina, es imposible que su velocidad supere la velocidad de sincronismo impuesto por la frecuencia del convertidor de tracción.

Sus principales inconvenientes frente a la maquina asíncrona son las siguientes:

- Sigue manteniendo unas escobillas y unos anillos rozantes, aunque su coste de mantenimiento es muy inferior al de la máquina de corriente continua.
- Sensible a la polución y humedad (aunque menos que la máquina de corriente continua).
- Maquinas pesadas y voluminosas, donde la relación potencia/peso y potencia /volumen es inferior que la de la maquina asíncrona.
- Sensibles a los calentamientos y sobrecargas temporales, sobre todo el rotor y los devanados de éste.
- Rotor bobinado con salida del devanado rotórico a los anillos rozantes.

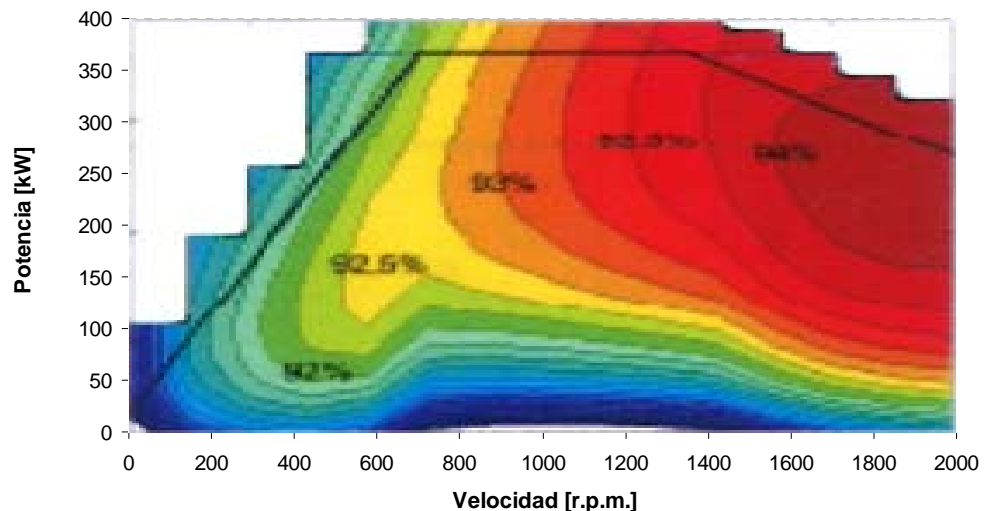
- Costes de mantenimiento, inferiores a las de la máquina de corriente continua, pero mayores que la máquina asíncrona.
- Rendimientos inferiores que el de la maquina asíncrona.

En cuanto a los rendimientos, estos valores oscilan entre el 92% y el 94%

En la gráfica adjunta, se puede observar los valores de rendimientos representados por líneas iso-eficientes (mismo rendimiento), representados por colores que van oscureciendo hacia el rojo oscuro en función de la mejora de la eficiencia energética, superpuestas sobre la característica de potencia de la maquina (trazo negro) en función de la velocidad.

Ver Gráfica 3: Rendimiento de la maquina síncrona convencional superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad y Gráfica 6: Comparativa de la eficiencia entre las distintas maquinas de tracción, en función de la potencia en eje de las mismas.

Figura 3. Rendimiento de la máquina síncrona convencional superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad: $\eta = 92\% - 94\%$



Nota: Curvas de rendimiento [%] de una máquina síncrona convencional de 360 kW superpuestas sobre la característica de potencia en eje en función de velocidad. Varía entre $\eta = 92\%$ en zona clara hasta un 94% en zona oscura.

3.1.3 Máquina Asíncrona de rotor de jaula de ardilla

Los principales factores intrínsecos por los que en las aplicaciones ferroviarias actuales se está utilizando el motor asíncrono son las siguientes:

- La ausencia de colector o elementos de paso de corriente por contacto al rotor
- Insensibilidad frente a la polución, humedad etc. por carecer de elementos desnudos bajo tensión en el interior del motor.
- Mayor relación potencia/peso y potencia /volumen que otro tipo de motores
- Posibilidad de mayores sobrecargas sin que ello suponga deterioros en la vida útil de la maquina.
- Alta fiabilidad de funcionamiento.

- Diseño adecuado para soportar los armónicos producidos por los convertidores de tracción.
- Gran robustez mecánica para las más altas solicitaciones requeridas.
- Alta capacidad térmica para soportar los ciclos de trabajo especificados con amplio margen para operación en emergencia.
- Construcción compacta protegida de las condiciones ambientales.
- Ruido mínimo conseguido por un diseño adecuado de los circuitos magnético y de refrigeración.
- Mínimo mantenimiento
- Mayor rendimiento que la máquina de corriente continua o la máquina síncrona convencional

Con todas estas ventajas, conocidas desde hace mucho tiempo, el factor determinante que ha posibilitado utilizar la máquina asíncrona de un modo generalizado como máquina de tracción de las cadenas de corriente alterna trifásicas, ha sido el gran avance de la microelectrónica y la posibilidad de disponer de Procesadores de Señal Digitales (DSP) que pudiesen controlar los principales variables de la máquina en tiempo real.

Para ello se han implantado algoritmos de control, con estrategias matemáticas que permiten independizar las corrientes que generan el par y el flujo entre si y también el resto de parámetros de la máquina que son función de la posición angular de esta, haciendo que no dependan de la rotación angular. Obviamente se trata de un control más complejo que el de las máquinas de corriente continua e incluso que el de las máquinas síncronas convencionales con excitación en rotor bobinado. Pero debido a la gran capacidad de procesamiento de los DSPs y astucias matemáticas como la Transformada de Park aplicado al caso particular de la máquina asíncrona (descomposición de los parámetros de la máquina en un modelo con nueva referencia de coordenadas d,q,o, entre los que se encuentran las corrientes I_d e I_q , imagen del flujo y del par respectivamente).

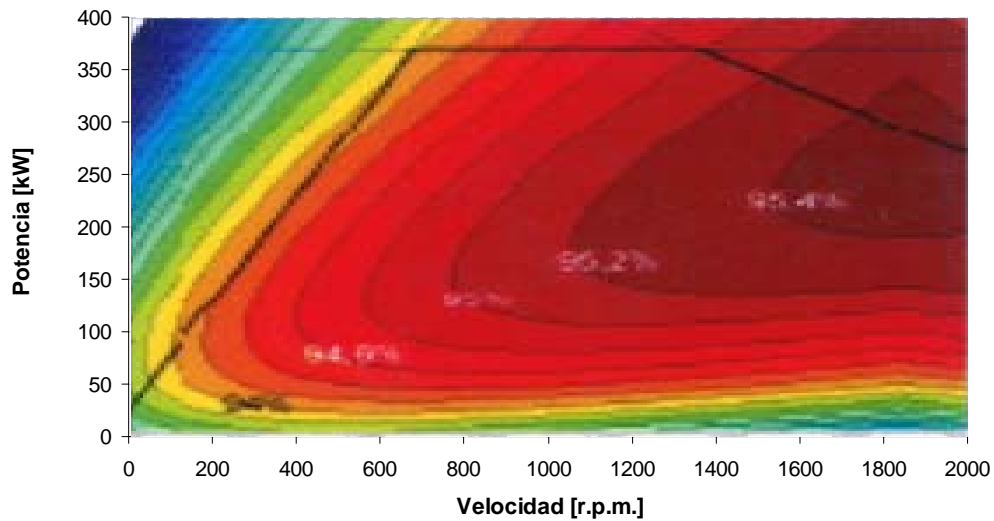
En consecuencia y por todo lo expuesto hasta ahora, hoy en día es posible beneficiarse de las bondades de la máquina asíncrona y su excelente rendimiento en las cadenas de tracción trifásicas. Estos valores oscilan entre el 93% y el 95%

Ver Gráfica 4: Rendimiento de la máquina asíncrona superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad y Gráfica 6: Comparativa de la eficiencia entre las distintas máquinas de tracción, en función de la potencia en eje de las mismas.

Además la combinación de las características intrínsecas de la máquina asíncrona, la combinación con un control optimizado permite un control de par lineal y uniforme con un control de patinaje y deslizamiento óptimos.

En la gráfica adjunta, se puede observar los valores de rendimientos representados por líneas iso-eficientes (mismo rendimiento), representados por colores que van oscureciendo hacia el rojo oscuro en función de la mejora de la eficiencia energética, superpuestas sobre la característica de potencia de la máquina (trazo negro) en función de la velocidad.

Figura 4. Rendimiento de la máquina síncrona convencional superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad



Nota: Curvas de rendimiento [%] de una máquina asíncrona de 360 kW superpuestas sobre la característica de potencia en eje función de velocidad. Varía entre $\eta = 94\% - 95,5\%$

3.1.4 Máquina Síncrona de imanes permanentes (AC)

En la actualidad se está observando que incluso la máquina de tracción asíncrona puede ser superado en eficiencia por la máquina síncrona con rotor a imanes permanentes, tal y como han demostrado cadenas de tracción experimentales o prototipos como la del AGV de Alstom utilizado para batir el record mundial de velocidad sobre raíles.

Esta máquina, al igual que la asíncrona, no tiene ningún elemento desnudo bajo tensión en su interior y tampoco precisa de elementos de conmutación o de contacto por fricción, por lo que se puede afirmar que tiene todas las ventajas que ofrecía la máquina asíncrona, con costes de mantenimiento reducidos, pero con unos rendimientos bastante superiores.

Mecánicamente y desde el punto de vista constructivo, el problema de la fragilidad de los imanes de tierras raras ha sido resuelto satisfactoriamente así como los problemas de la desmagnetización de los mismos, por lo que todo indica que esta tecnología ya está disponible para dar paso más y superar el estado del arte de la tecnología trifásica con motores asíncronos.

Por supuesto, el hecho de que la máquina tenga un flujo permanente en el rotor, con su par reluctante adicional y tomando en cuenta toda la casuística que se da en una explotación ferroviaria, también presenta otros problemas que en este documento no se procede a analizar, pero requieren ciertamente que los algoritmos de control de la máquina síncrona con imanes permanentes sean aún más complejos que los de la máquina asíncrona. Se trata en definitiva de modelizar correctamente las funciones e implantarlos, dado que la tecnología en microelectrónica y control está disponible y lo permite con creces.

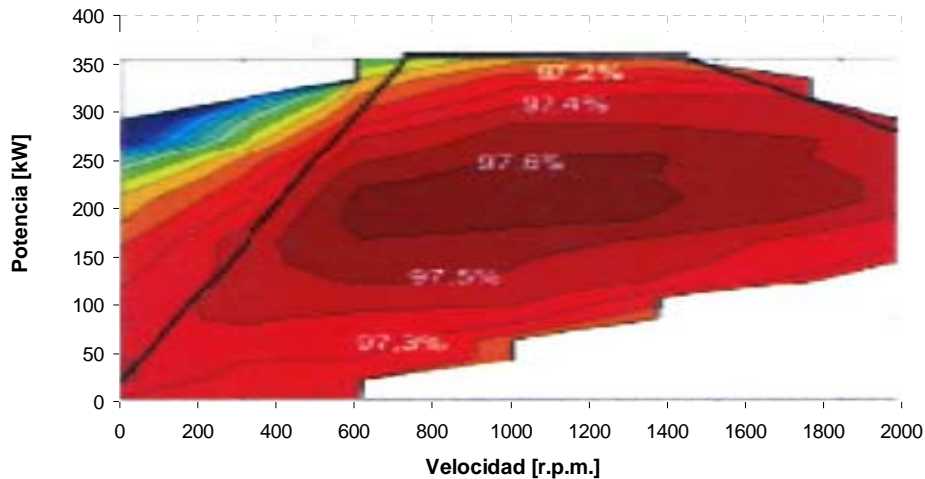
Los valores de rendimiento de estas máquinas a imanes permanentes, oscilan entre el 97,2% y el 97,6%, superando incluso los valores de los transformadores de potencia.

En la gráfica adjunta, se puede observar los valores de rendimientos representados por líneas iso-eficientes (mismo rendimiento), representados por colores que van oscureciendo hacia el rojo oscuro en función de la mejora de la eficiencia

energética, superpuestas sobre la característica de potencia de la maquina (trazo negro) en función de la velocidad.

Ver Gráfica 4: Rendimiento de la maquina síncrona a imanes permanentes, superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad y la Gráfica 6: Comparativa de la eficiencia entre las distintas maquinas de tracción, en función de la potencia en eje de las mismas.

Figura 5. Rendimiento de la máquina síncrona con imanes permanentes, superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad



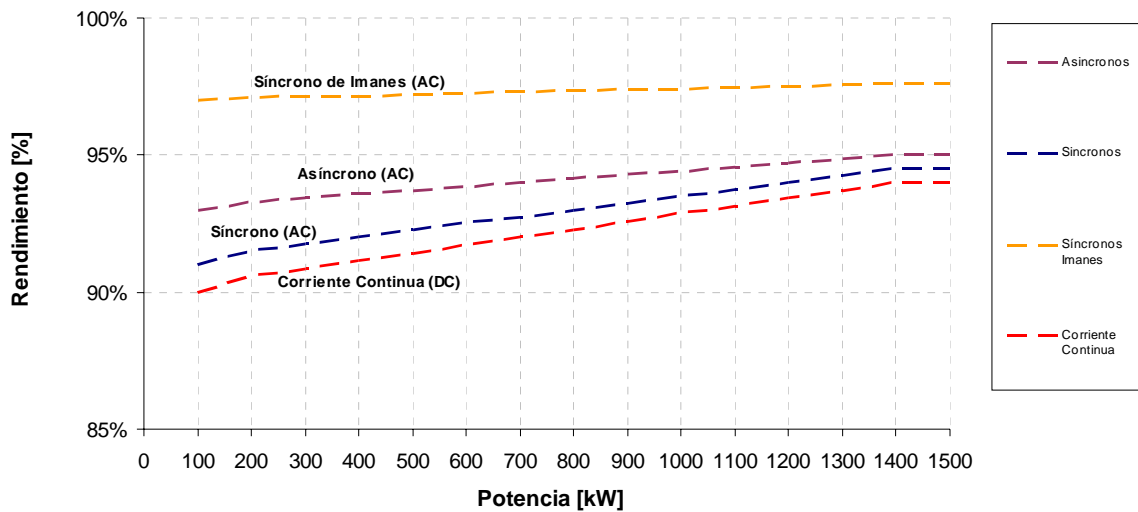
Nota: Curvas de rendimiento [%] de una máquina síncrona con imanes permanentes de 360 kW superpuestas sobre la característica de potencia en eje en función de velocidad. Varía entre $\eta = 97,2\%$ en zona clara hasta un $97,6\%$ en zona oscura.

3.1.5 Conclusiones

Tomando en consideración lo expuesto hasta este punto, en cuanto a maquinas de tracción ferroviaria se refiere, y teniendo en cuenta la importancia que día a día está adquiriendo la eficiencia energética en nuestra sociedad, está claro que el futuro apunta claramente hacia equipos de tracción ferroviaria de corriente alterna trifásica con motores síncronos de imanes permanentes.

En la gráfica adjunta (Gráfica 6), se presenta una comparativa de la eficiencia entre las distintas maquinas de tracción, en función de la potencia en eje de las mismas.

Figura 6. Comparativa de la eficiencia entre las distintas máquinas de tracción, en función de la potencia en eje de las mismas



Nota: Curvas de rendimiento [%] de las distintas máquinas utilizadas en cadenas de tracción de corriente alterna trifásica AC frente al rendimiento de la máquina de corriente continua DC, en función de la potencia en eje en [Kw]

Por otro lado considerando los resultados de este estudio, la comparativa de la eficiencia energética, no deja lugar a dudas de cuál es el camino correcto a seguir, pero además existe otro factor determinante que es la relación de pesos entre los distintos tipos de motores, que acaba por disipar cualquier rastro de duda que pudiese quedar.

La comparativa de pesos para una maquina del entrono de 400 kW en eje, arroja los siguientes resultados por tipo de maquina (no se incluye la de continua por estar completamente fuera de rango):

- Máquina Síncrona convencional: 1300 kg
- Máquina Asíncrona de jaula: 1050 kg
- Máquina Síncrona de imanes permanentes: 650 kg

Como conclusión, el futuro apunta claramente hacia equipos de tracción ferroviaria de corriente alterna trifásica con motores síncronos de imanes permanentes.

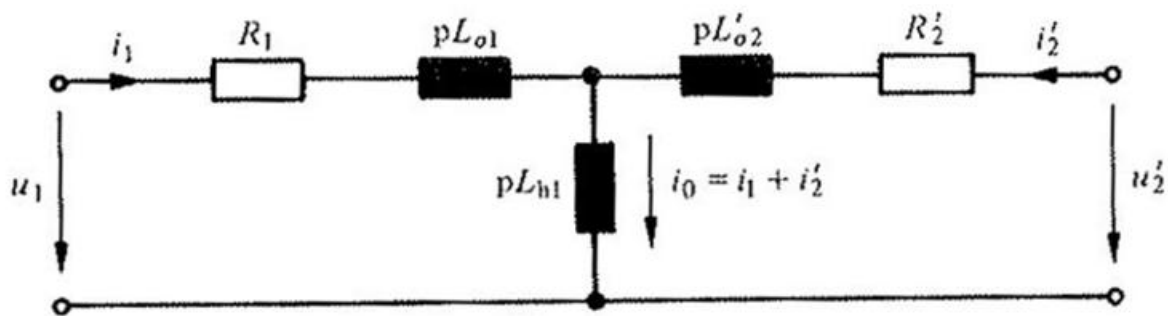
3.2. Comparativa entre transformadores de tracción monofásicos

3.2.1 Reactancia de cortocircuito

El transformador de tracción monofásico, es una máquina de tracción estática, utilizada para adecuar la tensión de la catenaria, cuando ésta es de corriente alterna, al equipo de tracción que se alimenta de él.

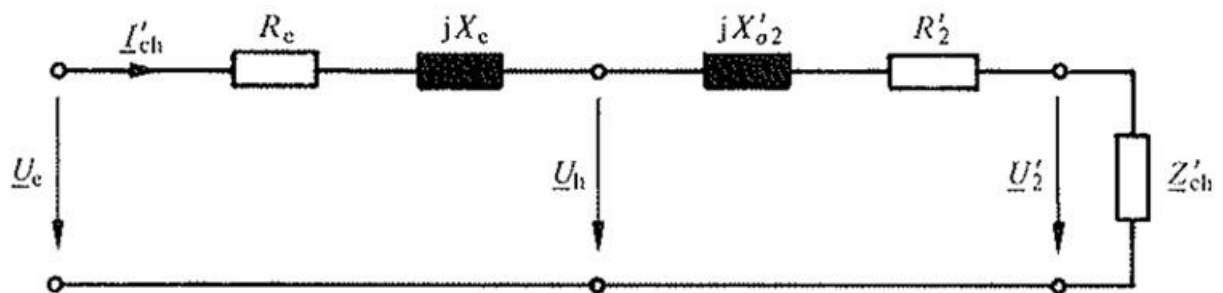
Si se parte del esquema real del transformador de tracción monofásico para obtener su circuito equivalente, en el que se omiten las pérdidas en el hierro, llegamos al diagrama representado en la gráfica adjunta.

Figura 7. Esquema equivalente de un transformador monofásico de tracción

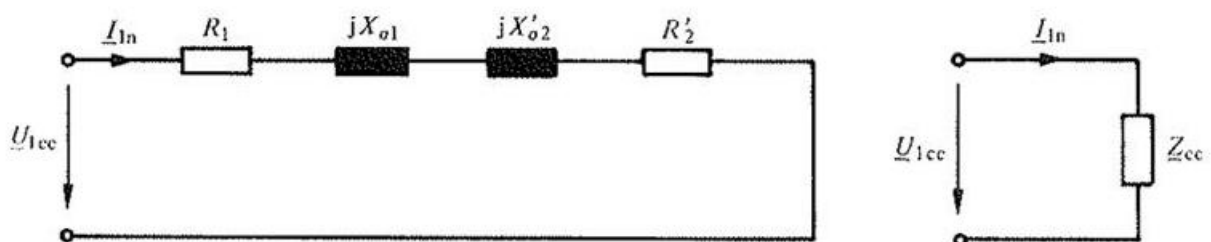


Para un estado de carga determinado del transformador, el esquema equivalente anterior, se puede representar eliminando la reactancia principal $pL_{h1} = j2\pi fL_{h1} = jX_h$ dado que esta presenta un valor muy elevado con respecto las reactancias de fuga del primario y del secundario y el diagrama equivalente del transformador en carga queda tal y como se muestra a continuación:

Figura 8. Esquema equivalente de un transformador monofásico de tracción transformado y en carga



Si en este punto se realiza el ensayo de cortocircuito del transformador se observa que la limitación de la corriente en el transformador (diferencia instantánea entre tensión de entrada u_1 y la tensión de salida u_2 , que es nulo en el momento del ensayo) viene impuesto por la reactancia de cortocircuito, que es la suma de las reactancias de fuga del primario mas el secundario, tal y como se observa en el siguiente gráfico.



En consecuencia, el transformador se comporta como un transformador ideal en el que la limitación del rizado de la corriente, fruto de la diferencia entre la tensión impuesta en el primario y la forma de éste en el secundario (forzado por los elementos de conmutación), viene limitado por la reactancia de cortocircuito del mismo.

Como primera conclusión se puede afirmar que en cualquier aplicación ferroviaria donde exista un transformador por delante de los convertidores de tracción, éste deberá presentar una impedancia de cortocircuito (suma de impedancias de fuga) adecuada a la frecuencia de conmutación, para limitar el rizado de la corriente.

Obviamente, toda la potencia disipada en la reactancia de cortocircuito contribuye en aumentar las pérdidas del transformador y bajar su rendimiento.

Para que el transformador tenga un rendimiento alto, conviene por lo tanto, que la reactancia de cortocircuito sea el menor posible y que sus pérdidas de potencia vayan en ese mismo sentido. Como por otro lado, la reactancia de cortocircuito es la que limita el rizado de la corriente, implica que la diferencia entre la tensión del primario y la que se impone en el secundario, debe ser la menor posible. Por lo tanto, cuanto mayor sea la tensión impuesta en el secundario y mayor sea la frecuencia de conmutación de los semiconductores de los rectificadores de cuatro cuadrantes que cuelgan del secundario del transformador, menor reactancia de cortocircuito hará falta para limitar la corriente y mayor rendimiento podrá ofrecer el transformador.

Otro problema muy distinto, pero que debe ser analizado en su globalidad es que aumentar la frecuencia de conmutación, aumenta las pérdidas en los semiconductores y reduce el rendimiento de los convertidores. Por ello, se debe analizar para cada caso el compromiso entre la frecuencia de conmutación que aumenta las pérdidas en el convertidor pero mejora el rendimiento del transformador por necesitar una impedancia de cortocircuito menor, para buscar el óptimo del conjunto transformador-convertidor.

3.2.2 Transformadores de 15 Kv $16^{2/3}$ Hz

Los transformadores de tracción que trabajan conectados a catenarias de 15 kV y una frecuencia de $16^{2/3}$ Hz, valor relativamente bajo, no pueden trabajar con toda la masa del circuito magnético que el valor de la frecuencia pudiera requerir y en un principio se pudiera desear, para no penalizar el equipo con un sobrepeso prohibitivo.

En consecuencia y debido a que se precisa obtener una reducción de masa del circuito magnético, los transformadores trabajan en su punto nominal con valores de densidad de flujo (B) muy elevados (flujo por unidad de superficie de circuito magnético). Estos valores de densidad de flujo elevado provocan una serie de pérdidas en el transformador, que hacen que su rendimiento baje considerablemente.

Ofrecen un rango de eficiencia que oscila entre el 89% y el 94%.

3.2.3 Transformadores de 25 kV 50 Hz

Los transformadores de tracción que trabajan conectados a catenarias de 25 kV y una frecuencia de 50 Hz, pueden trabajar con masas de circuito magnético similares a la masa de los transformadores que trabajan a frecuencias de $16^{2/3}$ Hz. En consecuencia y debido a que la frecuencia es mayor para las mismas secciones de núcleo magnético, trabajan en su punto nominal, con valores de densidad de flujo (B) menores que los del caso anterior.

Estos valores de densidad de flujo más moderados disminuyen las pérdidas en el transformador, que hacen que su rendimiento sea mejor.

Ofrecen un rango de eficiencia que oscila entre el 92% y el 96%.

3.2.4 Conclusiones

Como conclusión, se puede decir que con el estado del arte actual, mientras no se disponga de material magnético con permeabilidades relativas mayores que las actuales, que admitan densidades de flujo mayores sin incrementar las pérdidas o aumentando su masa, para las nuevas concepciones de líneas ferroviarias, el hecho de trabajar con frecuencias de 50 Hz frente a $16^{2/3}$ Hz es una ventaja que permite aumentar el rendimiento en los transformadores en un entorno del 2% al 3%.

Para que por otro lado, el transformador tenga rendimientos altos, además de tener presente las pérdidas del circuito magnético y su relación inversa con la frecuencia de la tensión de catenaria, conviene que la reactancia de cortocircuito del transformador sea el menor posible. Para ello la diferencia entre la tensión del primario y la que se impone en el secundario a la hora de realizar el diseño de la cadena de tracción completa, debe ser la menor posible. Por lo tanto, cuanto mayor sea la tensión impuesta en el secundario y por otro lado mayor sea la frecuencia de conmutación de los semiconductores de los rectificadores de cuatro cuadrantes que cuelgan del secundario del transformador, mejor rendimiento tendrá éste (disminuye el rizado de la corriente y el valor de la reactancia de cortocircuito puede reducirse).

Nótese que el hecho de aumentar la frecuencia de conmutación beneficia al transformador y su rendimiento global, pero por otro lado, empeora el rendimiento del convertidor, aumentando sus pérdidas por conmutación. Por lo tanto, en la fase de diseño se debe buscar el compromiso que optimice el rendimiento global del transformador más el convertidor en su conjunto.

3.3. Comparativa entre convertidores de tracción

3.3.1 Dispositivos de conmutación

Desde los inicios de la utilización de dispositivos de conmutación estáticos en los convertidores de tracción, tanto choppers para alimentar motores de corriente continua, como los primeros inversores de circuito intermedio de fuente de corriente así como los inversores de circuito intermedio de fuente de tensión, el tipo de semiconductor utilizado ha condicionado mucho la complejidad o la sencillez del control y los circuitos de potencia de los mismos, pero la evolución de la eficiencia global de los mismos, no ha estado tan claro.

El primer dispositivo utilizado fue el Tiristor (SCR) que podía encenderse por puerta, pero cuyo apagado en circuitos de corriente continua no se producía de forma natural y requerían circuitos de potencia con tiristores auxiliares para su apagado.

Estos circuitos eran muy complejos, con una cantidad de elementos elevado y en consecuencia con ratios de fiabilidad bajos, aunque cabe decir que el rendimiento de estos semiconductores era alto. Su tensión ánodo cátodo en conducción es muy bajo y en consecuencia las pérdidas en conducción eran muy bajas, aunque para asegurar el apagado precisaban de circuitos para la ayuda a la conducción, snubbers, que hacían que las pérdidas aumentasen.

Otro problema que presentaban es que las frecuencias de conmutación eran relativamente bajas (cientos de Hercios), por lo que los motores y transformadores conectados a los mismos, recibían formas de onda con enormes cantidades de

armónicos y pérdidas inducidas por estos, bajando su rendimiento y el del conjunto de la cadena de tracción.

Posteriormente, surgieron los GTO (Gate Turn Off Thyristor) o tiristores apagables por puerta, que no precisaban de complejos circuitos de apagado con tiristores auxiliares, pero que sus circuitos de control de puerta seguían siendo realmente circuitos de potencia, donde se debían inyectar o extraer corrientes de hasta el 20% de la corriente nominal del GTO para su apagado. Estos dispositivos también requerían circuitos de ayuda a la conmutación o snubbers.

No obstante lo anterior, se llegó a fabricar convertidores con GTOs donde se incorporaron circuitos de ayuda a la conmutación Snubbers asimétricos que reconducían la energía almacenada en éstos durante el proceso de apagado de un GTO, hacia el siguiente GTO en su proceso de encendido, llegando a obtener rendimientos del 99,5%

Estos convertidores basados en GTOs, eran equipos con una fiabilidad mucho mayor que la de los primeros convertidores a tiristores y con rendimientos extraordinarios, aunque sus frecuencias de conmutación seguían siendo bajas (200 o 300 hercios). Por lo tanto los motores y transformadores conectados a los mismos, recibían formas de onda con enormes cantidades de armónicos y pérdidas inducidas por estos, bajando su rendimiento y el del conjunto de la cadena de tracción

Posteriormente, apareció el IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor). Este dispositivo, que presenta bastantes más pérdidas que el Tiristor o el GTO cuando se encuentra en conducción, tiene la virtud de conmutar a frecuencias elevadas (varios KHz) y su control se realiza en tensión por puerta, con circuitos de control que manejan $\pm 15V$. El control es simple, la fiabilidad de los convertidores es mucho mayor, precisamente por la simplicidad y ausencia de una gran cantidad de circuitos y dispositivos que anteriormente se necesitaban. Sus rendimientos oscilan entorno al 98,5%.

La tensión ánodo-cátodo de tiristores y GTO's es del orden de 0,3, aunque varía con la corriente que conducen, frente a los más de 3 voltios en IGBTs de 6,5 kV y este es el factor que hace que el rendimiento de los convertidores con IGBTs sea inferior incluso cuando no precisan circuitos snubbers. Pero su simplicidad y el tipo de onda que pueden imponer a los motores y transformadores conectados a los mismos, es muy bajo en armónicos y las pocas pérdidas inducidas por estos, aumentan su rendimiento y el del conjunto de la cadena de tracción.

Posteriormente al IGBT, han aparecido dispositivos como el IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor), creado por ABB que pretendía tener las ventajas del control por puerta de IGBT pero con una caída de tensión directa ánodo-cátodo similares a los tiristores. De todos modos, su implantación no ha proliferado y su aplicación parece que se están quedando para aplicaciones de gran potencia.

3.3.2 Conclusiones

Como conclusión, no se puede afirmar que el IGBT tenga mejor rendimiento que el tiristor o el GTO, pero su simplicidad y la posibilidad de conmutar a mayores frecuencias lo hace atractivo para las aplicaciones ferroviarias, dado que ofrece mayor fiabilidad, y puede hacer que las máquinas con las que opera, transformadores y motores, tengan muchas menos pérdidas.

Un convertidor puede tener mejores rendimientos si conmuta menos, pero genera ondas con mucho contenido armónico (cuadrada). Aunque su rendimiento sea muy bueno, hace que aumenten las pérdidas en el motor y transformador.

En consecuencia, en el caso del convertidor, se debe realizar un diseño conjunto en el que se seleccionen los componentes, motor, transformador y convertidor con una determinada frecuencia de conmutación impuesta por el control y sus algoritmos de optimización de los factores de potencia que determine una cadena de tracción óptima desde el punto de vista energético y de fiabilidad.

3.4. Rendimiento en las reductoras

Por último y con la intención de completar el análisis de rendimientos de toda la cadena de tracción, en este punto se comentan genéricamente ciertos aspectos relativos a las reductoras, aunque al tratarse de maquinas mecánicas, el conocimiento que Ingeteam dispone de las mismas es el de un usuario y no el de un diseñador o tecnólogo, como ocurre con el resto de equipos eléctricos.

En los distintos proyectos abordados por Ingeteam, se ha observado que el rendimiento que normalmente suele proporcionar un diseñador y fabricante de reductoras, suele ser el rendimiento que va a ofrecer la reductora cuando se trabaja en su punto de funcionamiento nominal.

Si tomamos el símil de que una reductora en su interior funciona como una batidora, que bate el aceite que hace de lubricante entre los piñones, además de transmitir un par, cuando el fabricante proporciona una cifra de rendimiento, por ejemplo del 98%, ello implica que las pérdidas son del 2%, que podemos decir que se pierden en batir dicho aceite más la fricción de sus partes móviles. Lo que es importante remarcar, es que cuando un equipo de tracción impone un par cualquiera en el eje de los motores y éste es mucho más reducido que el nominal, las pérdidas en las reductoras, siguen siendo similares en términos absolutos, porque dependen más bien de la velocidad y el batido del aceite que están haciendo, por lo que su rendimiento con respecto al par que están transmitiendo cae drásticamente.

Las reductoras de tracción ofrecen rendimientos entorno al 98% en el caso de dos etapas y del 96% o 97% en el caso de tres etapas, siempre midiendo dicho rendimiento a par nominal.

En consecuencia, desde el punto de vista de un usuario de reductoras, conviene que se minimicen las pérdidas que se producen en las mismas en valor absoluto, que en gran parte vendrán producidas por el batido del lubricante. En consecuencia y desde el punto de vista de un usuario, parece que reduciendo la velocidad máxima de la etapa de entrada de la reductora y mejorando los lubricantes para que sean menos densos y puedan trabajar con menores niveles de fluido, se podría mejorar sus eficiencias, reduciendo las pérdidas.

Antes de concluir, y como corolario, merece la pena realizar la reflexión sobre la posibilidad de eliminar completamente la reductora, de modo que su efecto sobre eficiencia de la cadena de tracción sea nula (la reductora más eficiente es aquella que no existe). En este sentido se ha trabajado mucho, realizando motores que actúan directamente sobre la rueda del vehículo, dotados de un gran número de pares de polos (gran reducción magnética) y elevados pares en eje, con resultados satisfactorios en vehículos ligeros.

La limitación de este tipo de solución es que los motores están limitados en tamaño por el gálibo inferior de los vehículos y que los pares que precisan en rueda los debe proporcionar directamente el motor en eje, al no disponer de una relación de transmisión que lo amplifique. Es por esta razón que esta elegante solución queda limitada a vehículos ligeros que requieren bajos pares y bajas potencias.

Como dato interesante, cabe destacar que el rendimiento de un accionamiento motor mas reductora con motor asíncrono en aplicaciones donde se puede optar por motor directo a rueda (100kW a 200kW), está en torno al 88% o 89%. Sin embargo un motor asíncrono directo a rueda, sin reductora, presenta un rendimiento del 91% y un motor síncrono de imanes permanentes que acciona directamente el eje o la rueda llega al 93%.

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Curvas de adherencia disponibles y obtenidas con cadenas de tracción AC y DC	7
Figura 2. Comparativa del esfuerzo de freno obtenido con cadenas de tracción AC y DC en función de la velocidad.....	7
Figura 3. Rendimiento de la máquina síncrona convencional superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad: $\eta = 92\% - 94\%$	13
Figura 4. Rendimiento de la máquina síncrona convencional superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad	15
Figura 5. Rendimiento de la máquina síncrona con imanes permanentes, superpuesta sobre la característica de potencia en función de velocidad	16
Figura 6. Comparativa de la eficiencia entre las distintas máquinas de tracción, en función de la potencia en eje de las mismas	17
Figura 7. Esquema equivalente de un transformador monofásico de tracción	18
Figura 8. Esquema equivalente de un transformador monofásico de tracción transformado y en carga.....	18

Publicaciones del Proyecto [ElecRail](#)

Monografías:

Monografía 1: *“Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 2: *“Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica”*: Francisco Javier Olea.

Monografía 3: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria”*: José Conrado Martínez Acevedo, Carlos Tovagas Guerra, Jorge Iglesias Díaz.

Monografía 4: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes”*: Pedro Estévez Irizar, Maider Varela Cuadrado, Egoitz Iturritxa Zubiri.

Monografía 5: *“Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 6: *“Diseño de los vehículos ferroviarias para la mejora de su eficiencia energética”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 7: *“Alimentación eléctrica, cogeneración, almacenamiento y diseño de la red”*: Ramón R. Pecharromán, Eduardo Pilo, Álvaro López.

Monografía 8: *“Requisitos de los modelos para líneas metropolitanas y de alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas, Instituto de Investigación Tecnológica de Metro de Madrid.

Monografía 9: *“Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 10: *“Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 11: *“Resultados de conducciones eficientes en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 12: *“Implementación, resultados y pruebas de los modelos para líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 13: *“Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo y contraste de modelos y simuladores parametrizables (ELECRAIL)”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.