

Motor asíncrono para tracción eléctrica con rotor de cobre y acero especial

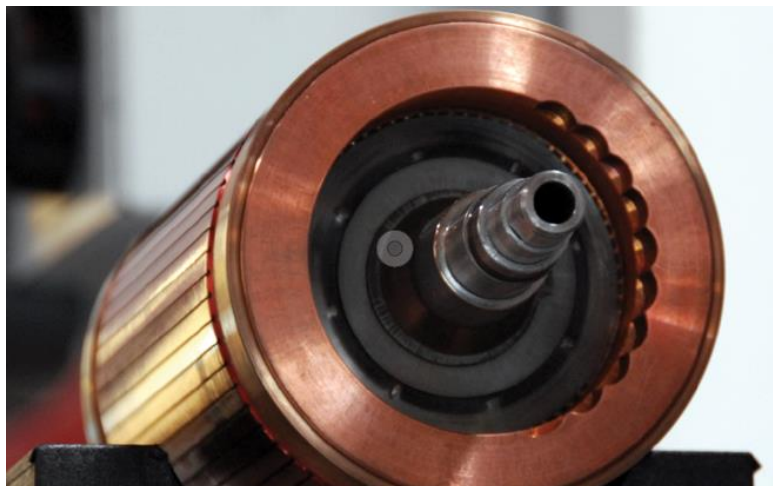
El 19 de julio de 2006 se dio a conocer oficialmente al público en Santa Mónica (California) el Tesla Roadster, un automóvil deportivo totalmente eléctrico, el primer modelo producido por Tesla Motors.

Se podría decir que marcó la presentación “oficial” de un nuevo tipo de motorización acorde a la problemática de los tiempos actuales coincidiendo, no por casualidad, con el inicio del tercer milenio. Dicho vehículo fue y es un despliegue de tecnología sobre ruedas, mucho más de lo que se ve a simple vista.

Su motor asíncrono se presentó con las siguientes características: 3 fases y 4 polos - Potencia neta máxima: 248 CV (185 kW) - Max r.p.m.: 14000 Par máximo, 270 Nm desde 0-6000 rpm - Eficiencia: 90% promedio.

Pero no era un motor común y corriente de los que estamos acostumbrados a utilizar en la industria, por el contrario, el diseño de Tesla puso en práctica aspectos constructivos que se conocían pero que por motivos económicos hacían que el costo de un motor fuera muy elevado para uso corriente. Para este caso, como todos en movilidad eléctrica, lo importante es la eficiencia energética de manera de dotar al vehículo de una autonomía aceptable dentro de la ecuación de costo del vehículo donde juegan también otros factores.

Los detalles constructivos del motor siempre fueron desconocidos, a través de fotos se puede observar que el rotor jaula de ardilla es de cobre con un maquinado casi perfecto.



En el presente documento vamos a investigar la importancia de utilizar otros materiales en la construcción de un motor para tracción.

Para ello se hará referencia a un estudio realizado por la *Universidad de L'Aquila (Italia)* y tres empresas que han colaborado:

- ThyssenKrupp ES Acciai Speciali Terni, Italia, líder europeo en la producción de aceros eléctricos para aplicaciones electromecánicas.
- LAFERT S.p.A., fabricante de motores de inducción.
- FAVI (Fonderie et Atelier du Vimeu), Francia, empresa especializada en la fundición a presión de aleaciones de cobre.

El objetivo del proyecto es el análisis y la construcción de varios prototipos de motores de inducción utilizando soluciones tecnológicas innovadoras, con el fin de:

- definir los procedimientos de diseño y estrategias;
- verificar las mejoras de eficiencia reales;
- verificar la disposición de los motores con respecto al Sistema Europeo de Clasificación.

El análisis se refiere a motores industriales de inducción trifásicos de baja tensión, 4 polos, 50 Hz, 400 V, en el rango de potencia de 0,75 a 22 kW.

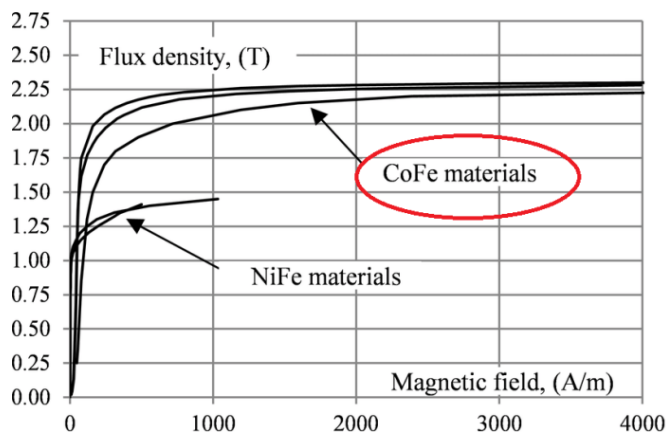
El programa de investigación propuesto se subdividió en cuatro pasos de estudios de mayor eficiencia de los cuales en esta oportunidad solo trataremos los resultados relacionados con el primer paso del proyecto, cuando se ha utilizado una jaula de rotor de acero premium y cobre en lugar de una jaula estándar de acero y aluminio.

Consideraciones sobre motores:

Hay dos tipos principales de acero (hierro-silicio) eléctrico: con grano orientado y no orientado. Los aceros eléctricos de grano orientado normalmente tienen un nivel de 3% de silicio. Es procesado de tal manera que las propiedades óptimas se desarrollan en la dirección de la laminación.

El acero eléctrico no orientado por lo general tiene un nivel de silicio de 2 a 3,5% y tiene propiedades magnéticas isotrópicas, esto es, similares en todas las direcciones, por lo cual es menos costoso y es apropiado para su utilización en máquinas eléctricas rotantes.

Hoy en día se utiliza cada vez con más frecuencia laminaciones de material hierro-cobalto, que se caracterizan por mejores rendimientos en el comportamiento electromagnético, rango de uso más amplio antes de la saturación y cifras de bajas pérdidas.



Las pérdidas de hierro también se reducen cuanto más disminuimos el espesor de estas laminaciones, más reducimos las pérdidas por corrientes de Foucault. La tendencia que prevalece hoy en día es tener laminaciones en torno a 0,2 mm.

Ranura del rotor: La geometría de la ranura del rotor afecta directamente sobre los valores de inductancia y resistencia rotóricas. Tradicionalmente, el diseño de dicha geometría ha marcado las características de funcionamiento y por tanto su aplicación. Para motores de tracción es recomendable emplear una geometría de ranura que presente baja resistencia para trabajar en deslizamientos nominales bajos, y por tanto lograr buena eficiencia y, además, que presente inductancia relativamente baja para incrementar el par máximo a altas velocidades.

El tipo de ranura que se emplea en los diferentes diseños es la denominada ranura trapezoidal semi-abierta. Esta geometría de ranura permite que el diente tenga anchura constante y, por tanto, el nivel de densidad de campo magnético a lo largo de los dientes de rotor sea también constante.

Material de la jaula de ardilla: Los materiales comúnmente empleados para la fabricación de jaulas son el aluminio 99,5 y el cobre. Los rotores, al no tener grandes dimensiones geométricas, se pueden fabricar por inyección de aluminio fundido de manera fácil y económica. Por tanto, este suele ser el proceso escogido para una producción seriada, a no ser que el motor tenga una exigencia muy grande, como es el caso de tracción, donde cabe la posibilidad de que se utilicen barras de cobre. El empleo de las barras de cobre permite, o mejorar el rendimiento, o bien reducir el volumen frente al empleo de aluminio.

Por otro lado, es bien sabido que la incorporación de cobre para las barras del rotor y los anillos de los extremos en lugar del aluminio daría lugar a atractivas mejoras en la eficiencia energética del motor dado que las pérdidas en el rotor se reducen.

Material	Resistividad (en 20 °C-25 °C) ($\Omega \cdot m$).
Cobre	$1,71 \times 10^{-8}$
Aluminio	$2,82 \times 10^{-8}$

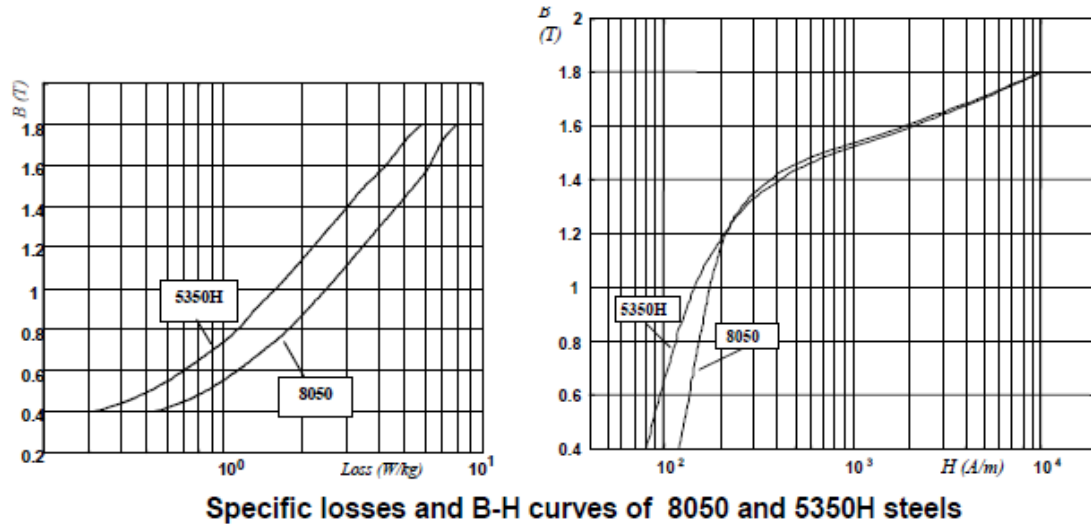
El punto de fusión de las aleaciones de aluminio está en el rango de 670 ° C. La construcción del rotor de cobre fundido no difiere significativamente del aluminio y, en esencia, los detalles de fabricación son idénticos. Los desafíos de fabricación adicionales son el aumento de las temperaturas y presiones necesarias, para el cobre que funde a 1083 ° C. La integridad y fiabilidad del cobre fundido a presión es tan buena como la del aluminio.

Desarrollo y resultados:

Se eligieron tres motores como “motores de referencia”: son motores comerciales con jaula de rotor de aluminio y acero eléctrico estándar; dos motores de 3 y 7,5 kW que pertenecen a la clase de baja eficiencia Eff3, el tercero de 15 kW pertenece a la clase eficiencia media Eff2.

(Las clases de eficiencia disponibles en el momento de la prueba (EFF1, EFF2, EFF3) en la Unión Europea fueron posteriormente reemplazada por la norma IEC 60034-30 que define las nuevas clases de eficiencia en todo el mundo)

Sobre la base de análisis preliminares y la dureza del material, se eligió el acero de alta permeabilidad 5350H (como acero premium), el cual representa un muy buen compromiso entre pérdida específica y permeabilidad.



El acero eléctrico 5350H se puede definir como “Acero premium” porque combina bajas pérdidas específicas (3,5 W / kg respecto a 5,5 del 8050) con alta permeabilidad.

A partir de los motores ensayados y los resultados correspondientes han permitido iniciar el siguiente paso en cuanto a la construcción de los prototipos según las siguientes combinaciones, para cada potencia:

- a) acero estándar 8050 y jaula de aluminio
- b) acero estándar 8050 y jaula de cobre;
- c) acero premium 5350H y jaula de cobre.

Las comparaciones entre los motores a) y b) permiten evaluar las mejoras alcanzables solo con rotores de cobre.

Los resultados del motor c) muestran los efectos del acero premium con respecto al acero estándar (en comparación con los motores b) y las mejoras con respecto al motor estándar (en comparación con los motores a)).

La Tabla 2 presenta las principales dimensiones y pesos de los motores ensayados mientras que la figura 3 muestra una vista de los rotores de cobre.

Table 2 - Tested motors main dimensions and weights

	3 kW	7.5 kW	15 kW
Stack length (mm)	130	160	220
Outer stator diameter (mm)	152	200	250
Inner stator diameter (mm)	90	127	160
Stator winding weight (kg)	2.45	5.40	14.5
Rotor cage weight (kg)	Al	1.45	3.0
	Cu	2.43	9.8
Gross iron (kg)	22.4	47.8	103



Fig. 3 – View of copper rotors for the considered motors

Para realizar el ensayo se aplicó la Norma CSA (Canadian Standards Association) C390-98: "Método para determinar rendimiento energético de motores de inducción trifásicos". Esta Norma es equivalente a la reconocida Norma IEEE 112-1996. Los métodos IEEE y CSA son pruebas de eficiencia de potencia de entrada frente a salida, según la cual se separan las pérdidas en cinco categorías: pérdidas en el hierro, resistencia del estator, resistencia del rotor, fricción y ventilación (F&W) y pérdidas por carga parásita (SLL). Los primeros cuatro se miden directamente y el resto es la categoría de "carga perdida".

La Tabla 3 muestra los resultados de motores probados de **3 kW**. La sustitución de cobre por aluminio directamente logró el 75% del ahorro total en pérdidas del rotor y participó indirectamente en el ahorro del otro 25% en pérdidas de resistencia del estator. Las pérdidas del rotor I²R se redujeron en un 46% y la eficiencia resultó 2,1 puntos porcentuales más alta.

El acero de primera calidad como material magnético estuvo involucrado ganando aproximadamente medio punto en eficiencia. Ahorrando en hierro las pérdidas se compensan parcialmente por el aumento de las pérdidas del devanado del estator, como consecuencia del aumento de la corriente de magnetización.

En el caso del motor de 3 kW, el rotor de cobre y la adopción de acero premium ha permitido pasar a la clase Eff2.

Table III CSA C390-98 Efficiency and Loss Segregation Test Results. 3 kW standard stack length motors.

3 kW	Al 8050	Cu 8050	Cu 5350H
η %	82.0	84.1 (+2.1)	84.5(+2.5)
Losses (W)	655	563 (-14%)	545 (-17%)
Stator wind.	351	327	337
Rotor cage	153	83 (-46%)	83(-46%)
Iron	117	124	94(-20%)
SLL	13	13	8
F&W	21	16	23

Table IV 3 kW standard stack length motors performance

3 kW	Al 8050	Cu 8050	Cu 5350H
I (A)	6.86	6.70	6.73
ΔT_{sw} (°C)	87	83 (-4)	71 (-16)
Power Factor	0.76	0.76	0.75
Slip %	4.83	2.69 (↓)	2.7 (↓)
T_B (Nm)	58	63	62
T_L (Nm)	54.4	46.9 (↓)	42.8 (↓)

En la Tabla 4 se observa que el aumento de temperatura del devanado del estator ΔT_{sw} se redujo en 4 °C con jaula de cobre y en 16 °C con acero premium y jaula de cobre, en comparación con el motor comercial. Ese es un detalle muy importante porque el aumento de temperatura es significativo en el límite de potencia y durabilidad del

motor. El factor de potencia fue constante mientras que el deslizamiento fue significativamente menor para ambos motores de cobre. De hecho, debido a la diferencia de conductividad entre los dos materiales, el motor de cobre genera un par mayor en el mismo deslizamiento que el motor de aluminio.

Los resultados que muestran las Tablas 5 y 6 sobre los motores de **7,5 kW** confirman lo que se encontró para los motores más pequeños. Las pérdidas de los rotores fueron 50% menores en los rotores de cobre y las pérdidas totales se redujeron en un 23% y 26% (en el caso de la adopción de rotores de cobre y acero premium).

El aumento de temperatura del devanado del estator ΔT_{SW} se redujo en 18°C con jaula de cobre y en 24°C con acero premium en comparación con el motor comercial.

Table V CSA C390-98 Efficiency and Loss Segregation Test Results. 7.5 kW standard stack length motors.

7.5 kW	Al 8050	Cu 8050	Cu 5350H
η %	84.2	87.4 (+3.2)	88.1 (+3.9)
Losses (W)	1401	1077 (-23%)	1035 (-26%)
Stator wind.	466	456	423
Rotor cage	284	141 (-50%)	138 (-50%)
Iron	361	349	338
SLL	237	92	88
F&W	53	39	48

Table VI 7.5 kW standard stack length motors performance

7.5 kW	Al 8050	Cu 8050	Cu 5350H
I (A)	15.0	15.2	14.8
ΔT_{SW} ($^\circ\text{C}$)	104	86 (-18)	80 (-24)
Power Factor	0.86	0.81	0.82
Slip %	3.44	1.82 (\downarrow)	1.79 (\downarrow)
T_B (Nm)	-	155	-
T_L (Nm)	165	110 (\downarrow)	108 (\downarrow)

Las tablas 7 y 8 muestran los resultados de la prueba de motores de **15 kW**.

En este caso, los rotores de cobre produjeron una reducción promedio del 44% en las pérdidas medidas del rotor, mientras que las pérdidas totales se redujeron en un 10%.

Table 7 – CSA C390-98 Efficiency and Loss Segregation Test Results. 15 kW motor.

15 kW	Al 8050	Cu 8050	Cu 5350H
η %	90.1	91.0	91.9
Losses (W)	1634	1473	1316
Stator wind.	481	470	477
Rotor cage	385	232	202
Iron	434	424	327
SLL	238	256	219
F&W	96	91	91

Table 8 – 15 kW motors performance

15 kW	Al 8050	Cu 8050	Cu 5350H
I (A)	28.3	28.3	28.6
ΔT_{SW} ($^\circ\text{C}$)	62	58	58
Power Factor	0.84	0.83	0.81
Slip %	2.47	1.5	1.31

Con rotor de acero y cobre premium, las pérdidas de hierro se redujeron en un 24% y las pérdidas totales en un 20% y un 11% con respecto al motor estándar y al motor de cobre. En comparación con el motor estándar, las mejoras de eficiencia fueron de 0.9 puntos con rotor de cobre y 1.8 puntos con rotor de acero y cobre premium.

Sobre el rotor de cobre de 15 kW, es interesante resaltar que la tolerancia sobre la eficiencia podría clasificar este motor como Eff1. Con la adopción de un rotor de cobre y acero de primera calidad, el motor de 15 kW está completamente en la clase Eff1.

En la siguiente tabla se resume las eficiencias generales de los motores y las reducciones de pérdidas de rotor:

kW	Hz	Efficiency		Diff.	Rotor Loss Reduction %
		Al	Cu		
3	50	82.0	84.1	2.1	46
7.5	50	84.2	87.4	3.2	50
15	50	90.1	91.0	0.9	44

Conclusiones

Los resultados comparativos son más que elocuentes:

La sustitución del cobre por aluminio ha permitido trasladar de clase los motores de 3 y 7,5 kW a la clase Eff2. Las mejoras de eficiencia no son uniformes para todos los tamaños y varían desde 0,9 puntos para los de 15 kW a 3,2 puntos para los de 7,5 kW. Para los de 15 kW es interesante remarcar que la tolerancia sobre la nueva eficiencia podría clasificar este motor como Eff1. El uso de acero eléctrico 5350H mejora las eficiencias de 0,4, 0,7 y 0,9 puntos de motores más pequeños a más grandes. Sin embargo, el rotor de acero premium y cobre no da lugar a ningún movimiento adicional (desde Eff2) para los de 3 kW y 7,5 kW, mientras que el de 15 kW alcanza la clase Eff1.

En definitiva, para tracción eléctrica es ineludible la utilización de los materiales más adecuados junto a un inverter (control electrónico) calculado específicamente para el modelo de motor dado con el objeto de poder obtener la máxima eficiencia del conjunto.

Bibliografía: <https://www.electricmotorengineering.com/>, <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/>, Maquinas Eléctricas Chapman, Calculo maquinas asíncronas, Corrales Martín, High Performance Electrical Motors for Automotive Applications – Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets, Marco Villani