

Motores síncronos de imanes permanentes para vehículos híbridos.

El Toyota Prius

Victoria Abad-San Martín,
Jesús Sagredo-González

UNIVERSIDAD DE BURGOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7128>

1. INTRODUCCIÓN

La concienciación sobre el calentamiento global y el precio de los combustibles han hecho que la demanda de vehículos eléctricos haya aumentado de forma muy importante (según ANFAC [1], sólo en los últimos cinco años, los vehículos híbridos han aumentado su presencia en España en un 300%, superando las 10.000 unidades). Cada fabricante oferta uno o varios tipos de vehículos eléctricos superando ya los 40 modelos y el sector automovilístico está dando un fuerte empuje a la investigación en este campo.

Uno de los elementos vitales de este tipo de vehículos es el motor o motores eléctricos ya que deben tener una elevada densidad de potencia y buen comportamiento a altas revoluciones. Toyota, marca líder mundial en vehículos eléctricos, emplea para la tracción un Motor Síncrono de Imanes Permanentes en su *Toyota Hybrid System* que también utilizan otras marcas. En este artículo se describen las características,

funcionamiento y evolución del motor MG2 del *Toyota Prius* a lo largo de sus tres generaciones.

2. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS HÍBRIDOS. EL TOYOTA PRIUS

Básicamente, y en función del uso de la energía eléctrica en el vehículo, existen dos tipos de vehículos eléctricos: puros e híbridos. Los vehículos eléctricos “puros” o *Electrical Vehicle* (EV) no disponen de motor térmico de combustión interna. Cargan sus baterías directamente de la red eléctrica y su única fuente de energía es la electricidad que mueve uno o varios motores eléctricos (Renault ZOE, Peugeot iOn, Citroen C-Zero, etc.).

Por otro lado, los vehículos eléctricos “híbridos” o *Hybrid Electrical Vehicle* (HEV) disponen al menos de dos fuentes de energía [2], siendo una de ellas la electricidad (Toyota Prius, Lexus, Honda Civic, etc.). Estos vehículos disponen de un motor de combustión interna y de un sistema eléctrico con uno o más motores/generadores y un sistema de almacenamiento mediante baterías, normalmente de alta tensión, como muestra la Fig. 1.

El Toyota Prius pertenece a este grupo: hasta los 35 km/h, el Prius marcha silencioso utilizando su motor eléctri-

co. Si la velocidad aumenta aún más se activa su motor térmico, que aporta la potencia solicitada. La energía de este motor y su frenado regenerativo recargan las baterías de manera que no es necesario conectar el coche a la red eléctrica para su carga. Alcanza los 170 km/h y acelera hasta de 0 a los 100 km/h en unos 11 segundos.

El Prius original es puesto en el mercado japonés en el año 1997, a Europa llegaría en el año 2000. Disponía de 110 CV de potencia con un consumo medio de 3,9 l/100 km y un 90% menos de emisiones respecto de un vehículo similar de combustión interna. Se considera la primera producción en el mercado de propulsión híbrida y se trata de un vehículo combinado especial, ya que también funciona como vehículo eléctrico puro.

El vehículo dispone básicamente de:

- Un motor de combustión interna de gasolina de 1.800 cc.
- Dos motores/generadores eléctricos. Funcionan de forma contraria dependiendo del régimen de marcha. El denominado MG1 suele ser generador y carga las baterías y MG2 es el que mueve las ruedas o carga las baterías cuando se frena.
- Un sistema de baterías de alta potencia de NiMH que se carga mediante MG1 y mueve a MG2.
- Un sistema de transmisión de potencia que combina la energía de los motores (PSD).
- Un sistema de control de potencia (PCU) que controla todo el sistema.

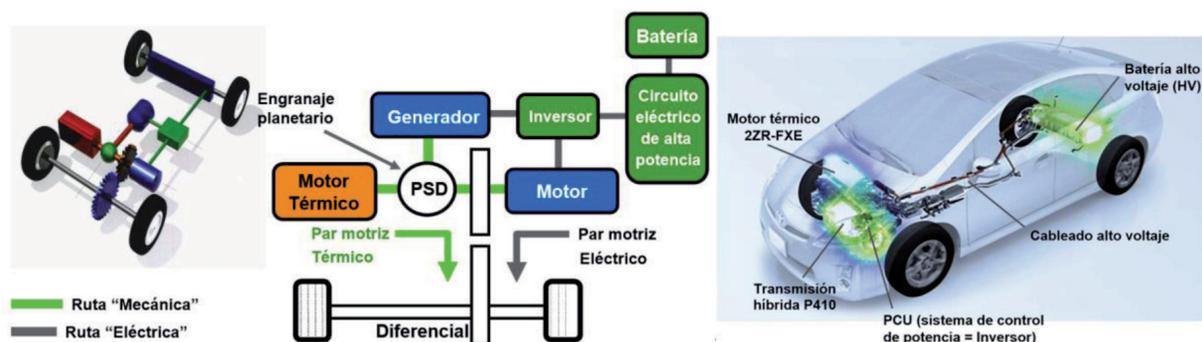


Fig. 1: Esquema del sistema híbrido del Prius. Fuente: Toyota

3. MOTORES ELÉCTRICOS PARA TRACCIÓN. LOS MOTORES SÍNCRONOS DE IMANES PERMANENTES

A la hora de seleccionar el motor eléctrico adecuado a las solicitudes de los HEV los fabricantes disponen de distintos tipos (ver Tabla 1) que proporcionan distintos comportamientos y par mecánico para su uso en tracción eléctrica (ver Fig. 2).

Dado que los motores de CC hacen difícil el aprovechamiento mediante frenado regenerativo y que los motores de reluctancia variable presentan una baja densidad de potencia y un alto rizado de par, los motores más utilizados en vehículos eléctricos son los de inducción y los de imanes permanentes, siendo estos últimos los que presentan un mejor comportamiento y eficiencia (ver Fig. 3).

El tipo de motor elegido por Toyota para mover sus vehículos, denominado MG2, corresponde al tipo Motor Síncrono de Imanes Permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) o PMSM. Este tipo de motor presenta un alto par por unidad de volumen y rendimiento. El hecho de que este tipo de motores síncronos no requiera alimentación del rotor, porque los imanes de tierras raras tienen una energía magnética muy su-

Tipo de motor	Ventajas	Inconvenientes
Motor de CC	Fácil de controlar Curva par-velocidad deseable	Necesidad de mantenimiento. Baja eficiencia y fiabilidad Bajo rango de velocidades
Motor de inducción (IM)	Alto rango de velocidades Alta fiabilidad Bajo coste Robusto en entorno hostil	Baja densidad de potencia y gran tamaño Baja eficiencia Problemas térmicos a altas velocidades
Motor Síncrono de imanes permanentes (SPM/PMSM)	Alta densidad de potencia y pequeño tamaño Alta eficiencia y reversibilidad	Rango de velocidades limitado Alto coste Altas pérdidas en el núcleo del estátor a altas velocidades
Motor de reluctancia variable (SRM)	Curva par-velocidad deseable Alta fiabilidad Bajo coste Robusto en entorno hostil	Alto rizado del par y ruido Baja densidad de potencia Baja eficiencia

Tabla 1: Comparativa de motores utilizados en tracción eléctrica

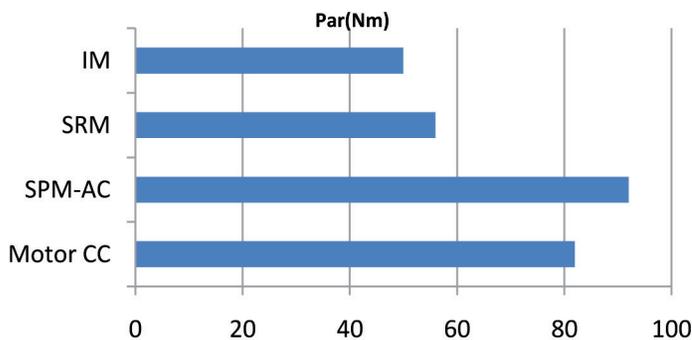


Fig. 2: Par específico medio (Nm/kg) para distintos tipos de motores [3]

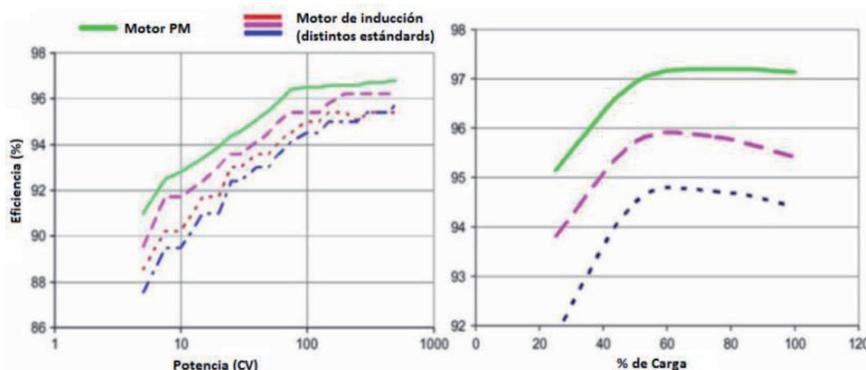


Fig. 3: Eficiencia de motores de inducción y de imanes permanentes [4]

perior al resto de imanes y que pueda actuar como generador, ha desbancado a los motores de inducción y a los de reluctancia variable en los vehículos eléctricos.

Básicamente, los principios de funcionamiento de este tipo de motores PMSM se basan en la alineación de los polos magnéticos. El número de polos en el rotor viene dado por el número de imanes permanentes que se hayan colocado, creando así el campo magnético constante que se transmite al estátor. En el estátor los bobinados alimentados con una secuencia de corrientes trifásicas crean un campo magnético rotatorio en torno al eje de forma que, al alinearse con el campo constante que crean los imanes permanentes, dan lugar a un par electromagnético. La velocidad de giro viene definida por la frecuencia de la corriente de excitación del estátor que, mediante un convertidor de frecuencia, es controlada con gran precisión en un amplio intervalo de velocidades.

Las elevadas velocidades de giro del rotor descartan el uso de los imanes en

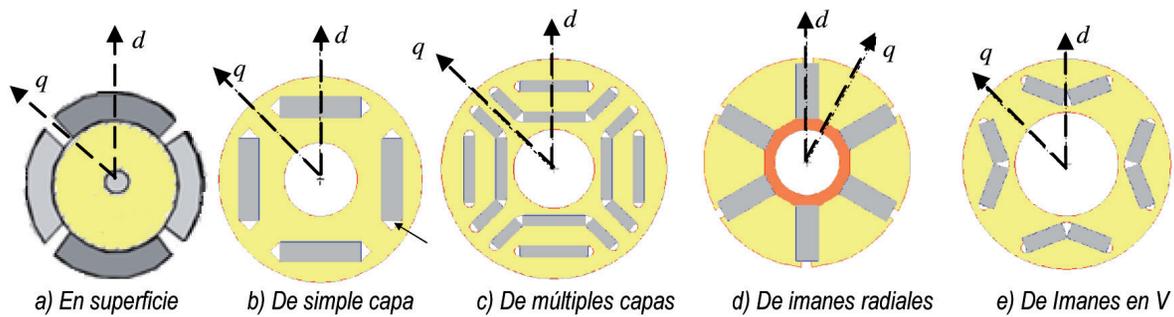


Fig. 4: Rotores de PMSM y sus ejes d y q [1]

$$T = \frac{3p}{\omega} P = \frac{3p}{\omega} \left[\underbrace{\frac{VE}{X_d} \sin(\delta)}_{\text{Par magnético}} + \underbrace{\frac{(X_d - X_q)V^2}{2X_d X_q} \sin(2\delta)}_{\text{Par reluctante}} \right]$$

donde:

 p = pares de polos P = Potencia (W) ω = Pulsación (rad/s) V = Tensión de fase de los bobinados del estator (V) E = Fuerza electromotriz en el estator (V) X_d, X_q = Reactancias síncronas en el eje directo e inverso (Ω) δ = Desfase entre V y E o ángulo de par ($^\circ$)

la superficie del rotor (Fig. 4.a). Por otro lado la máxima energía magnética se obtiene cuando los imanes se obtienen por sinterización, en formas prismática. Por lo tanto las formas de imanes curvas o complejas que se obtienen por compresión de polvo resultan en un par menor del motor, por lo que en la práctica los motores utilizados se limitan al empleo de imanes rectangulares interiores en el rotor o IPMSM (Figs. 4.b a 4.e). El eje d indica la dirección del norte magnético en la que fluye el flujo del rotor hacia el estator a través del entrehierro. El eje q se encuentra a 90° eléctricos, separando los polos de los imanes. Toyota en el Prius comenzó utilizando los de simple capa, pero actualmente ha evolucionado a los imanes en V.

El par que proporciona este tipo de motores IPMSM está determinado por la siguiente ecuación y se representa en la Fig. 5.

El primer término de la ecuación es el par magnético, que es directamente proporcional al volumen de imanes. El segundo término es el par reluctante, que es proporcional a la diferencia entre X_d y X_q y dependen de la geometría del rotor. Para que esta geometría obtenga el máximo par posible se han probado diversas disposiciones que se muestran en el apartado siguiente y cuyo objetivo es maximizar el par reluctante ya que con ello se consigue aumentar el par neto sin necesidad de aumentar el volu-

men de los imanes, y por tanto el coste del motor.

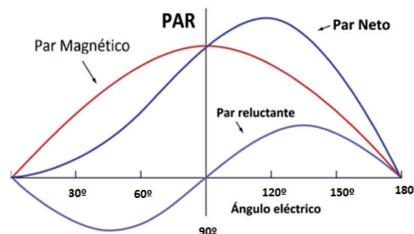


Fig. 5. Par en rotores de IPMSM [2]

4. EL MG2. EVOLUCIÓN

El motor/generador MG2 es uno de los componentes fundamentales del Toyota Prius y como se ha indicado es un IPMSM trifásico. Ha tenido tres versiones en sus más de quince años de vida. A la primera versión de este sistema se la denominó THS (*Toyota Hybrid System*) y a las versiones de 2004 y 2010 se las denominó THS II y THS III respectivamente. Este sistema de hibridación, denominado genéricamente *Hybrid Synergy Drive* (HSD), se ha vendido a otros fabricantes como Nissan o Mazda.

4.1. EL ESTÁTOR

Las chapas están elaboradas con acero magnético M19 y dispone de 48 ranuras como la mostrada en la fig. 6, que si se divide entre sus 8 polos resul-

ta en 6 ranuras por polo, número que no ha cambiado en sus tres versiones. Tampoco lo ha hecho el diseño de las chapas para sus motores que es común para otros modelos de Toyota como el Camry o el Lexus

El devanado es distribuido imbricado de simple capa. Cada una de las tres fases de los bobinados del estator consiste en 12 cables de unos $0,52\text{mm}^2$ de sección. Cada una de las bobinas tiene 9 espiras y cada fase pesa alrededor de 1,644 kg, con un peso total de 4,93 kg de cobre.

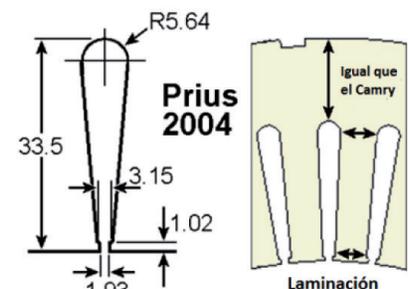


Fig. 6: Detalle de ranura del estator del MG2 THS II. [3]

La principal diferencia entre los modelos THS y THS II es que los bobinados han pasado de estar conectados en paralelo a estarlo en serie, para lo cual se ha requerido una mayor tensión de alimentación de las baterías que han pasado de 280 a 500 y finalmente a 650 V.

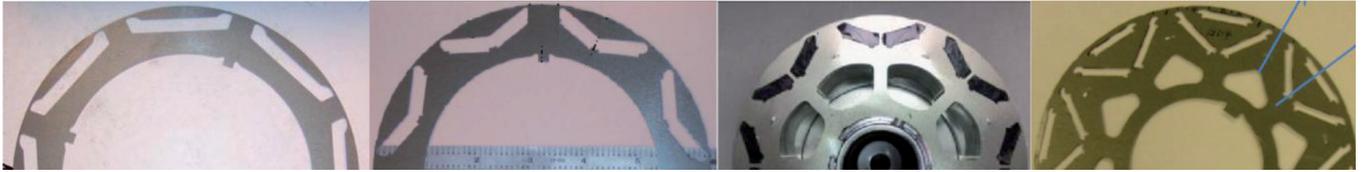


Fig. 7: Chapas del rotor del Prius 2000, 2004, 2010 y del Camry 2006. [5][6][7]

4.2. EL ROTOR

Sin duda la investigación y desarrollo más importante en esta máquina se ha realizado en el rotor, especialmente en su geometría. Dispone de 8 polos y los imanes utilizados son del tipo NdFeB, que actualmente son los de mayor potencia magnética por unidad de volumen. Como se puede apreciar en la Fig. 7 se ha pasado de una disposición de imanes plana con dos puentes a otra de 2 imanes en V por polo, con 3 puentes en la versión THS II y 4 puentes en el THS III. Con ello el peso total de los imanes se ha reducido de 1,2 a 0,77 kgs.

En la última versión el rotor tiene un radio interior menor y una serie de huecos para aligerar su peso, adaptación de otros modelos más complejos de Toyota como *Camry* y *Lexus* en los cuales se han probado otras configuraciones combinando dos capas de imanes. Estos huecos además de aligerar el rotor están dirigidos a minimizar las pérdidas magnéticas.

4.3. EL CONJUNTO

Como se ha indicado, la principal variación introducida en la segunda versión del MG2 es la disposición y número de los imanes, mientras que en la tercera versión el cambio más importante es el diámetro interior del rotor que ha disminuido para utilizar más acero magnético y un menor peso total. Como muestra la Tabla 2, estas modificaciones han conseguido aumentar en un 82% su potencia y reducir tamaño y peso, lo que ha permitido duplicar su potencia específica, objetivo primordial de los fabricantes de automóviles. Asimismo se ha reducido el volumen, y por lo tanto el coste, de los imanes permanentes.

Uno de los retos que aún tiene este tipo de motor es el de aumentar el ratio potencia/velocidad. La Fig. 9 muestra la relación par/velocidad de los distintos motores MG2 y la del motor térmico (ICE). En ella se aprecia como la zona plana de la curva correspondiente a par

Características del Motor	THS	THS II	THS III
Potencia Eléctrica (kW)	33	50	60
Velocidad Máx (rpm)	5400	6000	13500
Par Máximo (Nm)	350	400	207
Peso del MG2 (kg)	41	45	36,7
Peso Imanes (kg)	1,2	1,23	0,768
Potencia específica (kW/kg)	0,81	1,11	1,6

Tabla 2: Resumen de características de los MG2

constante ha ido evolucionando obteniéndose un par constante de 207 Nm, hasta las 3.800 rpm. Actualmente se sigue estudiando el aumentar este ratio

con técnicas de debilitamiento de campo, que buscan aumentar aún más las diferencias entre el eje directo y transversal y combinarlo con la posición

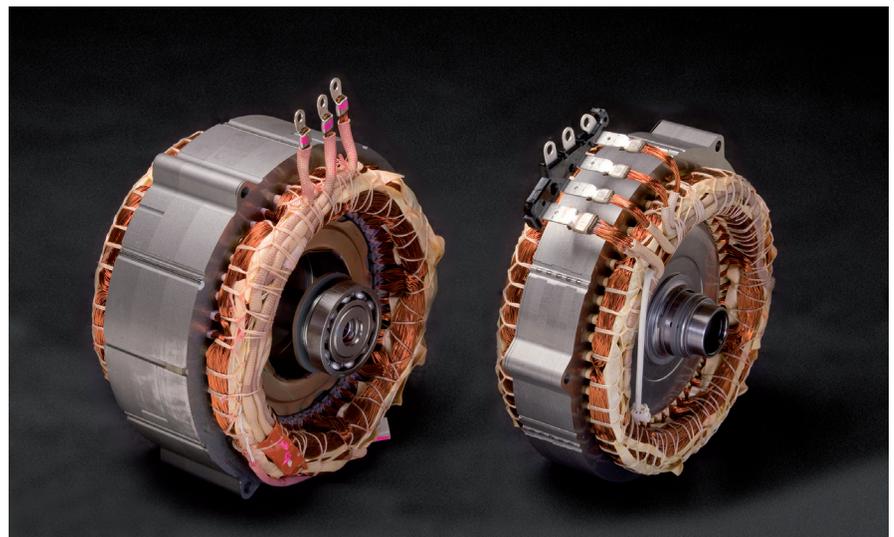


Fig. 8: MG2 del THS II y del THS III. [6][7]

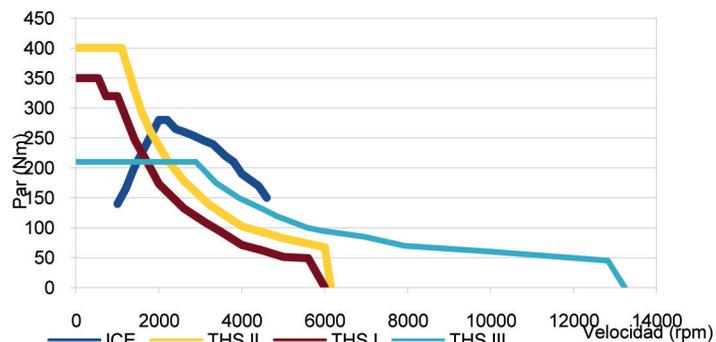


Fig. 9: Curvas de par del MG2 y del motor de combustión interna (ICE)

del vector intensidad. De esta forma el campo de velocidades del motor eléctrico es más amplio y puede utilizarse más intensamente aún.

Otro logro conseguido es la mejora del rendimiento del motor en su zona de trabajo habitual, que supera valores del 94%.

TENDENCIAS FUTURAS

La evolución de la tecnología del Toyota Prius ha sido espectacular, especialmente en cuanto a su motor eléctrico MG2 que ha duplicado su potencia específica. Actualmente las nuevas versiones del sistema HSD, denominadas *PlugHD*, permiten además la carga de las baterías directamente desde una toma de corriente, lo que permite hacer un mayor uso aún del motor eléctrico.

Un componente primordial de estos vehículos son los imanes permanentes, las materias primas, de los que se emplean actualmente NdFeB y Sm-Co, son principalmente a base de tierras raras. La mayor parte de la producción se ha desplazado a China consiguiendo en pocos años hacerse con el 95% de la producción de tierras raras y el 97% de la producción de esos imanes (ver Fig. 10), monopolizando el comercio y disparando los precios (ver Fig. 11) en la última década ante un mercado potencialmente gigantesco.

Esta delicada situación está forzando nuevas líneas de trabajo en gobiernos como los de Estados Unidos y Japón para buscar otras fuentes alternativas. Antiguas minas cerradas están siendo reabiertas y se busca la sustitución de

las tierras raras por otros elementos más baratos o abundantes como los imanes ALNiCo.

Por otro lado, uno de los principales problemas actuales de los motores eléctricos es la temperatura de trabajo que adquieren, que supera los 150°C, ya que empeoran sustancialmente el comportamiento que presentan los imanes permanentes y disminuye el rendimiento. Para solventarlo se están empleando una serie de aditivos como el disprosio, que mejoran este comportamiento, pero elevan en gran manera el coste de los imanes.

PARA SABER MÁS

- [1] ANFAC Research. "Barómetro sobre seguridad vial y medio ambiente. Mercado de vehículos híbridos". Julio 2013.
- [2] François Roby. "La motorización híbrida. El automóvil que recupera energía. Dyna. Septiembre 2006.
- [3] Seong Taek Lee. "Development and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Field Excitation". PhD Thesis. Universidad de Tennessee. 2009.
- [4] George C. Hadjipanayis. "ARPA-E Rare Earth and Critical Materials Workshop Breakout Session: Magnetics". Diciembre 2010.
- [5] Burrell T.A, Campbell S.L., Coomer C.L. "Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System". 2010.
- [6] Hsu J.S., Ayers C.W., Coome, C.L. "Report on Toyota/Prius Motor Torque Capability, Torque Property, No-Load Back EMF, and Mechanical Losses". Oak Ridge National Laboratory. 2007.
- [7] Ayers C.W. "Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System Interim Report". Oak Ridge National Laboratory. 2004.
- [8] Olszewski, M. "FY2011 Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Machinery" Program: Medium: ED. 2011.
- [9] US Geological Survey. Rare earths. Statistics and information. http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth
- [10] Marc Humpries. "Rare Earth Elements: The Global Supply Chain". Congressional Research Service 7-5700-R41347. Diciembre 2013.
- [11] Chris Mi, M. Abul Masrur and David Wenzhong Gao. "Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives". Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-74773-5. 2011.

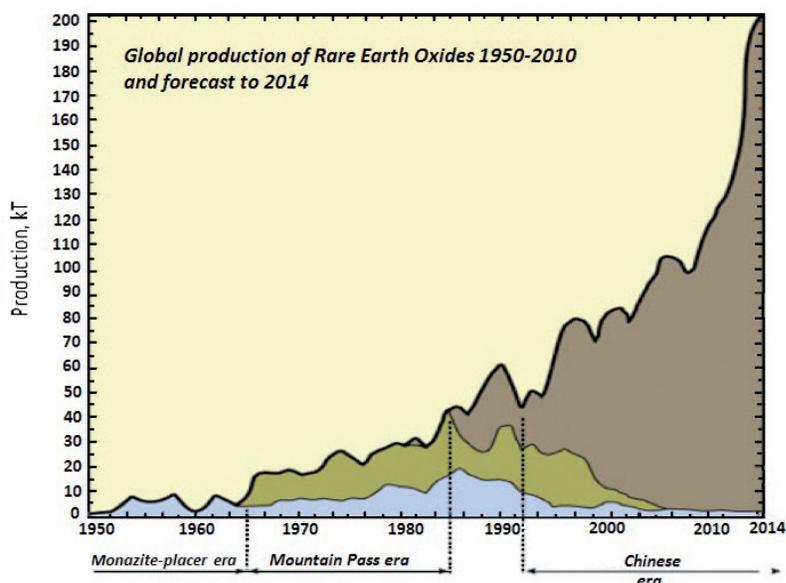


Fig. 10: Producción mundial de tierras raras. [9]

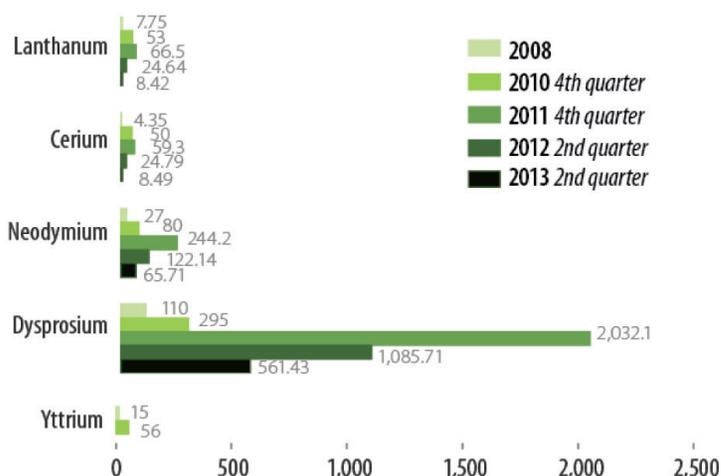


Fig. 11: Coste de óxidos de tierras raras de 2008 a 2013 (\$/kg). [10]