

***Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras***

---

**TRABAJO FIN DE MASTER**

***Título de trabajo: Estudio de materiales necesarios para fabricar motores eléctricos de ventiladores para trabajos a altas temperaturas.***

***Entidad colaboradora : Zitrón***

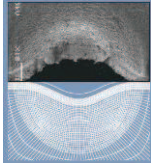
***Tutor industrial o externo : Jorge González Norniella***

***Tutor académico: Julio Antonio Riba López***

***Departamento: Ciencia e Ingeniería de Materiales***

***Universidad de Oviedo***

***Julio 2013***



***Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras***

---

**TRABAJO FIN DE MASTER**

***Título de trabajo: Estudio de materiales necesarios para fabricar motores eléctricos de ventiladores para trabajos a altas temperaturas.***

*Firma*

*Jorge G. Norniella*

*Firma*

*Julio A. Riba*

*Firma*

*Laura castillo*

***Universidad de Oviedo***

***Julio 2013***

# ÍNDICE

## CAPÍTULO I: MEMORIA

1.1	RESUMEN.....	1
1.2	ANTECEDENTESY OBJETOS DE ESTUDIO.....	2
1.2.1	La empresa Zittrón .....	2
1.2.2	El motor Jaula de ardilla .....	5
1.2.2.1	<i>Clasificación</i> .....	5
1.2.2.2	<i>Partes</i> .....	8
1.2.2.3	<i>Funcionamiento</i> .....	9
1.2.3	Material utilizado.....	11
1.2.3.1	<i>Introducción</i> .....	11
1.2.3.2	<i>Propiedades generales aluminio</i> .....	13
1.2.3.3	<i>Propiedades aleaciones de aluminio</i> .....	16
1.2.3.4	<i>Formas comerciales del aluminio</i> .....	19
1.2.3.5	<i>Clasificación de las aplicaciones del aluminio</i> .....	19
1.2.4	Conductividad eléctrica .....	22
1.2.4.1	<i>Conductividad medio salino</i> .....	22
1.2.4.2	<i>Algunas conductividades eléctricas</i> .....	23

## CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO .....	24
2.1.1	Ansys RMxprt .....	24
2.1.2	Ansys Maxwell.....	25
2.1.3	El motor de rotor externo.....	26
2.1.4	Aleaciones L-2653T6 y L-2551.....	28
2.1.4.1	<i>Composición química de las aleaciones (% masa)</i> .....	29
2.1.4.2	<i>Comparación de características de moldeo, mecánicas y otras propiedades</i> .....	32

2.2	RESULTADOS .....	35
2.2.1	Eficiencia vs velocidad del motor.....	38
2.2.2	Par de arranque vs velocidad del motor .....	39
2.2.3	Factor de potencia vs velocidad del motor .....	40
2.2.4	Corriente de arranque vs velocidad del motor.....	41
2.2.5	Resultados con Maxwell.....	42

### **CAPÍTULO III: CONCLUSIONES**

3.1	CONCLUSIONES.....	43
3.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	44

### **CAPÍTULO IV: BIBLIOGRAFÍA**

4.1	BIBLIOGRAFÍA .....	45
-----	--------------------	----

# CAPÍTULO I: Memoria

---

## 1.1 RESUMEN:

La empresa Zitrón quiere dar un paso adelante en el diseño de sus conocidos ventiladores. Para ello, está investigando una solución que implica una serie de modificaciones estructurales.

El cambio fundamental en el diseño consiste en modificar la posición de los dos elementos principales del motor: el rotor (parte móvil) y el estator (parte fija). De esta manera, en el nuevo diseño el estator pasaría de encontrarse en el exterior a situarse en el interior, y por el contrario, el rotor pasaría de estar colocado en el interior a ser el elemento exterior.

Con esta modificación en el diseño, los álabes del ventilador irían en el propio rotor, de manera que se conseguiría un modelo de ventilador compacto y completamente reversible, el cual puede ser fabricado de forma íntegra en los propios talleres de Zitrón. Los objetivos principales son reducir costes y aumentar el rendimiento del conjunto (aerodinámico y eléctrico). Inicialmente, se está estudiando la solución en los ventiladores de chorro, que cubren potencias entre 15 kW y 90 kW.

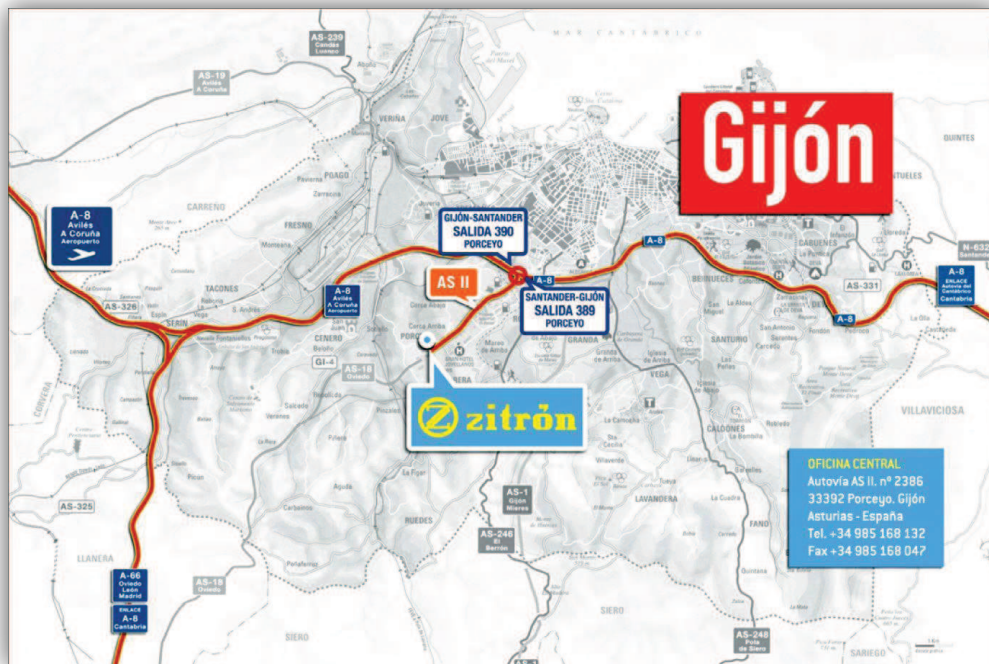
Generalmente, los ventiladores tienen que ser capaces de funcionar al menos durante dos horas con 400°C en el ambiente, ya que están pensados para extraer humos en caso de incendio, además del funcionamiento en condiciones normales. Uno de los problemas que surgen en la nueva concepción de ventilador es que el rotor, el cual está inyectado con aluminio, al estar situado en la parte externa estará más expuesto al ambiente en caso de incendio y es posible que el aluminio sufra deformaciones por temperatura que den lugar a fallo en el motor.

Se ha llevado a cabo un estudio con diferentes aleaciones de aluminio, analizando su composición química y propiedades más representativas, para así determinar si es viable utilizar alguna aleación especial en la fabricación del rotor. El objetivo es que el material resista las condiciones de temperatura elevada y presente al mismo tiempo un buen comportamiento eléctrico.

## 1.2 ANTECEDENTES Y OBJETOS DE ESTUDIO:

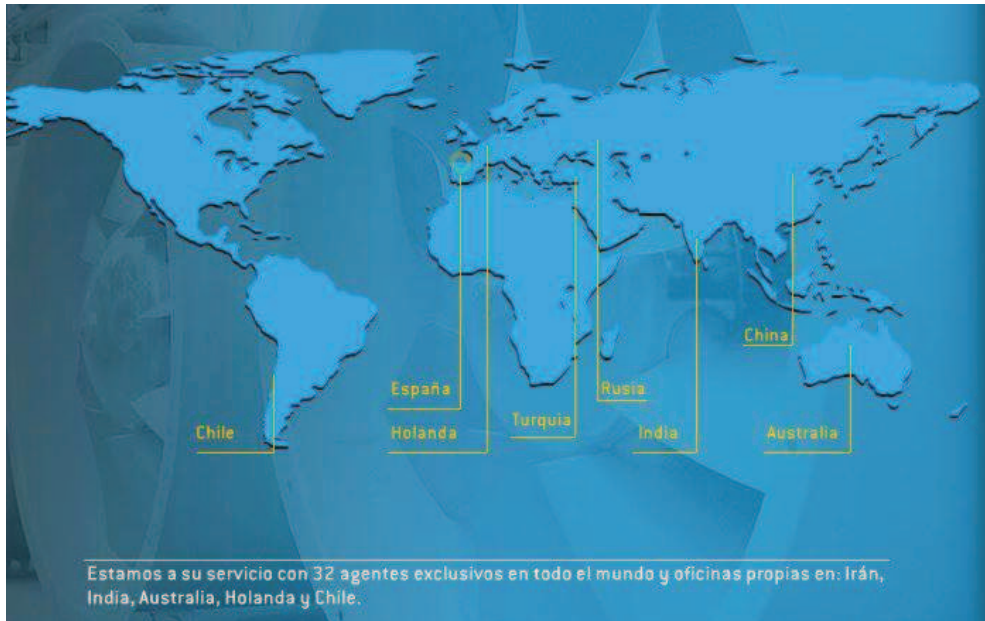
### 1.2.1 La empresa Zitrón

Situada en Gijón –Asturias (España) y con presencia y ámbito de actuación mundial, Zitrón cuenta con más de 40 años de experiencia dedicados a la fabricación de bienes de equipo para minería subterránea y obras públicas.



Fotografía1.- Localización de Zitrón

Esta experiencia es lo que ha llevado a ser una de las empresas más importantes del mundo en sistemas de ventilación (trabaja en 82 países y tiene factorías en 4 continentes), desarrollando un alto nivel de tecnología con un equipo humano altamente cualificado.



**Fotografía2.- Sedes de Zitrón en el mundo**

La empresa nació en julio de 1963. En una época en la que prácticamente toda la maquinaria de minería era importada, un pequeño grupo de empresarios vinculado a la familia Ortiz fundó Zitrón S. A. para iniciar la fabricación de las primeras palas neumáticas para el interior de las minas. En el principio de los tiempos los trabajos eran en la minería y durante muchos años se situaban en un radio no mayor de 200 km. Sin embargo, actualmente, dentro de ese círculo solo realizan el 3% de los proyectos llegando incluso a exportar más del 90% de la producción.

La empresa nació con tres trabajadores y siempre estuvo ubicada en la parcela de Porceyo, que tras sucesivas ampliaciones ahora ocupa 31.000 metros cuadrados con 15.000 de superficie cubierta y una plantilla de 200 personas.

El gran salto internacional se produjo a partir del año 1993. En esos momentos se aceleró el cierre de la minería porque no era rentable y el consejo de la empresa decidió abrir nuevos mercados de la mano del Icx.

El 60% de los proyectos de Zitrón están destinados a túneles de infraestructuras y el 40% a ventilación en instalaciones mineras. En el sector minero están en Rusia, México, Perú, Chile, Bolivia, Colombia y Australia, el país minero más importante con oro, níquel y uranio

La culminación de los esfuerzos para ofrecer la mejor tecnología al servicio de sus clientes, se materializa ahora en el Banco de Ensayos más grande del mundo en su tipo y sobre todo, con una tecnología punta capaz de dar una fiabilidad superior al 99% cumpliendo las normas de calidad más exigentes.



Fotografía3.- Logo comercial de Zitron



Fotografía4.- Entrada principal Zitron Gijón



## 1.2.2 El motor de jaula de ardilla

Los motores asíncronos son máquinas rotativas de flujo variable y sin colector. El campo inductor está generado por corriente alterna. Generalmente, el inductor está en el estator y el inducido en el rotor. Son motores que se caracterizan porque son mecánicamente sencillos de construir, lo cual los hace muy robustos y sencillos, apenas requieren mantenimiento, son baratos y, en el caso de motores trifásicos, no necesitan arrancadores (arrancan por sí solos al conectarles la red trifásica de alimentación) y no se ven sometidos a vibraciones por efecto de la transformación de energía eléctrica en mecánica, ya que la potencia instantánea absorbida por una carga trifásica es constante e igual a la potencia activa. Estas son las principales ventajas que hacen que sea ampliamente utilizado en la industria.

Como inconvenientes, podemos mencionar que son motores que tienen bajos pares de arranque, que presentan una zona inestable de funcionamiento y que el control de velocidad en amplios rangos es complejo.

### 1.2.2.1 Clasificación

Se pueden clasificar atendiendo a varios criterios, así tenemos:

1. Según el número de devanados en el estator:

- **Monofásicos:** tienen un sólo devanado en el estator. Se utilizan en aplicaciones tanto en el hogar como en la industria (bombas, ventiladores, lavadoras, electrodomésticos en general, pequeñas máquinas-herramientas, etc.)
- **Bifásicos:** tienen dos devanados en el estator. Estos devanados están desfasados  $\pi/2$  (90°), siendo P el número de pares de polos de la máquina, en el espacio. Se suelen utilizar en aplicaciones de control de posición.
- **Trifásicos:** tienen tres devanados en el estator. Estos devanados están desfasados  $2\pi/3$  (120°), siendo P el número de pares de polos de la máquina, en el espacio. Se suelen utilizar en aplicaciones industriales: máquinas-herramientas (tornos, fresadoras, cepilladoras, etc.), grúas, bombas, compresores, ventiladores, etc.

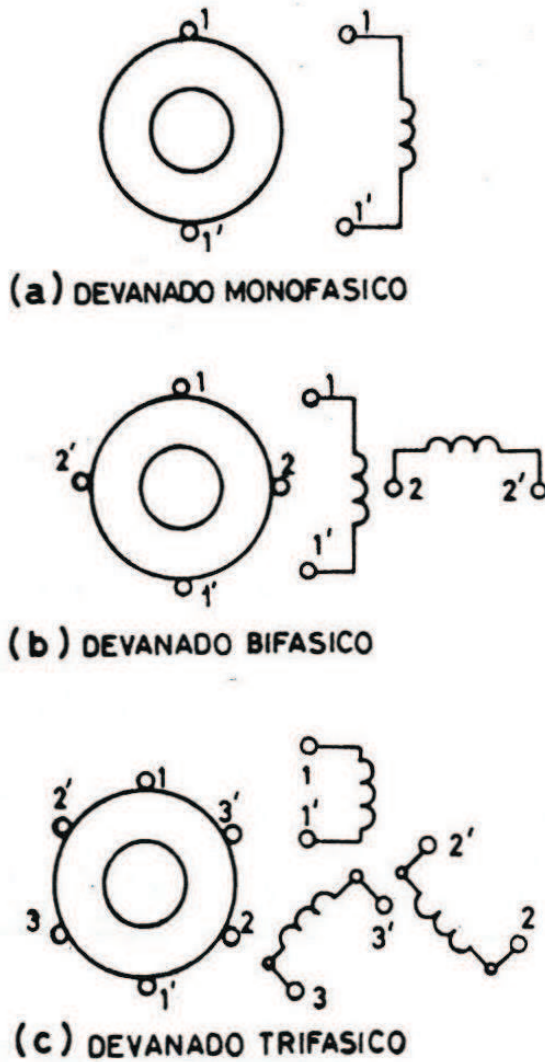


Figura 1.- Clasificación de los motores según devanado

## 2. Según el tipo de inducido

- Rotor devanado: los devanados del rotor son similares a los del estator con el que está asociado. El número de fases del rotor no tiene porqué ser el mismo que el del estator, lo que sí tiene que ser igual es el número de polos. Los devanados del rotor están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje.

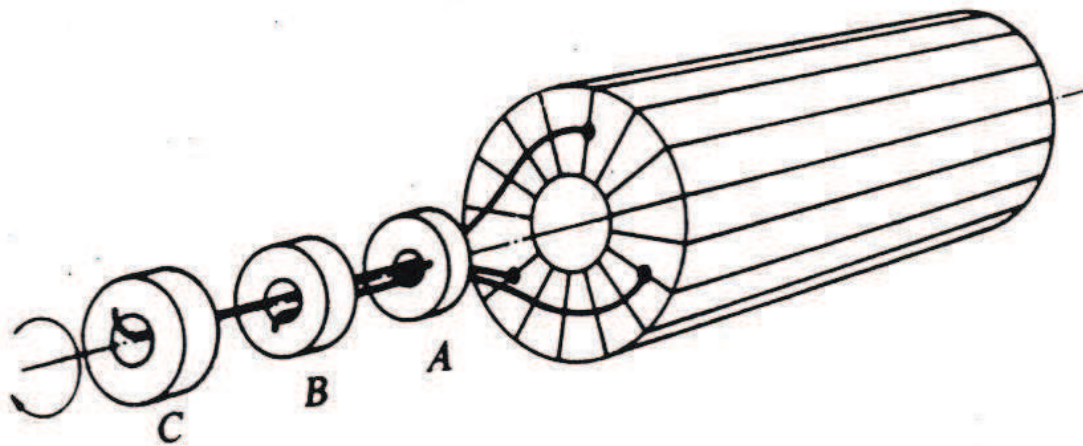


Figura 2.- Rotor devanado

- Rotor en jaula de ardilla: es el más utilizado. Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto no hay posibilidad de conexión del devanado del rotor con el exterior.

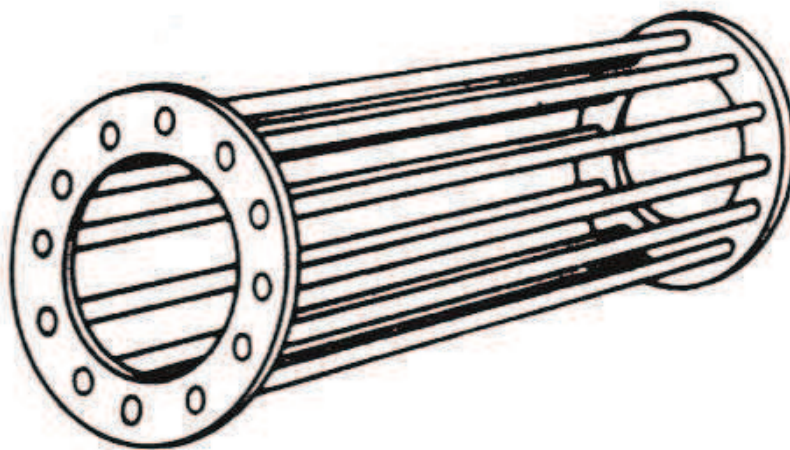


Figura 3.- Rotor en jaula de ardilla

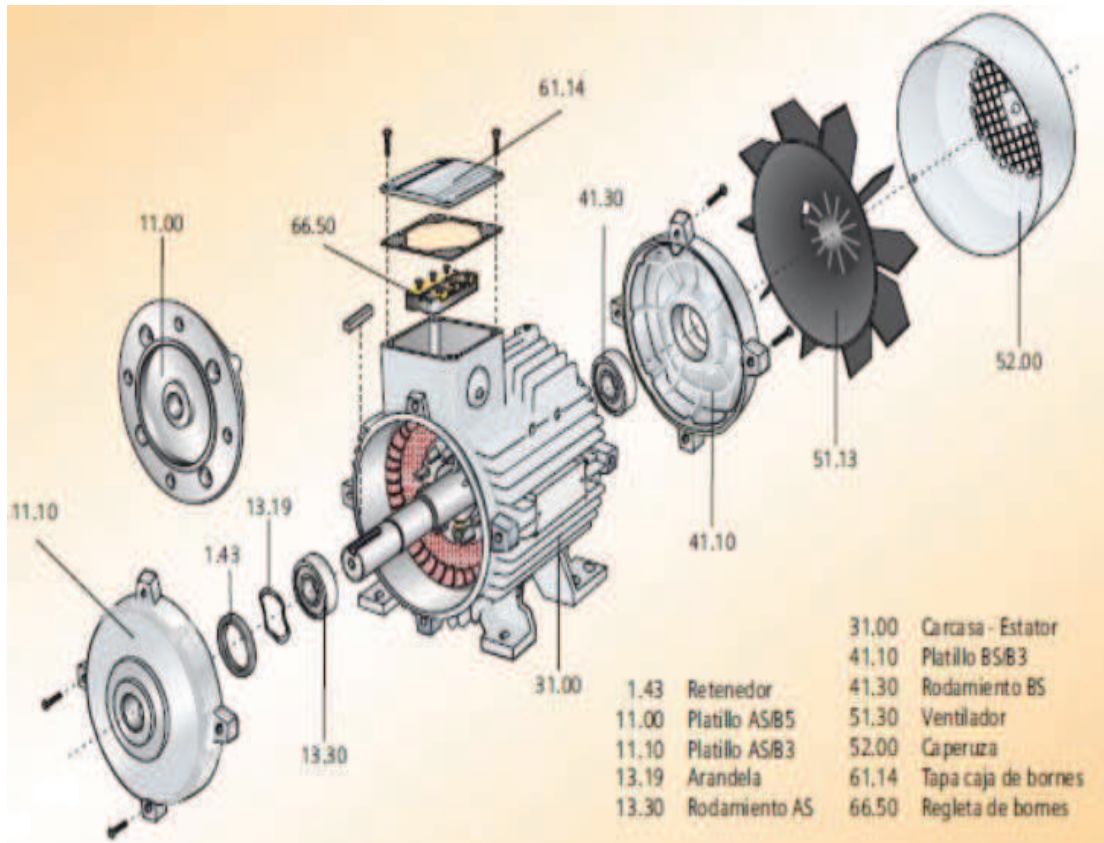


Figura 4.- Despiece de un motor de inducción de corriente alterna tipo jaula de ardilla

### 1.2.2.2 Partes

Las partes principales del motor de corriente alterna tipo jaula de ardilla son el rotor y el estator.

- **Estator**

*Carcasa:* Es la estructura que sirve como soporte del motor, por lo general se construye de hierro fundido acero o aluminio, es resistente a la corrosión y en la mayoría de los casos presentan aletas que permiten un enfriamiento mucho más rápido del motor.

*Núcleo:* El núcleo magnético del estator está compuesto de chapas de acero magnético con tratamiento térmico para reducir al mínimo las pérdidas el hierro.

*Devanado:* El devanado del estator está compuesto por tres bobinas con iguales características, una por fase formando un sistema trifásico para conectarse a la red de suministro. El material utilizado es cobre.

- **Rotor**

*Eje:* El eje del motor también conocido como flecha, es el encargado de transmitir la potencia mecánica desarrollada por motor y recibe un tratamiento térmico para evitar problemas con deformación y fatiga.



*Núcleo de chapas:* Estas tienen las mismas características que las del estator. Barras y anillos de cortocircuito: estas son fabricadas con aluminio, cobre o bronce y fundidas a presión en una pieza única

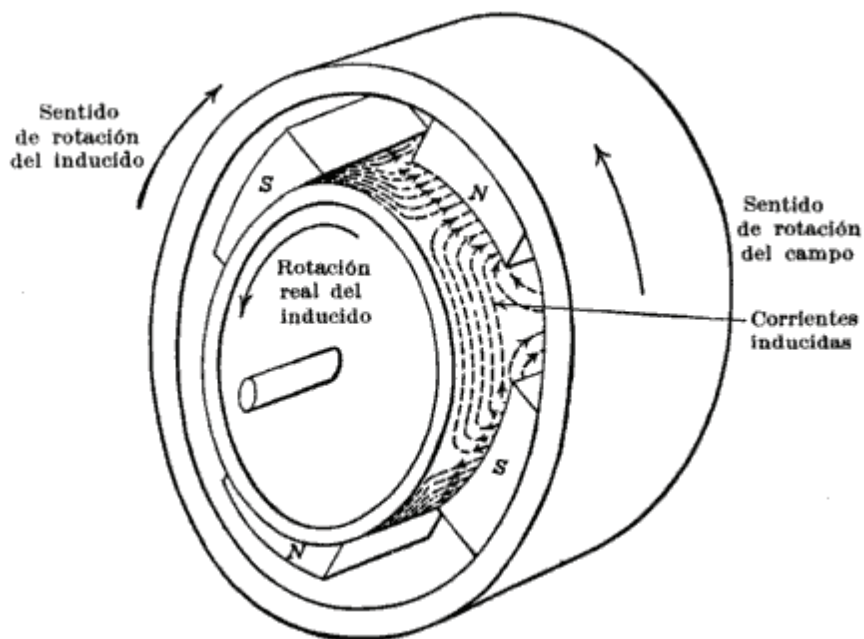
**Fotografía5.- chapas metálicas (talleres Zitron)**

Para que motor gire con menos ruido las ranuras y las barras se colocan ligeramente inclinadas respecto al eje del rotor formando hileras simples. Las aletas de los anillos terminales y el ventilador colocado al final del eje sirven para impulsar a través del motor el aire necesario para extraer el calor debido a las pérdidas. El eje gira sobre rodamientos de bola, ocasionalmente sobre cojinetes fricción de modo que entre el rotor y el estator se obtenga un entre hierro relativamente estrecho, de aproximadamente 0.2 a 1 mm.

### **1.2.2.3 Funcionamiento**

La operación del motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla se rige bajo el principio de funcionamiento de un transformador, es decir; está basado en la aplicación de la ley de inducción electromagnética de Faraday y la fuerza de Lorentz en un conductor. Cuando el devanado del estator es conectado a una fuente de suministro trifásica, se produce un campo magnético de una magnitud constante y que gira alrededor de la periferia del rotor a una velocidad sincrónica. Éste campo rotatorio induce una fuerza electromotriz en el devanado del rotor. Como el rotor está constituido por barras cortocircuitadas, la tensión inducida produce también una corriente inducida en ellas, produciendo su vez su propio campo magnético, mismo que interactúa con el campo magnético principal, experimentándose una fuerza o par que hace girar al rotor. A este par desarrollado se le conoce como par de arranque.

Cuando el motor es energizado con una carga inicial, se requiere que el par de la carga sea menor que el par de arranque para que el rotor comience a girar. Cuando el motor arranque sin carga, el rotor alcanzará rápidamente una velocidad muy cercana a la velocidad síncrona, sin embargo nunca podrá girar a esta velocidad debido a que sus bobinas parecerían fijas respecto al campo rotatorio y no habría fem inducida en ellas. Al no existir una fem inducida en el rotor, no circularía ninguna corriente y como consecuencia no se manifestaría ninguna fuerza debida a la no interacción de los campos magnéticos del rotor y estator.



**Figura5.- Rotación de un cilindro conductor de vida a corrientes inducidas**



## **1.2.3 El material utilizado : Aluminio y aleaciones**

### **1.2.3.1 Introducción**

En la actualidad el consumo de productos siderúrgicos es de unas 20 veces mayor que el del resto de los metales, lo cual es debido a la gran variedad de características que con los mismos es posible conseguir (se pueden obtener piezas por forja, fundición, soldadura, mecanizado y sus propiedades son susceptibles de ser modificadas por medio de tratamientos térmicos). No obstante a estas ventajas, tienen el grave inconveniente de corroerse con suma facilidad. Por otra parte sus propiedades no satisfacen a todas las exigencias de las técnicas modernas, tales como: buena conductividad eléctrica, elevada relación resistencia/peso, refractabilidad, aptitud para determinadas formas de moldeo (fundición inyectada) y de foja (extrusión), facilidad de mecanizado, aspecto ornamental (color, brillo y otras).

Convencionalmente se consideran metales ligeros a los que tienen una densidad inferior a  $4500 \text{ Kg/m}^3$ . Entre ellos los de mayor importancia técnica son: Al, Mg, Ti y Be. Las aleaciones en que el metal base es uno de los anteriores, se denominan ligeras. Las aleaciones a base de magnesio reciben también la denominación de ultraligeras.

El *aluminio* es un metal de color blanco, débilmente azulado, es unas tres veces más ligero que el hierro. Cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas y es muy dúctil y maleable. Entre  $100$  y  $150^\circ\text{C}$  se puede forjar, laminar, batir y prensar, pero al acercarse a su punto de fusión ( $658.7^\circ\text{C}$ ) se vuelve quebradizo. Cuando se trabaja en frío adquiere una elevada dureza y se agrieta superficialmente, pero con un recocido a  $350^\circ\text{C}$ , seguido de un enfriamiento lento, adquiere de nuevo las propiedades iniciales.

El maquinado se hace con gran velocidad de corte y en seco, pero cuando el aluminio es muy puro, no se trabaja bien, por adherirse al filo de las herramientas de corte. La resistencia mecánica es tanto más débil cuanto mayor es su pureza, y se consigue aumentar gracias a elementos de aleación.

A pesar de su gran actividad química, es muy resistente a la corrosión debido a la capa de óxido fuertemente adherida que se forma al ponerse en contacto con el aire húmedo. Mediante oxidación anódica, se logra obtener una capa más espesa, adherente, elástica y muy dura, capaz de fijar colorantes, que le dan un bello aspecto.

Su conductividad eléctrica aunque inferior a la del cobre (unos  $2/3$ ), es todavía lo suficientemente elevada para poder emplearlo en las líneas de conducción eléctrica. Como es mucho más ligero que el cobre, de la misma longitud y peso, resulta mejor conductor el aluminio. Es también buen conductor del calor, sólo superado por el Ag, Cu y Au. Su bajo factor de emisión permite utilizarlo como aislante térmico. Así pues en la industria se emplea cada día más el aluminio debido a sus propiedades características:

*a. Por su ligereza.*

Uso amplio del metal y las aleaciones en la construcción de estructuras metálicas, industrias aeronáuticas, automovilísticas y ferroviarias, cámaras fotográficas y en general elaboración de objetos ligeros.

*b. Por su buena conductividad eléctrica.*

Como conductor en líneas de alta tensión. Los cables están generalmente formados por un alma de acero que les comunica resistencia mecánica, rodeada por una serie de conductores de aluminio.

*c. Por su resistencia a la corrosión.*

Para utensilios de cocina y en forma de láminas para envolver alimentos.

*d. Por su elevado poder reflector de los rayos caloríficos.*

Se utiliza en forma de polvo fino para fabricar pinturas (purpurinas de plata), destinadas a pintar depósitos que han de contener líquidos inflamables.

Por otro lado, dado que el aluminio es un metal mecánicamente débil, se le alea con una gran cantidad de elementos, que le comunican mejores características mecánicas, mayor facilidad de moldeo o conformación en frío y en caliente. También se afecta las propiedades de resistencia a corrosión, fatiga, ductilidad. Por otra parte, forman con él, o entre sí, compuestos intermetálicos ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{MgZn}_2$ ...), que desempeñan un papel importante en las características de la aleación por aumentar su solubilidad con la temperatura.

Las principales clases de aleación son:

➤ *Aleaciones para moldeo.*

Como el aluminio es muy difícil de moldear, por su elevado coeficiente de contracción y su gran tendencia a absorber gases, cuando se desea obtener piezas por colada es necesario alearlo con porcentajes de hasta un 14%. Las principales aleaciones referenciadas según norma UNE:

L-20XX Aluminio.

L-21XX Al-Cu

L-23XX Al-Mg

L-25XX y 26XX Al-Si

L-27XX Al-Zn

L-29XX Al-Sn



➤ Aleaciones para forja.

Los porcentajes de aleaciones son inferiores a los anteriores, no suelen pasar del 7%. Se utilizan para fabricación de piezas por tratamientos mecánicos, tales como laminado, forjado, matizado, estampado, trefilado.... La referencia en norma UNE:

L-30XX Al

L-31XX Al-Cu

L-33XX Al-Mg

L-34XX Al-Mg-Si

L-35XX Al-Si

L-37XX Al-Zn

L-38XX Al-Mn

L-39XX Al-Sn

### **1.2.3.2 Propiedades generales del aluminio**

El aluminio tiene una extraordinaria ligereza que lo predestina como el material base de estructura de los vehículos de transporte. El desarrollo de la aviación se debe en gran medida al desarrollo de aleaciones de aluminio ligeras y con suficientes propiedades mecánicas para ser utilizadas.

Su excelente conductividad eléctrica, le propicia el puesto de sustituto del cobre para muchas aplicaciones eléctricas. Esto ocurre en parte por los precios más económicos del aluminio frente al cobre, y en parte por los precios asociados a su baja densidad. Esta baja densidad lo hace especialmente indicado para elementos autoportantes (conductores eléctricos aéreos).

Otra de sus características apreciables es su inalterabilidad a los agentes atmosféricos y algunos corrosivos, lo cual hará que encuentre aplicación en decoración, industrias químicas, y también en alimentarias (por su característica adicional de inocuidad).

- **Propiedades generales.**

El aluminio es un metal clasificado en el grupo 3 de la tabla periódica, con el número atómico 13. No es alotrópico y cristaliza únicamente en una red cúbica centrada en caras (CCC). La densidad del aluminio es de  $2.7 \text{ Kg/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ , y su punto

de fusión es relativamente bajo, 650°C. El coeficiente de dilatación lineal es del orden de  $25 \cdot 10^{-6} \text{ mm/}^\circ\text{C}$ , es decir, el doble que el del hierro.

La conductividad térmica, característica pareja a las eléctricas, es de  $0.52 \text{ cal / cm}^{-1} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ , es decir, del orden de la mitad que la del cobre. Posee propiedades reflectantes al calor y a la luz bastante buenas, que lo hacen aplicable a reflectores en sustitución del plata, platino, níquel, cromo...Respecto a la corrosión por pares galvánicos, el aluminio es muy activo. Sin embargo, se hace muy pasivo al recubrirse de una película de alúmina.

- ***Propiedades mecánicas.***

Al igual que el cobre, la característica más diferenciada del Aluminio respecto al acero es su excelente capacidad de deformación. Además en las gráficas tensión-deformación, se observa la ausencia práctica de límite elástico (sobre todo cuanto más puro sea el aluminio). Se suele establecer que el límite elástico se encuentra al 2 por mil de la deformación.

Otra diferencia sustancial respecto al acero es su módulo de elasticidad, pues del orden de un tercio del primero, lo que hace que las construcciones en aluminio sean de gran flexibilidad.

Puesto que el aluminio es alotrópico, sus posibilidades de endurecimiento quedan muy disminuidas. Sólo los procesos de acritud, pueden ser aplicados en todas la aleaciones de aluminio (cualquiera que sea su composición); también el tratamiento de envejecimiento pero solo para determinadas composiciones de aleación.

La resistencia mecánica del aluminio a temperaturas superiores al ambiente, es pequeña debido a su bajo punto de fusión. Sin embargo a baja temperatura las características evolucionan en un sentido favorable, especialmente la carga de rotura, y en menor medida el límite elástico y alargamiento.

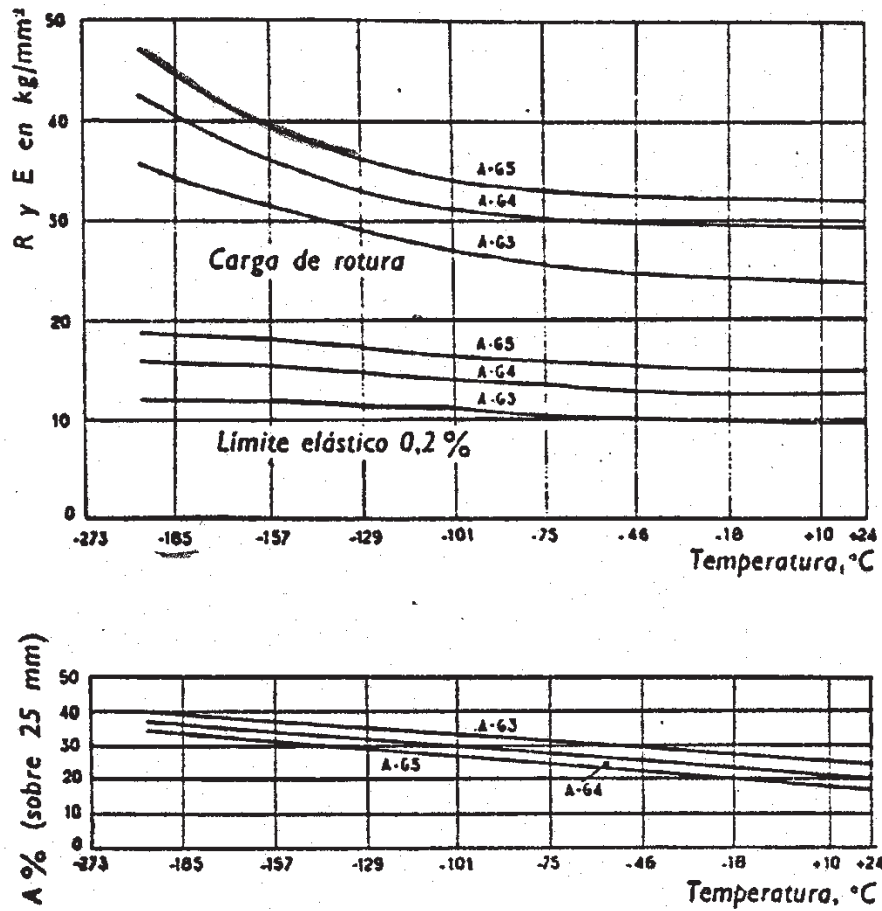


Figura6 .-Características mecánicas en estado recocido del aluminio en diferentes estados de pureza, en función de la temperatura.

- **Propiedades químicas.**

Las propiedades están polarizadas por dos aspectos contrapuestos, como son:

- a. El aluminio posee una gran avidez por el oxígeno. Por esta razón es un fuerte reductor.
- b. El óxido que se forma  $Al_2O_3$ , se obtiene con cierto aumento de volumen y forma en la superficie una película continua adherente e impermeable, por la que inhibe al aluminio de corrosión posterior. Este mecanismo de protección sin embargo no resiste el ataque de bases y ácidos fuertes.

Aumentos de temperatura dan lugar a que el proceso de oxidación sea más rápido.

El flúor y su ácido (fluorhídrico) atacan al aluminio pero crean la capa de alúmina protectora. No sucede igual con el cloro, que forma cloruro de aluminio y ácido clorhídrico que ataca al metal produciendo picaduras.

La mayoría de ácidos ataca a la alúmina. El ácido nítrico, sulfúrico y fosfórico ataca moderadamente la superficie produciendo abrillantamiento, por lo que son empleados para el decapado.

También las bases fuertes atacan violentamente el metal, pero la alúmina es difícilmente disuelta por los hidróxidos sódico y potásico.

### ***1.2.3.3 Principales aleaciones de aluminio***

El aluminio sin alear que se ha descrito, posee distinguidas características sobre el resto de los metales, las que, en compromiso con su precio de mercado, definen unas aplicaciones muy específicas de este metal. En efecto su buena conductividad térmica y eléctrica, junto con su baja densidad, distinguen al aluminio como un buen conductor eléctrico. Su buena conductividad junto con su baja densidad hace pensar en el aluminio para piezas sometidas a fuertes aceleraciones y gradientes térmicos. Al igual que en el cobre, la buena disposición a la autoprotección a los medios oxidantes y corrosivos, especialmente después del proceso de anodizado, lo hace destacable para fines decorativos y de inalterabilidad. Pero sobre todo, en todas las aplicaciones del aluminio aparece como común denominador su característica de baja densidad, que es muy estimada sobre todo en las industrias del transporte y especialmente en las aeronáuticas.

Sin embargo cualquiera de las aplicaciones descritas exige al aluminio un mínimo de características mecánicas, que son difíciles de alcanzar sin utilizar elementos de aleación.

Los mecanismos de mejora de las propiedades mecánicas a partir de la adición de elementos de aleación son:

- 1.-Endurecimiento estructural por aleación sólida de sustitución.
- 2.-Endurecimiento por envejecimiento para ciertas proporciones y calidades del soluto.
- 3.-Endurecimiento combinado por envejecimiento y acritud, para las aleaciones potencialmente envejecibles.

Para clasificar las aleaciones se puede atender a diversos factores característicos de cada uno de los grupos. En concreto, podemos clasificarlas en función del tratamiento térmico que se suele aplicar, o bien, en función del proceso de fabricación que se utiliza para obtenerlas.

- **Clasificación de las aleaciones en función del tratamiento térmico aplicado**

Las principales familias de aleaciones desde el punto de vista del tratamiento térmico a aplicar serían:

- a) **Aleaciones no envejecibles.**

- ❖ **Aleación de Aluminio - Magnesio.**

El contenido máximo de magnesio se limita a un 5% debido a que por encima de esta cantidad se producen inestabilidades como la precipitación intergranular. Es por ello que las aleaciones de este tipo tienen composiciones desde un 0.7% hasta un 5% de Magnesio.

Como principales características decir que:

- 1.-La soldabilidad de estas aleaciones es buena.
- 2.-La resistencia a corrosión es mucho mayor que la del aluminio, incluso en ambientes marinos e incluso resiste la acción del ácido nítrico concentrado.
- 3.-Esta familia de aleaciones es forjable, tanto más cuanto menor sea el contenido de magnesio.
- 4.-Se emplean estas aleaciones para moldeo en caso de altos contenidos en magnesio.
- 5.-Estas aleaciones se pueden anodizar sobre todo en caso de uso decorativo.

- ❖ **Aleaciones Aluminio - Manganeso.**

La adición de manganeso provoca la aparición de  $Al_6Mn$  y  $Al_{12}Mn_3$  finamente dispersos en la matriz. La solubilidad máxima viene a ser de 1.82% de Mn, por lo que no se sobrepasa esta cantidad para mantener las condiciones de forjabilidad y no disminuir las propiedades.

El Mn tiene bajo coeficiente de difusión por lo que si el enfriamiento es rápido, la solución será sobresaturada y heterogénea, lo cual originará recristalizaciones y engrosamiento del grano. Se corrige este efecto por un recocido de homogenización a alta temperatura.

La débil resistencia a la corrosión por picaduras, se mejora con la adición de hasta un 0.2% de Cu. La mejora de las características de corrosión y mecánicas, así como a la fatiga, se consigue con la adición de magnesio. De esto resulta una familia ternaria de componentes Al-Mg-Mn de gran aplicación.

❖ Aleaciones Aluminio - Silicio.

Se aplican porcentajes inferiores al 1% de Si para conseguir perfiles extruidos destinados a la decoración anódica. El mayor uso del Silicio es conseguir aleaciones ternarias envejecibles con el magnesio.

**b). Aleaciones envejecibles.**

❖ Aleaciones Aluminio - Magnesio - Silicio.

Se trata de aleaciones que contienen hasta un 1% de Magnesio y por encima de esta cantidad de silicio. Para conseguir las propiedades óptimas se debe aplicar un tratamiento de envejecimiento artificial. La soldabilidad es tan solo aceptable, y aguanta la corrosión incluso en ambientes marinos.

❖ Aleación Aluminio - Cobre - Magnesio.

El cobre es el elemento de aleación que mayor aumento de características aporta al aluminio tras el proceso de envejecimiento artificial. Suele emplearse en proporciones entre un 2 y un 5%.

La principal ventaja de la adición de cobre es la mejora importante de las propiedades mecánicas y de su colabilidad.

Por el contrario las principales desventajas se encuentran en la baja resistencia a la corrosión, y una soldabilidad mediocre.

❖ Aleaciones Aluminio - Zinc - Magnesio.

La característica más importante es que en esta aleación se puede aplicar tratamientos de envejecimiento natural y que disminuye la velocidad de enfriamiento crítica de temple.

Además estas aleaciones permiten la soldadura bajo gas inerte, obtienen buenas propiedades mecánicas, tienen buen comportamiento frente a corrosión incluso en ambiente marino y son factibles de ser moldeadas.

### **1.2.3.4 Formas comerciales del aluminio**

El aluminio y sus aleaciones pueden ser encontrados en el mercado fabricados a partir de todos los procesos que se conocen. Fundamentalmente se encuentran como:

- Productos estándar: barras, tubos, conductos, formas y perfiles estructurales...
- Productos de ingeniería: aquellos que se han diseñado para unas aplicaciones determinadas, incluyendo formas extruidas, forjadas, troqueladas u obtenidas por pulvimetalurgia.

### **1.2.3.5 Clasificación de las aplicaciones del aluminio**

En EEUU la industria del aluminio está dividida en toda una serie de mercados, como son:

#### **A. Aplicaciones en la construcción y edificios.**

El aluminio se utiliza ampliamente en edificios de toda clase, puentes torres y tanques de almacenamiento. El aluminio y debido a su bajo precio es utilizado cuando en los diseños se consideran factores de bajo peso, protección anticorrosión etc...

El diseño y fabricación de estructuras estáticas de aluminio es muy similar a la que se realiza con el acero. El módulo de elasticidad es 1/3 del que tiene el acero. No obstante ofrece mejoras en caso de impactos frente al acero.

En estructuras pequeñas, se estima que el uso de aluminio en vez de acero al carbono dulce consigue ahorrar hasta un 50% en peso. También este ahorro es posible en puentes móviles. Además se ahorra en mantenimiento por su resistencia a la corrosión.

Formas corrugadas, al igual que otras endurecidas, son utilizadas como techos en edificios, industrias y construcción de agricultura. También partes como ventiladores, canalones de drenaje, bajantes, marcos de puertas y ventanas...

Se utiliza en hospitales, colegios, oficinas, casas, en cuanto a paredes exteriores, paredes continuas, aplicaciones interiores, conductos, elementos decorativos. También en puentes civiles y militares transportables, estructuras de subestaciones eléctricas, tanques de almacenamiento de agua.

#### **B. Containers y embalaje.**

Las industrias alimenticias y químicas utilizan mucho el aluminio porque no es tóxico, no absorbe, además minimiza el crecimiento bacteriano y se puede limpiar con vapor. Su baja capacidad calorífica permite un importante ahorro energético en caso

de tener que refrigerar los contenedores. La característica de no astillable del aluminio en caso de explosión es muy útil en industrias donde éstas pueden ocurrir.

La alta capacidad anticorrosiva es importante en caso de tener que transportar mercancía delicada por barco.

En el sector de embalaje ha triunfado ampliamente. Desde papeles de aluminio para envolver alimentos, tapones de botellas, latas de conserva etc...

Otro campo de gran éxito ha sido las latas de envasado de bebidas, café, cerveza...

### C. Transporte.

El aluminio se utiliza ampliamente en el sector del automóvil debido fundamentalmente a dos causas:

1. Intento de reducción del consumo de combustible a partir de reducción de peso.
2. Necesidad de reciclar los materiales utilizados.

Se utiliza en la construcción de bloques de motor, cilindros, pistones, carburadores, válvulas, transmisiones, válvulas de freno.

En los camiones, debido a la limitación de peso existente y el deseo de aumentar la carga útil, el aluminio se ha utilizado mucho. Desde su uso en las cabinas, hasta en el depósito de combustible, sistemas de suspensión etc...

### D. Aplicaciones marinas.

La gran resistencia a corrosión del aluminio frente al acero permite que los diseños lleguen a ser hasta un 50% más ligeros. Al realizar las estructuras de aluminio se consigue un ahorro de peso. En definitiva, la pérdida cuantitativa de peso por el uso de aluminio logrará que el barco se desplace con menos gasto de combustible. Además consigue disminuir el mantenimiento por problemas de corrosión o por ataque biológico.

Dado el menor módulo de elasticidad del aluminio acepta mayores deformaciones sin grandes tensiones internas, y en definitiva, las estructuras pueden ser construidas sin juntas de expansión.

### E. Uso aeroespacial.

El aluminio se utiliza prácticamente en todos los segmentos de las aeronaves, misiles, turbinas, tanques de combustible etc... El aluminio es utilizado ampliamente por su gran resistencia específica (resistencia partido densidad), resistencia a corrosión...



Además en caso de exposiciones a ambientes salinos pueden utilizarse aleaciones, aluminio anodizado e incluso otros recubrimientos orgánicos de protección contra la corrosión.

#### F. Aplicaciones eléctricas.

El uso del aluminio es predominante en muchas aplicaciones conductoras. El aluminio se trata con trazas de boro a fin de eliminar los contenidos de titanio, zirconio y vanadio que incrementan la resistividad. El uso del aluminio es debido a la combinación de su bajo coste, propiedades mecánicas y excelente resistencia a corrosión.

Así la aleación conductora más común (1350) ofrece una conductividad mínima de 61.8% (IACS) y una resistencia a tracción mínima de 55 a 124 Mpa. Se utiliza además otras aleaciones en aplicaciones a temperatura y en instalaciones de televisión por cable.

Las dimensiones del conductor se consiguen a partir de un proceso de extrusión donde se hace pasar al metal por un orificio con las dimensiones finales ya establecidas. Normalmente los conductores se obtienen en forma de alambre simple o múltiple (en cuyo caso puede servirse como enrollado de alambres). El peso requerido para este tipo de conductores es muy inferior al que se obtendría en caso de utilización del cobre.

Normalmente los conductores de aluminio están reforzados internamente por acero (ACSR). Consisten en varias capas concéntricas de aluminio, alrededor de un alma de acero galvanizado o aluminizado que a su vez puede estar constituido también en capas o ser un alambre único.

El uso de este tipo de conductores permite la instalación de torres más distanciadas y por tanto en menor número para un trazado, que si se utilizase conductor de cobre.

En motores, fundamentalmente utilizado en el bobinado del rotor y en partes estructurales, así como en los anillos del rotor y el ventilador del motor. Las partes estructurales (como el alma del estator), se realizan en aluminio y es de destacar la importancia de una buena resistencia a corrosión en función del ambiente al que vaya a estar sometido, así como un bajo peso.

Utilizado, también para la construcción de antenas de radar y televisión y en recubrimiento para tubos de rayos catódicos de televisión.

Además muchos sistemas de iluminación utilizan el aluminio como reflector y también se utiliza como electrodo de condensadores.

### G. Equipos y Maquinaria.

En la industria petrolífera el aluminio es ampliamente utilizado en forma de pinturas para cubrir tanques de almacenamiento y oleoductos.

Es ampliamente utilizado en la fabricación de elastómeros porque no se adhiere a estos y resiste la corrosión en estos medios. También se utiliza ampliamente en la fabricación de explosivos.

El aluminio aguanta muy bien la corrosión debida a oxidantes fuertes, ácido sulfúrico, sulfato... También en la industria nuclear para elementos de protección del combustible para evitar la oxidación del uranio y para evitar la entrada de productos de reacción en el agua de refrigeración.

Finalmente decir que es utilizado en la industria textil, así como en la de producción de papel...

## **1.2.4 La conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones (y huecos en el caso de los semiconductores) pueden pasar por él. Varía con la temperatura y es una de las características más importantes de los materiales.

La conductividad es la inversa de la resistividad, por tanto  $\sigma = 1/\rho$ , y su unidad es el S/m (siemens por metro).

### **1.2.4.1 Conductividad en medios sólido**

Según la teoría de bandas de energía en sólidos cristalinos, son materiales conductores aquellos en los que las bandas de valencia y conducción se superponen, formándose una *nube* de electrones libres causante de la corriente al someter al material a un campo eléctrico. Estos medios conductores se denominan conductores eléctricos.

La Comisión Electrotécnica Internacional definió como patrón de la conductividad eléctrica:

*“Un hilo de cobre de 1 metro de longitud y un gramo de masa, que da una resistencia de 0,15388  $\Omega$  a 20 °C”* al que asignó una conductividad eléctrica de **100% IACS** (*International Annealed Cooper Standard*, Estándar Internacional de Cobre no Aleado).

A toda aleación de cobre con una conductividad mayor que 100% IACS se le denomina de alta conductividad (H.C. por sus siglas inglesas).

#### 1.2.4.2 Algunas conductividades eléctricas

	<b>Conductividad Eléctrica</b> <b>(S·m<sup>-1</sup>)</b>	<b>Temperatura(°C)</b>	<b>Apuntes</b>
Plata	$63.01 \times 10^6$	20	La conductividad eléctrica más alta de cualquier metal
Cobre	$59.6 \times 10^6$	20	
Templado Cobre	$58.0 \times 10^6$	20	Se refiere a 100 %IACS (Standard Internacional de Templado de Cobre, de sus siglas en inglés: International Annealed Copper Standard).
Oro	$45.5 \times 10^6$	20-25	
Aluminio	$37.8 \times 10^6$	20	
Agua de mar	5	23	$5(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$ para una salinidad promedio de 35 g/kg alrededor de 23(°C)
Agua potable	0.0005 a 0.05		Este rango de valores es típico del agua potable de alta calidad mas no es un indicador de la calidad del agua.
Agua desionizada	$5.5 \times 10^{-6}$		$1.2 \times 10^{-4}$ en agua sin gas; ver J. Phys. Chem. B 2005, 109, 1231-1238

**Tabla1.- Algunas conductividades eléctricas**

# CAPÍTULO II: Procedimiento experimental

## 2.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

### 2.1.1 ANSYS RMxprt

Los diseñadores de máquinas y generadores eléctricos pueden mejorar con ANSYS ANSYS Maxwell RMxprt, una herramienta de diseño basada en plantillas. Junto a Maxwell y a RMxprt crean un diseño de la máquina verdaderamente personalizado para satisfacer la demanda del mercado para una mayor eficiencia y un menor coste. Usando la teoría analítica del motor clásico y métodos equivalentes circuito magnético, RMxprt puede calcular el rendimiento de la máquina, la toma de decisiones de tamaño inicial y realizar cientos de "qué pasaría si" en cuestión de segundos.

RMxprt se puede configurar automáticamente y el proyecto Maxwell lo completa incluyendo la geometría, los materiales, las condiciones de frontera, las simetrías adecuadas y un riguroso análisis electromagnético.

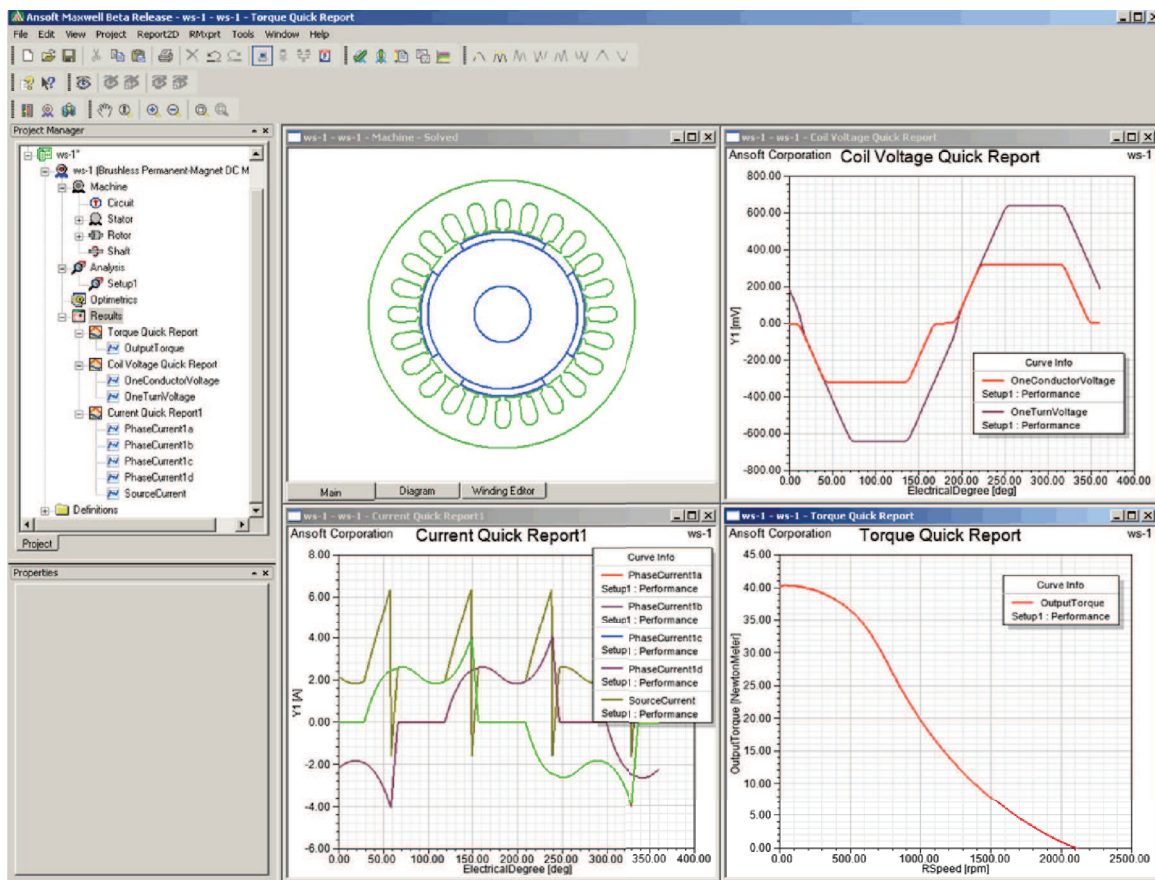


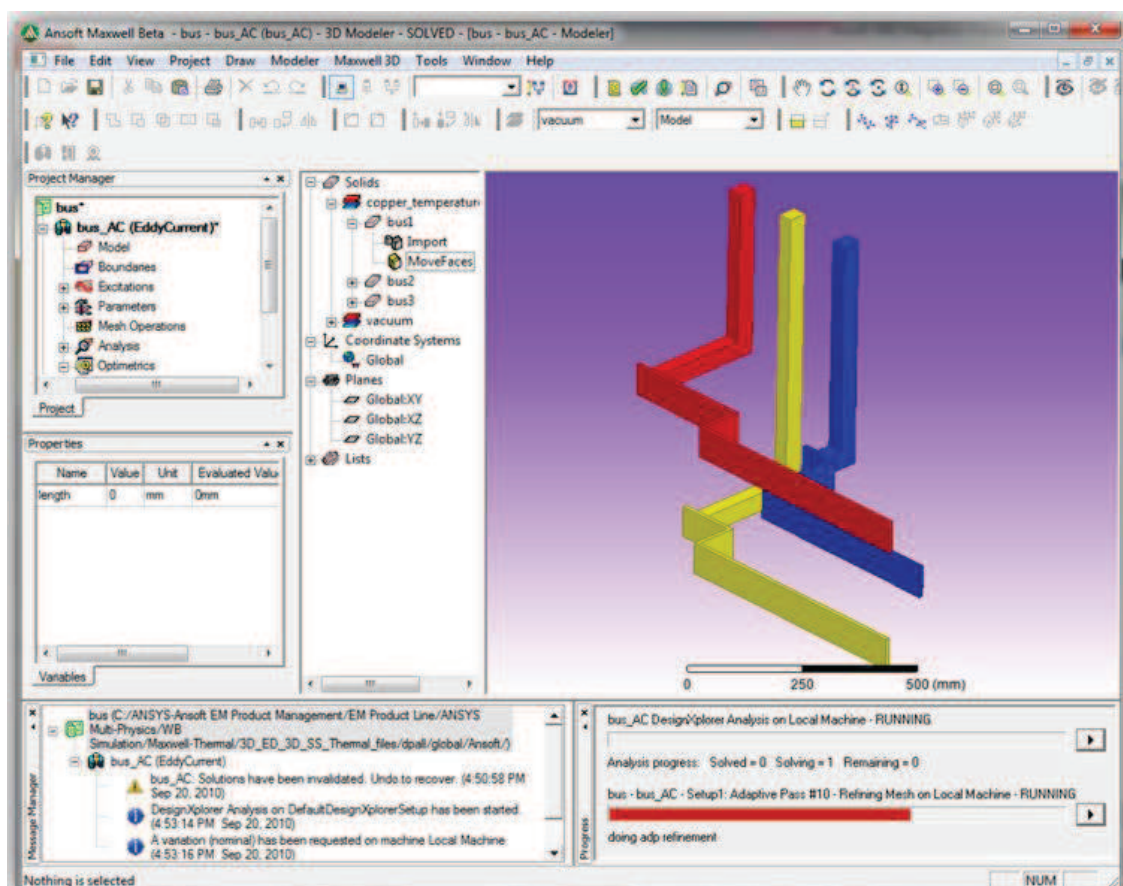
Figura7.-Vista en pantalla del programa Ansys RMxprt

## 2.1.2 ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell es el software de simulación de campo electromagnético de primera para los ingenieros encargados de diseñar y analizar los dispositivos electromecánicos, como motores, actuadores, sensores, transformadores y bobinas electromagnéticas de 3-D y 2-D.

Maxwell utiliza el método de los elementos finitos para resolver la estática, los dominios frecuentes, y la variable en el tiempo de los campos electromagnéticos y eléctricos. Un beneficio clave de ANSYS Maxwell es su proceso de solución automatizada, para lo cual es necesario que se especifique sólo la geometría, las propiedades del material y la salida deseada. Desde este punto, Maxwell genera automáticamente una malla adecuada, eficiente y precisa para resolver el problema.

Este proceso de adaptación automática de mallado elimina la complejidad del proceso de análisis y le permite beneficiarse de utilizar un flujo fácil de diseño y altamente eficiente.



*Figura8.-.Vista en pantalla del programa Ansys Maxwell*



Una característica clave en ANSYS Maxwell es la capacidad de generar, modelos de orden reducido de alta fidelidad en la solución de elementos finitos para el uso en ANSYS Simplorer, el software de simulación del sistema multidominio de ANSYS. Esta capacidad crea un poderoso caudal de diseño electromagnético que le permite combinar circuitos complejos con modelos de componentes de Maxwell para el diseño de sistemas electrónicos, de alto rendimiento electromecánico y mecatrónica.

### 2.1.3 El motor de rotor externo

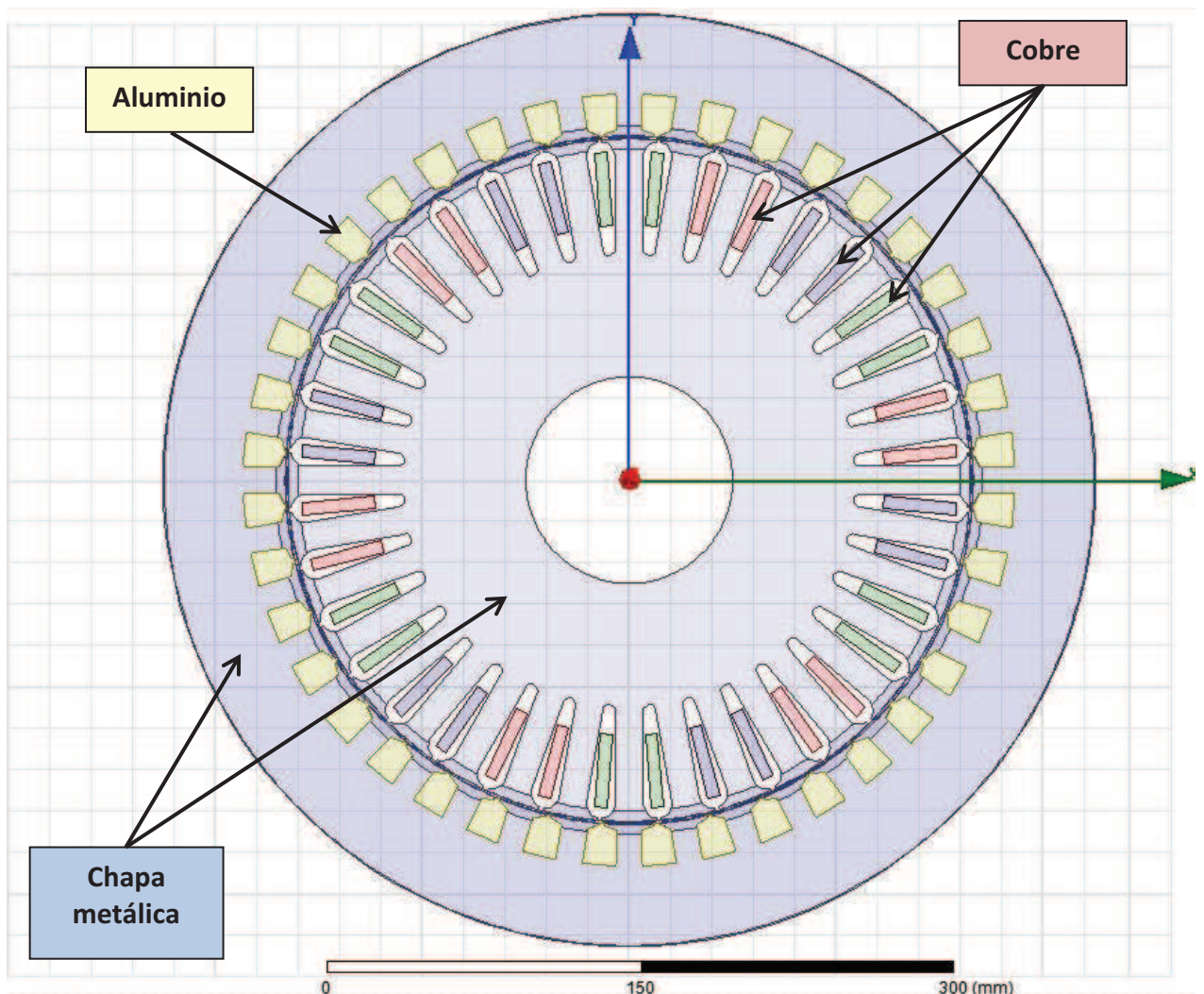


Figura9.- Imagen del motor de rotor externo en Maxwell

En la figura 9 se observa el cambio de diseño en el cual se modificó la posición de los dos elementos principales del motor: el rotor (parte móvil) y el estator (parte fija). El estator estará inyectado con cobre en hilos (bobinado) y el rotor con aluminio. Éste aluminio será el que se pretende sustituir por una aleación de aluminio que tenga silicio, el cual, permitirá soportar las temperaturas esperadas.



**Fotografía6.- Rotor interno con inyección de aluminio (talleres Zitrón)**

**Fotografía7.- Chapa metálica con latón y cobre (talleres Zitrón)**



### 2.1.4 Aleaciones L-2653T6 y L-2551

Éstas 2 aleaciones son las utilizadas en la fabricación de los álabes y las que van a ser estudiadas.

Europa EN 1706-1998		España		
Numérica	Simbólica	Numérica	Simbólica	Norma UNE Anulada
EN AC-21000	EN AC-Al-Cu4MgTi	L-2140	Al-4CuMgTi	38-214
EN AC-42000	EN AC-AlSi7Mg	L-2651	Al-7SiMg	38-267
EN AC-42100	EN AC-AlSi7Mg0,3	L-2652	Al-7Si0,3Mg	38-241
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6	L-2653	Al-7Si0,6Mg	38-242
EN AC-43000	EN AC-AlSi10Mg (a)	L-2560	Al-10SiMg	38-256
EN AC-43400	EN AC-AlSi10Mg (Fe)	L-2561	Al-10SiMgFe	38-268
EN AC-44000	EN AC-AlSi11	L-2522	Al-11Si	38-243
EN AC-44100	EN AC-AlSi12 (a)	L-2520	Al-12Si	38-252
EN AC-45000	EN AC-AlSi6Cu4	L-2620	Al-6Si4Cu	38-262
EN AC-45200	EN AC-AlSi5Cu3Mn	L-2610	Al-5Si3Cu	38-261
EN AC-45300	EN AC-AlSi5Cu1Mg	L-2571	Al-5SiCuMg	38-266
EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3 (Fe)	L-2631	Al-9Si3CuZnFe	38-245
EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3 (Fe)(Zn)	L-2630	Al-9Si3Cu3ZnFe	38-263
EN AC-47000	EN AC-AlSi12 (Cu)	L-2530	Al-12SiCu	38-253
EN AC-47100	EN AC-AlSi12Cu1 (Fe)	L-2521	Al-12Si1CuFe	38-269
EN AC-48000	EN AC-AlSi12CuNiMg	L-2551	Al-12SiCuNiMg	38-265
EN AC-51000	EN AC-AlMg3 (a)	L-2340	Al-3Mg	38-236
EN AC-71000	EN AC-AlZn5Mg	L-2710	Al-5ZnMg	38-271

Tabla 2.- Aleaciones de Aluminio



Estas dos aleaciones son las utilizadas para la fabricación de los álabes, ya que pueden soportar temperaturas muy elevadas en torno a los 400°C, pero no sabemos el comportamiento eléctrico de las mismas, ni si son inyectables en las ranuras, por lo tanto van a ser las seleccionadas para su estudio.

Se comenzará por un análisis de la composición y principales propiedades para finalizar con un estudio más a fondo con los programas informáticos anteriormente citados (ANSYS RMXprt y ANSYS Maxwell)

#### ***2.1.4.1 Composición química de las aleaciones (% masa)***

A continuación se muestran las tablas de composición química en las que se encuentran las dos aleaciones que se van a estudiar.

Grupo de aleaciones	Designación de la aleación		Composición química en % de masa																
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Otros <sup>1)</sup>		Aluminio			
														Cada	Total		Resto	Resto	
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Ti	0,20 (0,15)	0,35 (0,30)	4,2 a 5,0 (0,30)	0,10	0,15 a 0,35 (0,20 a 0,35)	-	0,05	0,05	0,05	0,15 a 0,30 (0,15 a 0,25)	0,03	0,10	Resto				
	EN AC-21100	EN AC-Al <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> Ti	0,18 (0,15)	0,19 (0,15)	4,2 a 5,2 (0,15)	0,55	-	-	0,07	-	-	0,15 a 0,30 (0,15 a 0,25)	0,03	0,10	Resto				
	EN AC-41000	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Ti	1,6 a 2,4 (0,50)	0,60 (0,50)	0,10 (0,08)	0,30 - 0,50 (0,08)	0,45 a 0,95 (0,50 a 0,65)	-	0,05	0,10	0,05	0,05 a 0,20 (0,07 a 0,15)	0,05	0,15	Resto				
AlSi7Mg	EN AC-42000	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg	6,5 a 7,5 (0,45)	0,55 (0,45)	0,20 (0,15)	0,35	0,20 a 0,65 (0,25 a 0,65)	-	0,15	0,15	0,15	0,05 a 0,25 (0,05 a 0,20)	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-42100	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Cu	6,5 a 7,5 (0,15)	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25 a 0,45 (0,30 a 0,45)	-	-	0,07	-	0,08 a 0,25 (0,10 a 0,15)	0,03	0,10	Resto				
	EN AC-42200	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Cu	6,5 a 7,5 (0,15)	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,45 a 0,70 (0,50 a 0,70)	-	-	0,07	-	0,08 a 0,25 (0,10 a 0,15)	0,03	0,10	Resto				
AlSi10Mg	EN AC-43000	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Cu	9,0 a 11,0 (0,40)	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	0,20 a 0,45 (0,25 a 0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,15	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-43100	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Cu	9,0 a 11,0 (0,45)	0,55 (0,45)	0,10 (0,08)	0,45	0,20 a 0,45 (0,25 a 0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,15	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-43200	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Cu	9,0 a 11,0 (0,55)	0,65 (0,55)	0,35 (0,30)	0,55	0,20 a 0,45 (0,25 a 0,45)	-	0,15	0,35	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto				
AlSi	EN AC-43300	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg	9,0 a 10,0 (0,15)	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25 a 0,45 (0,30 a 0,45)	-	-	0,07	-	0,15	0,03	0,10	Resto				
	EN AC-43400	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Fe	9,0 a 11,0 (0,45 a 0,9)	1,0 (0,45 a 0,9)	0,10 (0,08)	0,55	0,20 a 0,50 (0,25 a 0,50)	-	0,15	0,15	0,15	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-44000	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>	10,0 a 11,8 (0,15)	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,45	-	-	0,07	-	0,15	0,03	0,10	Resto				
AlSi5Cu	EN AC-44100	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu	10,5 a 13,5 (0,55)	0,65 (0,55)	0,15 (0,10)	0,55	0,10	-	0,10	0,15	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-44200	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu	10,5 a 13,5 (0,40)	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,35	-	-	0,10	-	-	0,15	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-44300	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu	10,5 a 13,5 (0,45 a 0,9)	1,0 (0,45 a 0,9)	0,10 (0,08)	0,55	-	-	0,15	-	-	0,15	0,05	0,25	Resto				
AlSi5Cu	EN AC-44400	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu	8,0 a 11,0 (0,55)	0,65 (0,55)	0,10 (0,08)	0,50	0,10	-	0,05	0,15	0,05	0,15	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-45000	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> Fe	5,0 a 7,0 (0,9)	1,0 (0,9)	3,0 a 5,0 (0,9)	0,20 a 0,65	0,55	0,15	0,45	2,0	0,30	0,25 (0,20)	0,05	0,35	Resto				
	EN AC-45100	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> Mg	4,5 a 6,0 (0,50)	0,60 (0,50)	2,9 a 3,6 (0,50)	0,55	0,15 a 0,45 (0,20 a 0,45)	-	0,10	0,20	0,10	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Resto				
AlSi5Cu	EN AC-45200	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> Mn	4,5 a 6,0 (0,7)	0,8 (0,7)	2,5 a 4,0 (0,7)	0,20 a 0,55	0,40	-	0,30	0,55	0,20	0,20 (0,15)	0,05	0,25	Resto				
	EN AC-45300	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> Mg	4,5 a 5,5 (0,55)	0,65 (0,55)	1,0 a 1,5 (0,55)	0,55	0,35 a 0,65 (0,40 a 0,65)	-	0,25	0,15	0,15	0,05 a 0,25 (0,05 a 0,20)	0,05	0,15	Resto				
	EN AC-45400	EN AC-Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub>	4,5 a 6,0 (0,50)	0,60 (0,50)	2,5 a 3,5 (0,50)	0,55	0,05	-	0,10	0,20	0,10	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Resto				

Tabla 3.- Composición de las aleaciones



Grupo de aleaciones	Designación de la aleación		Composición química en % de masa													
	Numérica	Simbólica	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Oxos <sup>1)</sup>		
														Cada	Total	Aluminio
AlSiCu	EN AC-46000	EN AC-Al Si6Cu3(Fe)	8,0 a 11,0	1,3 (0,6 a 1,1)	2,0 a 4,0	0,55	0,05 a 0,55 (0,15 a 0,55)	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Resto
	EN AC-46100	EN AC-Al Si11Cu2(Fe)	10,0 a 12,0	1,1 (0,45 a 1,0)	1,5 a 2,5	0,55	0,30	0,15	0,45	1,7	0,25	0,25	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Resto
	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	7,5 a 9,5	0,8 (0,7)	2,0 a 3,5	0,15 a 0,65 (0,15 a 0,55)	0,05 a 0,55 (0,15 a 0,55)	-	0,35	1,2	0,25	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Resto
	EN AC-46300	EN AC-Al Si7Cu3Mg	0,5 a 8,0	0,8 (0,7)	3,0 a 4,0	0,20 a 0,65	0,30 a 0,60 (0,35 a 0,60)	-	0,30	0,65	0,15	0,10	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Resto
	EN AC-46400	EN AC-Al Si9Cu1Mg	6,3 a 9,7	0,8 (0,7)	0,8 a 1,3	0,15 a 0,55	0,25 a 0,65 (0,30 a 0,65)	-	0,20	0,8	0,10	0,10	0,10 a 0,20 (0,10 a 0,18)	0,05	0,25	Resto
AlSi(Cu)	EN AC-46500	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)Zn	8,0 a 11,0	1,3 (0,6 a 1,2)	2,0 a 4,0	0,55	0,05 a 0,55 (0,15 a 0,55)	0,15	0,55	3,0	0,35	0,25	0,25 (0,20)	0,05	0,25	Resto
	EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2	6,0 a 8,0	0,8 (0,7)	1,5 a 2,5	0,15 a 0,65	0,35	-	0,35	1,0	0,25	0,15	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Resto
	EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	10,5 a 13,5	0,8 (0,7)	1,0 (0,9)	0,05 a 0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,25	Resto
	EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu1(Fe)	10,5 a 13,5	1,3 (0,6 a 1,1)	0,7 a 1,2	0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,25	Resto
	EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNMg	10,5 a 13,5	0,7 (0,6)	0,8 a 1,5	0,35	0,8 a 1,5 (0,9 a 1,5)	-	0,7 a 1,3	0,35	-	-	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Resto
AlMg	EN AC-51000	EN AC-Al Mg3(Al)	0,55 (0,45)	0,55 (0,45)	0,10 (0,08)	0,45	2,5 a 3,5 (2,7 a 3,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto
	EN AC-51100	EN AC-Al Mg3(Al)	0,55 (0,45)	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	2,5 a 3,5 (2,7 a 3,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto
	EN AC-51200	EN AC-Al Mg9	2,5 (0,45 a 0,9)	1,0 (0,45 a 0,9)	0,10 (0,08)	0,55	8,0 a 10,5 (8,5 a 10,5)	-	0,10	0,25	0,10	0,10	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto
	EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	0,55 (0,35)	0,55 (0,45)	0,10 (0,08)	0,45	4,5 a 6,5 (4,8 a 6,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto
	EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)	1,5 (1,3)	0,55 (0,45)	0,05 (0,03)	0,45	4,5 a 6,5 (4,8 a 6,5)	-	-	0,10	-	-	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Resto
AlZnMg	EN AC-71000	EN AC-Al Zn5Mg	0,30 (0,25)	0,80 (0,70)	0,15 a 0,35	0,40	0,40 a 0,70 (0,45 a 0,70)	0,15 a 0,60	0,05	4,50 a 6,00	0,05	0,05	0,10 a 0,25 (0,12 a 0,20)	0,05	0,15	Resto

Tabla4.- Composición de las aleaciones

### ***2.1.4.2 Comparación de características de moldeo, mecánicas y otras propiedades***

En este apartado se muestran las diferentes características de moldeo, mecánicas y otras propiedades de las aleaciones estudiadas en una tabla cuya leyenda es la siguiente:

<b><i>Leyenda</i></b>	
•	<i>Indica el proceso de moldeo más utilizado para cada aleación</i>
<i>A</i>	<i>Excelente</i>
<i>B</i>	<i>Bueno</i>
<i>C</i>	<i>Regular</i>
<i>D</i>	<i>Malo</i>
<i>E</i>	<i>No recomendable</i>
<i>F</i>	<i>inapropiado</i>

Grupo de aleaciones	Designación de la aleación		Método de moldeo			Moldabilidad		Otras propiedades							Características mecánicas <sup>4)</sup>							
	Numerica	Simbólica	Areña	Copialfa	A presión	De precisión (a la cera perdida)	Fluidez	Resistencia a la agrietación en caliente	Estanquidad	Bruto de tratamiento	Después del término	Resistencia a la corrosión	Anodizado decorativo	Soldabilidad <sup>5)</sup>	Capacidad al pulido	Coefficiente de dilatación 0-400 20x10 <sup>-6</sup>	Conductividad eléctrica 20°C	Conductividad térmica 1000 K	Resistencia a la temperatura elevada hasta 300°C	Resistencia a la fatiga 300°C	Densidad relativa al cobre	Resistencia a la fatiga MPa
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu-4MgTi	*	*			C	D	D	A	D	C	D	B	23	16 a 23	120 a 150	A	B	A	7,8	80 a 110
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu-4Ti	*	*			C	D	D	A	D	C	D	B	23	16 a 23	120 a 150	A	B	A	7,8	80 a 110
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si-2MgTi	*	*			C	C	C	B	B	B	B	B	23	19 a 25	140 a 160	B		B	7,8	-
	EN AC-42000	EN AC-Al Si-7Mg	*	*		*	B	A	B	B/C	B	D	B	C	22	19 a 25	150 a 170	B	C	C	7,8	80 a 110
AlSi7Mg	EN AC-42100	EN AC-Al Si-7Mg0,3	*	*		*	B	A	B	B	B	D	B	C	22	21 a 27	160 a 180	A	C	A	7,8	80 a 110
	EN AC-42200	EN AC-Al Si-7Mg0,5	*	*		*	B	A	B	B	B	D	B	C	22	20 a 26	150 a 180	A	C	A	7,8	80 a 110
AlSi10Mg	EN AC-43000	EN AC-Al Si-10Mg	*	*			A	A	B	B/C	B	E	A	D	21	19 a 25	150 a 170	B	C	C	7,8	80 a 110
	EN AC-43100	EN AC-Al Si-10Mg(b)	*	*			A	A	B	B/C	B	E	A	D	21	18 a 25	140 a 170	B	C	C	7,8	80 a 110
AlSi10Mg	EN AC-43200	EN AC-Al Si-10Mg(Cu)	*	*			A	A	B	B/C	B	E	A	C	21	16 a 24	130 a 170	B	C	C	7,8	80 a 110
	EN AC-43300	EN AC-Al Si-9Mg	*	*			A	A	B	B/C	B	E	A	D	21	20 a 25	150 a 180	A	C	A	7,8	80 a 110
EN AC-43400	EN AC-Al Si-10Mg(Fe)			*		A	A	C	B		C	E	D	21	16 a 21	130 a 150	B	C	C	7,8	60 a 90	

Tabla5.- Propiedades de las aleaciones



Grupo de aleaciones	Designación de la aleación		Método de moldeo			Moldabilidad			Otras propiedades							Características mecánicas <sup>1)</sup>					
	Numérica	Simbólica	Cavilla	A presión	De precisión (a la cera perdida)	Fusión	Relación a la aptitud de la calidad es calate	Estabilidad	Maquinabilidad		Resistencia a la corrosión	Amortiguación de vibraciones	Soldabilidad	Aplicación al pulido	Coeficiente de dilatación (0-100) 20-270K	Conductividad eléctrica (20°C)	Conductividad térmica (20°C)	Resistencia a la temperatura ambiente	Resistencia a la temperatura elevada hasta 200°C	Resistencia a la fatiga (MPa)	
									Ruido de trazo de moldes	Después del tratamiento térmico											
AlSi9Cu	EN AC-46300	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)		*		E	B	C	B	-	D	E	F	C	21	13 a 17	110 a 120	B	B	D	66 a 90
	EN AC-46100	EN AC-Al Si11Cu2(Fe)		*		A	B	C	C	-	D	E	F	C	20	14 a 18	120 a 130	B	B	D	66 a 90
	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	*	*		B	B	B <sup>2)</sup>	B	-	D	E	B	C	21	14 a 18	110 a 130	B	A	C	66 a 90
	EN AC-46300	EN AC-Al Si7Cu3Mg		*		B	B	B	C	-	C	E	B	C	21	14 a 17	110 a 120	D	A	C	66 a 90
AlSi9Cu	EN AC-46400	EN AC-Al Si6Cu1Mg	*	*		B	B	B	B	B	D	E	B	D	21	16 a 22	130 a 150	A	B	C	66 a 90
	EN AC-46500	EN AC-Al Si9Cu3 (Fe)(Zn)		*		B	B	B	B	-	D	E	F	C	21	13 a 17	110 a 120	B	A	D	66 a 90
AlSi(Cu)	EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2	*	*		B	B	B	B	-	D	E	C	C	21	15 a 19	120 a 130	D	B	C	50 a 70
	EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	*	*		A	A	A	C	-	C	E	A	C	20	16 a 22	130 a 150	D	B	C	60 a 90
AlSiCu NiMg	EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu1(Fe)		*		A	A	C	C	-	C	E	F	C	20	15 a 20	120 a 150	B	B	C	60 a 90
	EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg	*	*		A	A	A	-	B	C	E	A	C	20	15 a 23	130 a 160	A	A	D	80 a 110

Tabla6.- Propiedades de las aleaciones

## 2.2 RESULTADOS

Según estas dos últimas tablas (extraídas de la norma UNE-EN 1706) ambas aleaciones, en un principio, no pueden ser moldeables a presión, es decir inyectadas por lo tanto no nos servirían.

En las tablas se muestran las conductividades de las aleaciones a temperatura ambiente, por lo que tendremos que aplicar la fórmula correspondiente para obtener la conductividad a 75°C. Para ello pasamos MSiemens/m a Siemens/m dando lugar a unas conductividades de  $2e^7$  y  $1,5e^7$  respectivamente.

### *Aleación 1 ( L-2653T6)*

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{2 e^7} = 5e^{-8}$$

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha(t - 20 \text{ °C}))$$

$$\rho_{75} = 5e^{-8} (1 + 3,9e^{-3} (75-20)) = 6,07 e^{-8} \text{ ohm*m}$$

$$\sigma_{75} = \frac{1}{6.07 e^{-8}} = 1,65e^7 \text{ Siemens/m}$$

### *Aleación 2 ( L-2551)*

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{1,5 e^7} = 6,66e^{-8}$$

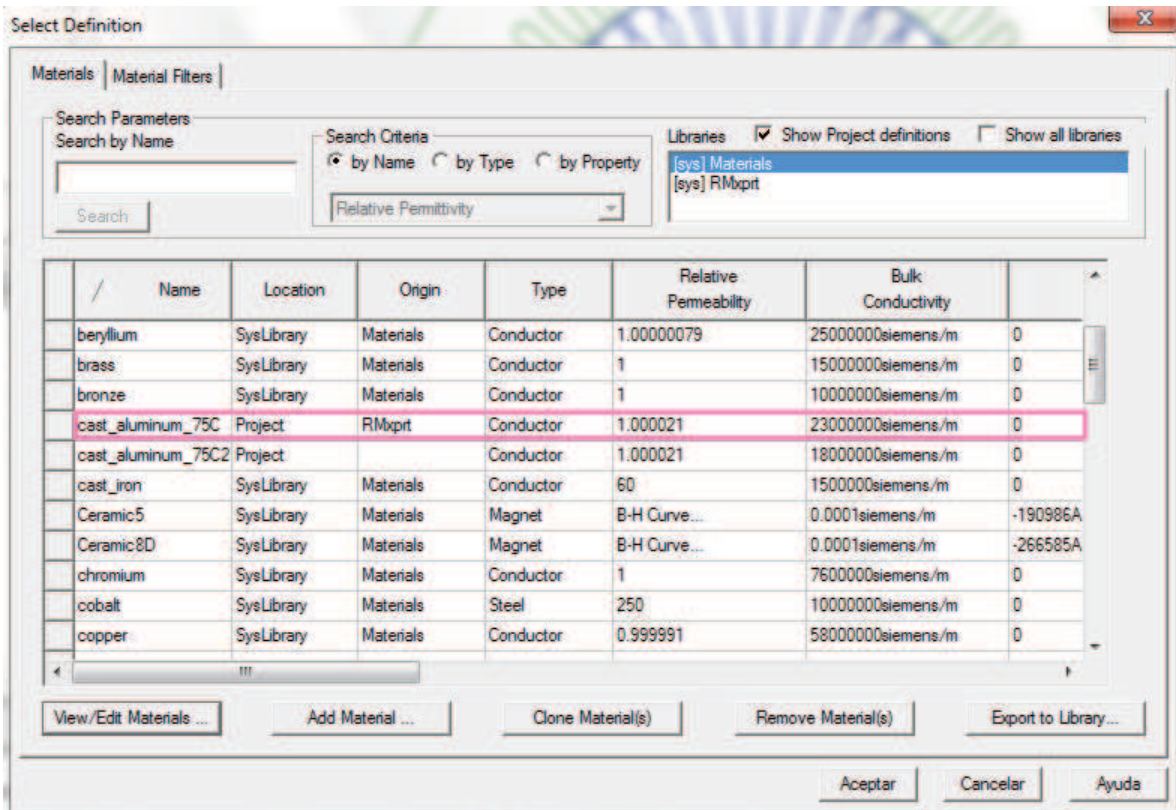
$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha(t - 20 \text{ °C}))$$

$$\rho_{75} = 6,66e^{-8} (1 + 3,9e^{-3} (75-20)) = 8,08 e^{-8} \text{ ohm*m}$$

$$\sigma_{75} = \frac{1}{8,08 e^{-8}} = 1,23e^7 \text{ Siemens/m}$$

Una vez obtenida las conductividades de ambas aleaciones vamos a proceder a introducir los datos del aluminio y de las dos aleaciones en el programa Ansys RMxprt y estudiar las gráficas de la conductividad en función de otras características del motor como son la eficiencia del motor, el par de arranque, la corriente de arranque y el factor de potencia.

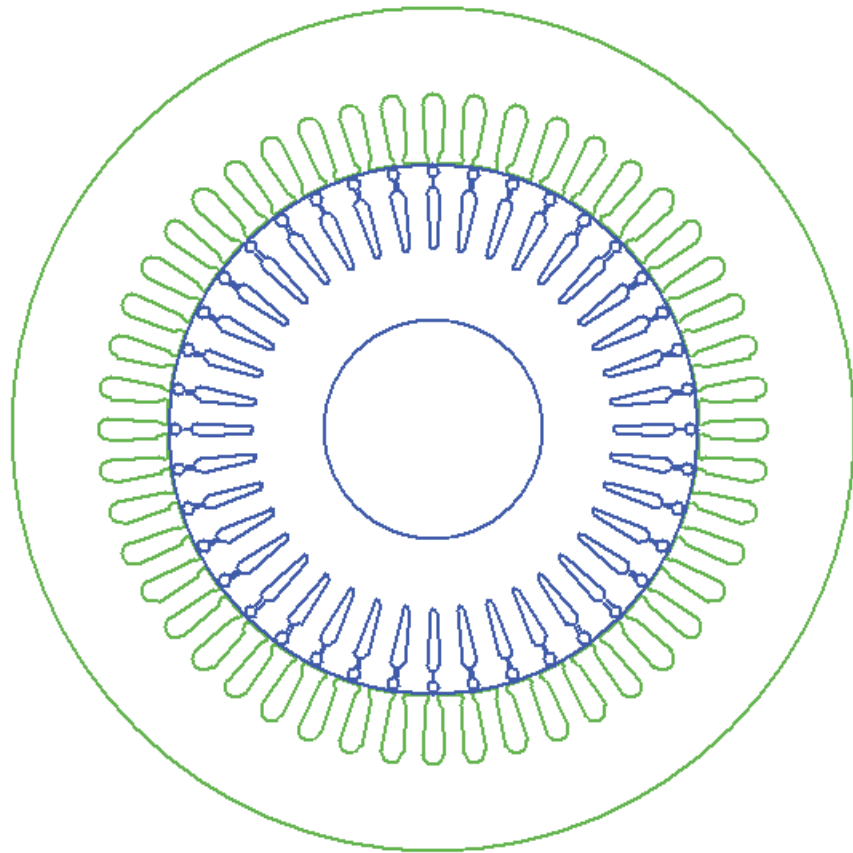
Para obtener el aluminio a 75°C no nos hace falta realizar ningún cálculo ya que los datos nos los puede proporcionar el mismo programa informático, en su particular biblioteca.



**Fotografía8.- Imagen de la biblioteca Ansys RMxpri**

El motor que utilizamos en el programa es un motor de 55 kW 4 polos (gira a unas 1500 revoluciones por minuto). El motor es normal (no está al revés como el que queremos hacer). De cara al estudio de ver qué pasa con las variables eléctricas, no importa que sea de rotor interno o externo.

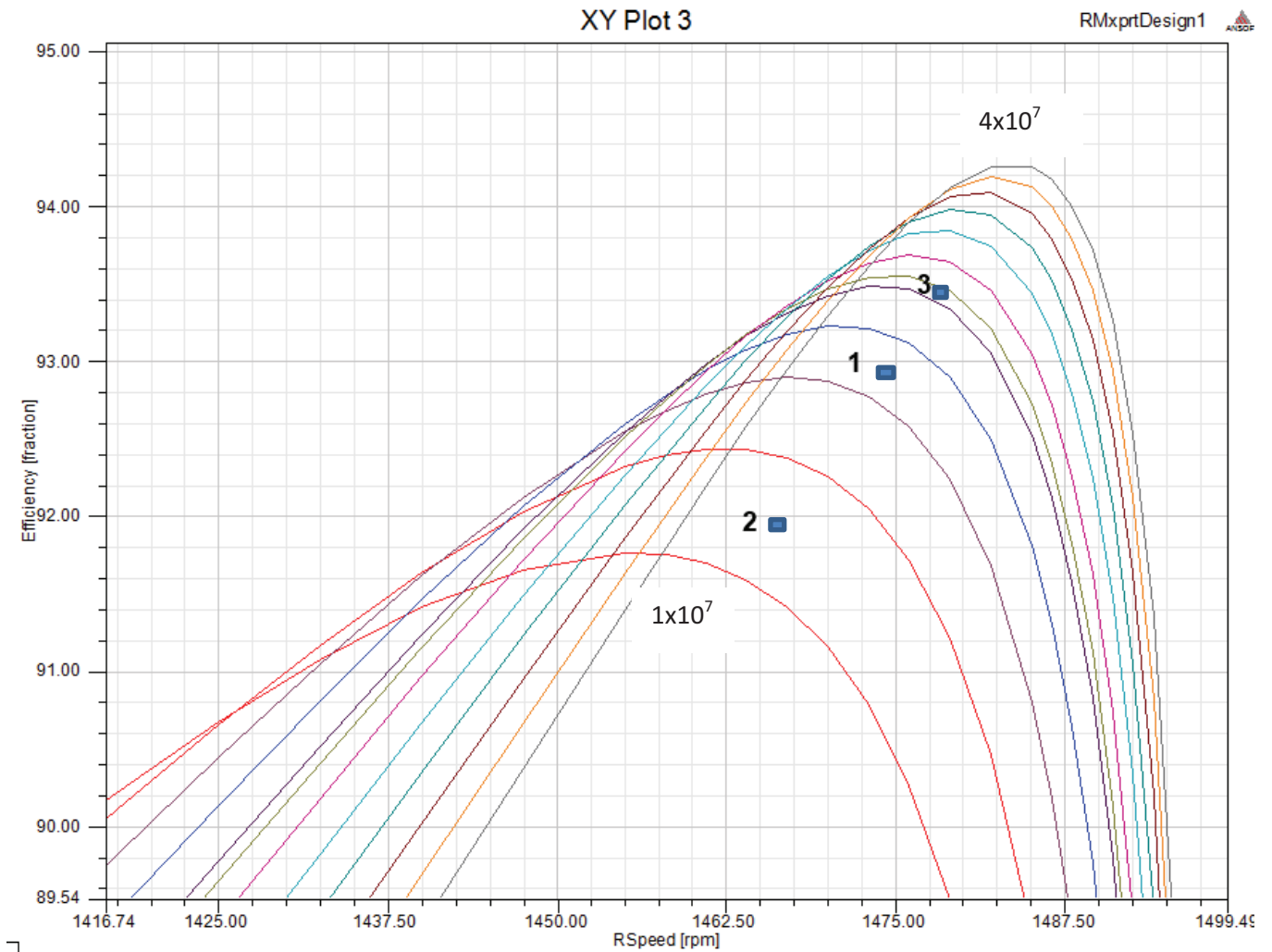





RSpeed [rpm]

**Figura9.- Imagen de la biblioteca Ansys RMxprt**

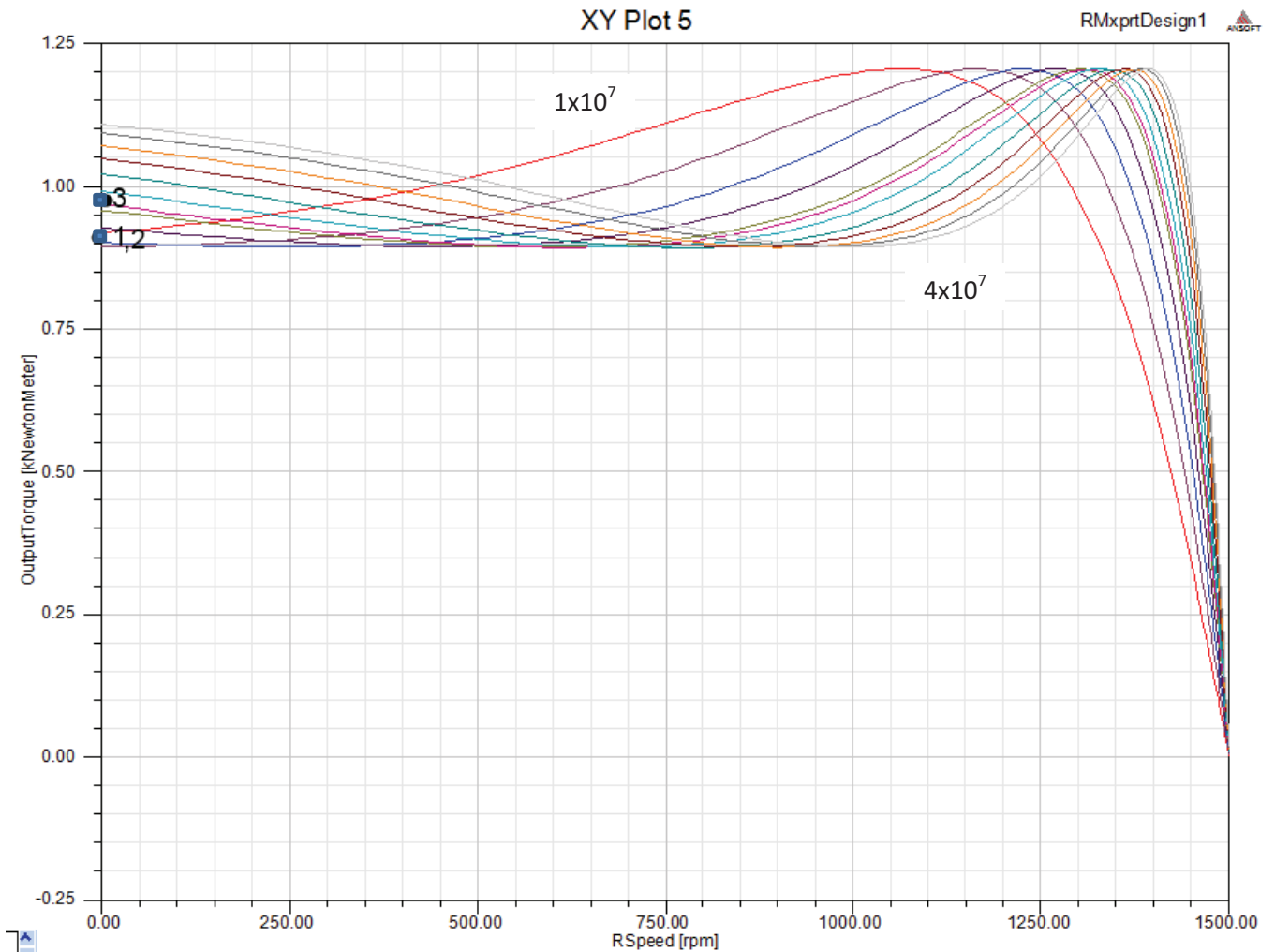
## 2.2.1 Eficiencia vs velocidad del motor




	$\sigma$ (siemens/m)	Eficiencia motor (%)
1. Aleación 2653T6	$1,65 \times 10^7$	92,9
2. Aleación 2551	$1,23 \times 10^7$	92,1
3. Aluminio	$2,3 \times 10^7$	93,5

En esta primera comparación el resultado nos demuestra que la eficiencia del motor se reduce entre un (0,6-1,4%).

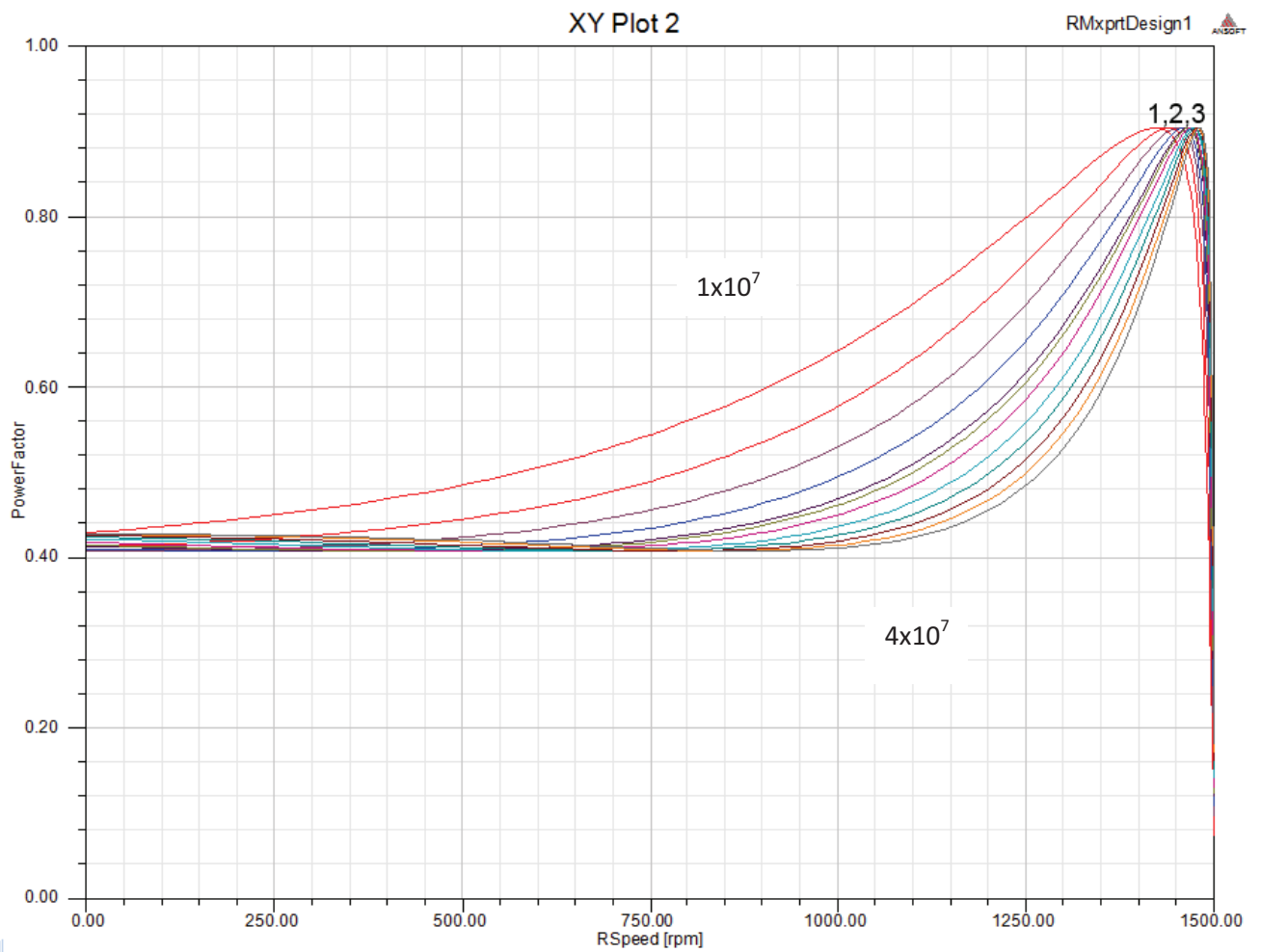
### 2.2.2 Par de arranque vs velocidad del motor



	$\sigma$ (siemens/m)	Par arranque (N*m)
1. Aleación 2653T6	$1,65 \times 10^7$	0,95
2. Aleación 2551	$1,23 \times 10^7$	0,95
3. Aluminio	$2,3 \times 10^7$	0,97

En ésta segunda comparación se observa que el par de arranque en el caso de las aleaciones prácticamente coincide y el aluminio tiene un par mayor, por lo tanto a mayor conductividad mayor será el par de arranque.

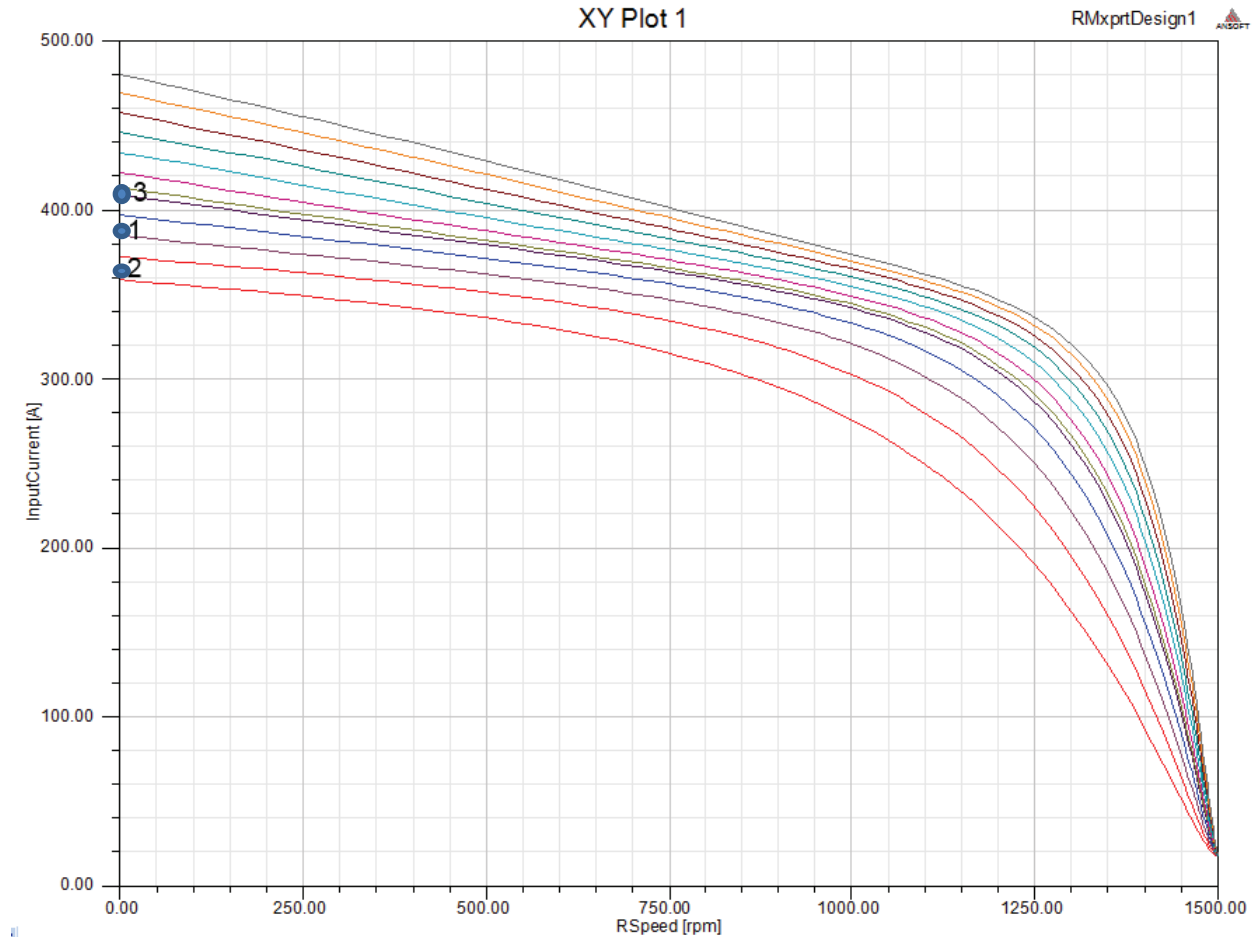
### 2.2.3 Factor de potencia vs velocidad del motor




	$\sigma$ (siemens/m)	Factor de potencia
1. Aleación 2653T6	$1,65 \times 10^7$	0,85
2. Aleación 2551	$1,23 \times 10^7$	0,85
3. Aluminio	$2,3 \times 10^7$	0,85

En ésta gráfica para una velocidad nominal del motor ambos materiales tienen un mismo factor de potencia debido a que éste depende del cobre el cual no ha sido cambiado

## 2.2.4 Corriente de arranque vs velocidad del motor



	$\sigma$ (siemens/m)	Corriente de arranque (A)
1. Aleación 2653T6	$1,65 \times 10^7$	390
2. Aleación 2551	$1,23 \times 10^7$	365
3. Aluminio	$2,3 \times 10^7$	410

En la última gráfica que vamos a analizar, se observa que la corriente de arranque es más alta en los materiales de más conductividad y más baja, por el contrario en los materiales de menos conductividad. En ésta ocasión sería positivo un consumo menor de corriente de arranque.

## 2.2.5 Resultados con Maxwell

En los cálculos desarrollados se ha utilizado el programa Ansys RMxpt. El programa Ansys Maxwell puede aportar cálculos más precisos para analizar en detalle los resultados en un determinado punto de funcionamiento. Un estudio más completo requeriría el cálculo de pérdidas, inducción, etc. por el método de elementos finitos, con el objetivo de obtener resultados más fiables y optimizar el rendimiento del motor.

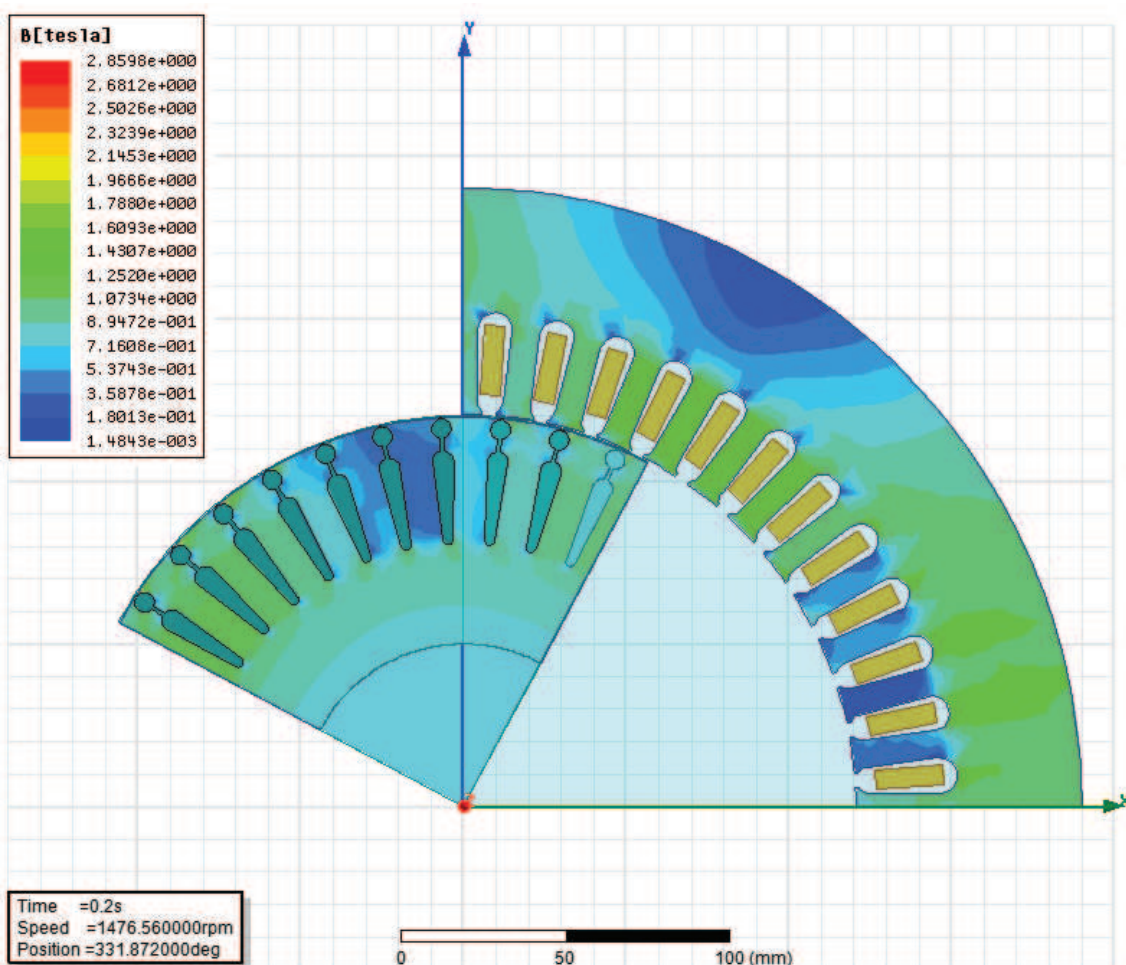


Figura10.- Imagen del motor con el programa Ansys Maxwell



# CAPÍTULO III: Conclusiones

## 3.1 CONCLUSIONES

Se ha estudiado la posibilidad de emplear las aleaciones de aluminio utilizadas actualmente en la fabricación de los álabes de Zitrón para la inyección de material en la jaula de ardilla de un motor de rotor externo. Los tres puntos principales de análisis han sido la conductividad eléctrica del material, la resistencia a temperaturas elevadas y el moldeo por inyección.

Según la norma española UNE-EN 1706 las aleaciones L 2551 y L 2653 T6 no pueden ser moldeadas por inyección. Sería conveniente consultar con fabricantes para corroborar estos datos o encontrar aleaciones similares.

La presencia de silicio en las aleaciones (entre 10,5 -13,5 % para la aleación L 2551 y entre 6,5-7,5 % para la aleación L 2653 T6) hace que éstas adquieran unas propiedades térmicas mejoradas teniendo la posibilidad de aguantar ambientes externos de temperaturas en torno a los 400°C. Esta condición es necesaria para evitar deformaciones por temperatura en los anillos de la jaula de ardilla que den lugar a fallo en el motor.

El efecto de la variación de la conductividad eléctrica en el material del rotor del motor es la propiedad que se ha podido estudiar en detalle gracias a las herramientas RMxpert y Maxwell.

En la aleación L2551 la conductividad eléctrica se ve reducida casi al 50 % dando lugar a una disminución del rendimiento motor muy significativa.

En la aleación L 2653 T6 la conductividad eléctrica disminuye en torno al 25%, dando lugar a una disminución en el rendimiento del motor menor que en el caso de la aleación L2551. Sería valorable intentar incrementar el rendimiento del motor con otros métodos (aumento de cobre o chapa magnética) con el fin de mantener el rendimiento del conjunto.

Se han encontrado tres aleaciones de aluminio que podrían ser apropiadas para su empleo en el rotor gracias a las características que presentan:

Nomenclatura	$\sigma$ (MS/m)	%Si	Moldeo por inyección
44300	16-22	10,5-13,5	•
44400	16-22	8-11	•
51100	17-22	0,55	•

Las tres aleaciones pueden ser moldeadas por inyección. La aleación 51100 presenta un contenido en silicio demasiado bajo mientras que el porcentaje presente en la aleación 44300 podría ser demasiado elevado. Sería razonable un estudio detallado de la aleación 44400.

## **3.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

El siguiente paso que podríamos llevar a cabo en futuras investigaciones sería hablar con fabricantes sobre las aleaciones de aluminio que disponen, su comportamiento térmico y la posibilidad de inyectarlas.

De esta manera, dentro de las posibilidades que el fabricante nos ofreciera tomaríamos la decisión de seguir utilizando el aluminio común o dar el gran salto y cambiar a utilizar una de esas aleaciones.

# CAPÍTULO IV: Bibliografía

---

## 4.1 BIBLIOGRAFÍA

- “Alluminum alloy castings” J. Gilbert Kaufen, Elwin L. Rooy
- “Norma española UNE-EN 1706”
- Metals Handbooks, ASM International, 10ª Edición.
- Llewellyn D.T. Hudd R.C., Steels. Metallurgy and applications, Butterworth Heinemann, 2000.
- <http://aluminio.org/?p=821>
- [http://perso.wanadoo.es/danieldiaz\\_borr/rotor%20jaula%20de%20ardilla.htm](http://perso.wanadoo.es/danieldiaz_borr/rotor%20jaula%20de%20ardilla.htm)
- <http://www.alu-stock.es/catalogo/pdf/libro/Alu-Stock-LA4-11-Aleaciones.pdf>
- <http://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>
- <http://solysol.com.es/data/documents/soldadura=20aluminio.doc.pdf>
- <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Electromechanical+Design/ANSYS+Maxwell>
- <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Electromechanical+Design/ANSYS+RMxpvt>
- Empresa Zitron