

## 6. MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

### 1.1 Precedentes

La utilización de motores eléctricos de alta eficiencia presenta un potencial de ahorro de mil millones de euros. A continuación se presenta un resumen de cifras que muestran el orden de magnitud de este potencial de ahorro.

El total de la energía producida anual en el Estado Español asciende a unos 239 TWh (SERCOBE) de los cuales el 42,5% se corresponden al consumo industrial que significa 101,6 TWh. Pero no todo el consumo industrial es de energía eléctrica, de este subtotal el 66,6% será el consumo de los accionamientos eléctricos, valor que significa 67,6 TWh.

El conjunto de los accionamientos eléctricos están formados por:

- Motor eléctrico
- Motor eléctrico con reductor
- Motor eléctrico alimentado con convertidor de frecuencia (También llamado variador de velocidad)

En la Comunidad Europea hay países como en Alemania donde esta cifra de consumo es mucho mayor. Por ejemplo según datos de la asociación de fabricantes alemanes (ZVEI) del año 2004, se produjeron 3.200.000 unidades de motores industriales de los cuales 500.000 unidades estarían previstas para ser accionadas con convertidores de frecuencia. Una gran parte de los motores producidos se aplican en sustitución de motores averiados, pero en ningún caso la cifra de motores instalados disminuye, se tienen censados de unos 25 a 30 millones de motores instalados. En una gran planta química se pueden encontrar hasta unos 300.000 motores eléctricos de diversos tamaños.

En la figura 1 se presenta la distribución del consumo eléctrico entre los diferentes tipos de accionamientos eléctricos.

El rendimiento en los motores Standard se puede mejorar hasta el 8 % en motores de 1kW y hasta 1,5 % en los motores hasta 100 kW. Estas medidas son válidas en la mitad de los motores instalados con un valor de mejora medio que aumenta el rendimiento un 4 % sobre 34 TWh, resultando un ahorro de potencia de 1,36 TWh.

De los 67,6 TWh es posible un ahorro energético mediante el uso de convertidor de frecuencia del 35 % de la potencia consumida que representa 23,5 TWh. Al poder regular la velocidad, este valor de 23,5 TWh se reduciría al 40%, que equivale a un consumo anual de 9,4TWh , presentando un ahorro de 14,1TWh. Este valor sumado con el ahorro anterior por mejora directa del rendimiento suma 15,46 TWh anuales. En unidad monetaria, significaría un ahorro de 1.100 millones de Euros al tomar como referencia un precio de 0,0712380 Eur/kWh.

El ahorro energético no sólo significa disminuir el gasto de un país sino que hay una relación directa con el impacto medioambiental que se produce.

Considerando que para generar 1kWh se producen 0,59kg de CO<sub>2</sub>, el ahorro en la emisión de CO<sub>2</sub> significaría algo más de 9 millones de toneladas.

[ 1 ] En la UE (25) se estima un potencial de ahorro de 200 TWh que equivalen a una disminución de 118 millones de toneladas de emisión de CO<sub>2</sub>, lo que supone un 25% del compromiso de reducción de Kyoto.

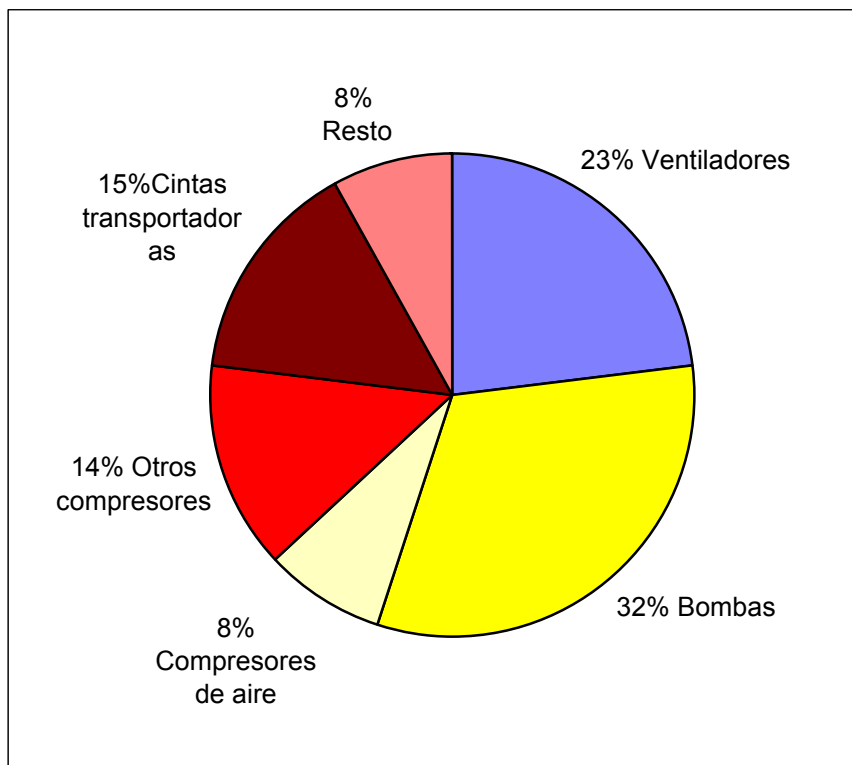


Figura 1 Distribución consumo energético en los diferentes accionamientos

## 2.1 Políticas Energéticas

Bajo este potencial de ahorro y mejora del medio ambiente los diferentes países del mundo han desarrollado políticas energéticas para incentivar el uso de motores eléctricos de elevado rendimiento. Con intención de poder entender su evolución y ayudar al consumidor o al fabricante de maquinaria, se presenta a continuación el modelo Europeo y, comparativamente también, el modelo americano que fue uno de los pioneros.

### EEUU

En los Estados Unidos de Norte América el DOE "Department of Energy" promulga la Ley EPact (Energy Policy Act 1992) que obliga a partir del 24 de Octubre del 1997 que los motores (1-200hp) que se comercialicen en este país sean según NEMA o Métricos, cumplan con un rendimiento mínimo dependiendo de la potencia, la polaridad y el tipo de protección (IP).

Los motores eléctricos están normalizados en América según la Norma NEMA MG1 (National Electrical Manufacturers Association).



**Figura 2 Logotipo indicativo de los motores de alto rendimiento que cumplen con EEAct y EPAct verificados por UL (Underwriters Laboratories Inc. )**

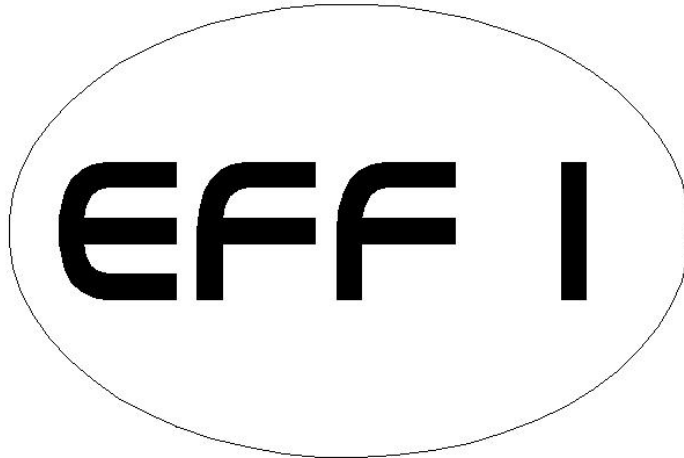
### **Canadá**

En Canadá también se promulga una ley similar a los EEUU, llamada EEAct (Energy Efficiency Act 1992)

Los motores eléctricos (1-200hp) que se comercializan en Canadá habrán de cumplir con la CSA 390-93, y los valores de rendimiento mínimo que han de cumplir dependerán, al igual que en el caso anterior, de la potencia, la polaridad y el grado de protección.

### **Comunidad Europea**

En la comunidad Europea los fabricantes de motores, conjuntamente con la Dirección General de la Energía DGXVII, firman un acuerdo voluntario donde se comprometen a fabricar solamente motores de rendimiento mejorado y alto rendimiento. Este acuerdo voluntario entró en vigor en el año 2000 y su ámbito de aplicación será el de motores normalizados IEC 60034, con potencias comprendidas entre 1,1-90kW para 2 y 4 polos con tensión asignada 400V 50Hz. En este acuerdo se clasifican los motores en tres categorías de rendimiento eff1 (Alto Rendimiento), eff2 (Rendimiento Mejorado) y eff3 (Bajo Rendimiento) y dentro de estas categorías se indican de forma tabulada los valores nominales de rendimiento que en función de la polaridad y del tamaño IEC del motor han de cumplir (figura 4, tabla 2). El rendimiento de estos motores se verificará según la Norma EN-IEC 60034-2 vigente. Los fabricantes de motores que han firmado el acuerdo, marcan sus motores en la placa característica con el logotipo registrado mostrado en la figura 3. Estos fabricantes aportan con su experiencia, sistema de calidad e instalaciones de ensayo una seguridad en el cumplimiento de los valores de rendimiento declarados. Esta fórmula permite distinguir los motores de alto rendimiento de los del resto de los motores sin clasificar.



**Figura 3** Logotipo indicativo de los motores de alto rendimiento que cumplen con el Acuerdo Voluntario Europeo

Los valores presentados en la tabla 1 resultaron de la puesta en común de los rendimientos que podrían ofrecer los fabricantes en el estado actual de la técnica y sin encarecer excesivamente el producto.

**Tabla 1** Definición de las diferentes clases de rendimientos Acuerdo Voluntario Europeo

kW	4 polos			2 polos		
	eff3 < $\eta_N$	eff2 $\geq\eta_N$	eff1 $\geq\eta_N$	eff3 < $\eta_N$	eff2 $\geq\eta_N$	eff1 $\geq\eta_N$
1,1	76,2	76,2	83,8	76,2	76,2	82,8
1,5	78,5	78,5	85	78,5	78,5	84,1
2,2	81	81	86,4	81	81	85,6
3	82,6	82,6	87,4	82,6	82,6	86,7
4	84,2	84,2	88,3	84,2	84,2	87,6
5,5	85,7	85,7	89,2	85,7	85,7	88,6
7,5	87	87	90,1	87	87	89,5
11	88,4	88,4	91	88,4	88,4	90,5
15	89,4	89,4	91,8	89,4	89,4	91,3
18,5	90	90	92,2	90	90	91,8
22	90,5	90,5	92,6	90,5	90,5	92,2
30	91,4	91,4	93,2	91,4	91,4	92,9
37	92	92	93,6	92	92	93,3
45	92,5	92,5	93,9	92,5	92,5	93,7
55	93	93	94,2	93	93	94
75	93,6	93,6	94,7	93,6	93,6	94,6
90	93,9	93,9	95	93,9	93,9	95

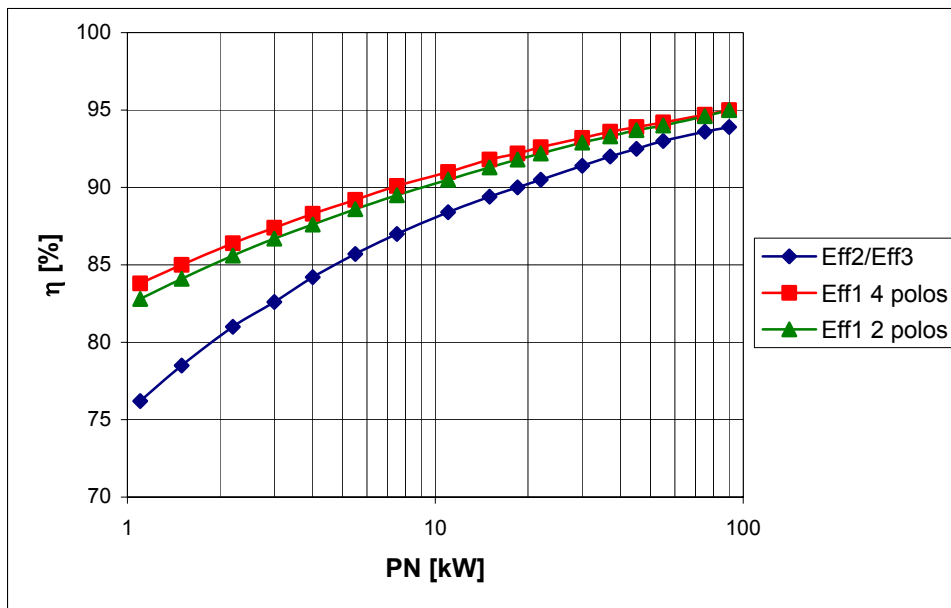


Figura 4 Potencia asignada en función del rendimiento

### 3.1 Métodos de ensayo en la determinación del rendimiento

Aunque la fórmula que rige la determinación del rendimiento de un motor eléctrico es el cociente de la potencia cedida en el eje P2 y la potencia absorbida de la red P1 expresado en %, el valor del rendimiento obtenido, puede divergir en función de la normativa que se utilice. Como las políticas energéticas utilizan diferentes Normas de medida del rendimiento, los valores obtenidos para un mismo motor dependerán de la Norma que se haya utilizado.

### 4.1 Selección del motor de alta eficiencia

A continuación se presentan 4 reglas que han de llevar al éxito en el diseño y la explotación de accionamientos eficientes:

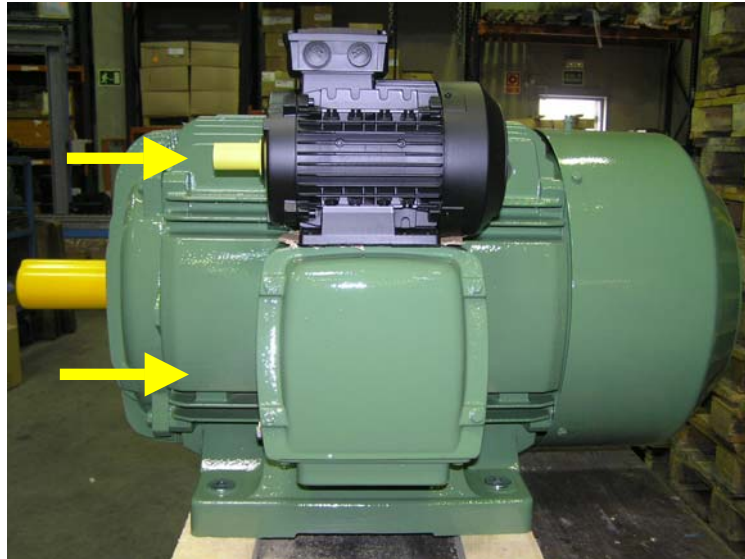
#### Regla 1 : Tamaño

En la elección del motor tamaño del motor entran diferentes factores que hacen que la potencia consumida por el motor seleccionado ascienda al 25% de la potencia asignada del motor.

Cuando el motor funciona fuera del punto nominal de trabajo, que corresponde con su potencia asignada que se indica en placa, desarrolla un rendimiento muy inferior al nominal.

Hay que evitar sobredimensionar el motor mediante la aplicación de coeficientes de seguridad.

En la figura 5 se muestra un ejemplo exagerando la selección errónea del tamaño del motor. En las auditorías energéticas hay que detectar que los motores instalados tengan un consumo cercano al valor que se indica en la placa del motor.



**Figura 5** Ejemplo selección errónea del tamaño del motor

## **Regla 2: Regulación de velocidad**

En las aplicaciones dónde el motor eléctrico acciona un ventilador o un sistema de bombeo existe un gran potencial de ahorro energético. La forma tradicional de disminuir el caudal se realizaba mediante la utilización de una válvula que produce un estrangulamiento de paso, disminuyendo la sección útil. Esta solución consigue disminuir efectivamente el caudal pero el consumo del accionamiento es el mismo que cuando la válvula está totalmente abierta. Este tipo de accionamientos tiene una característica de par velocidad resistente cuadrático, lo que significa que si se regula el caudal variando la velocidad, la potencia requerida por el accionamiento disminuye en una relación cúbica.

La regulación de velocidad se puede conseguir mediante un motor que tenga dos velocidades por ejemplo 1500/3000 [1/min] o mediante un motor accionado por un convertidor de frecuencia. La selección de un o otra aplicación se basará en un estudio del coste de la inversión, de la fiabilidad del sistema y del ahorro energético.

### **Solución 1: Motor de dos velocidades**

En la figura 6 se muestra la característica par-corriente velocidad de un motor en conexión Dahlander dos velocidades 1500/3000[1/min]. El ahorro energético se observa fácilmente ya que la corriente consumida se ha reducido por debajo del 25%. Esta variación de velocidad se consigue variando la conexión del motor. Tiene el inconveniente de no permitir una regulación continua de la velocidad.

### **Solución 2: Motor accionado con convertidor de frecuencia**

Esta solución permite una regulación continua de la velocidad, obteniéndose un ahorro energético en todo el campo de regulación.

También permite el ahorro de consumo en el arranque. A diferencia del arranque directo, cuando se arranca con convertidor de frecuencia, la corriente de arranque en ningún caso será mayor que 1,50 veces la corriente nominal. Cuando se realiza arranque directo puede llegar a 8 veces la corriente nominal de la misma forma que la potencia consumida.

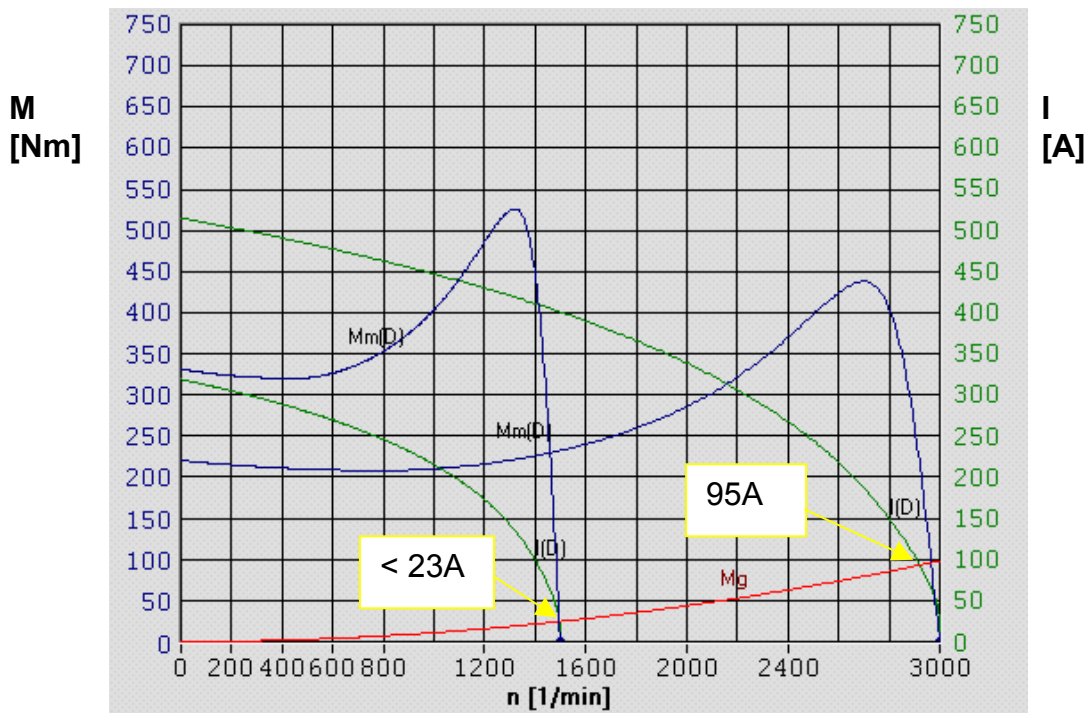


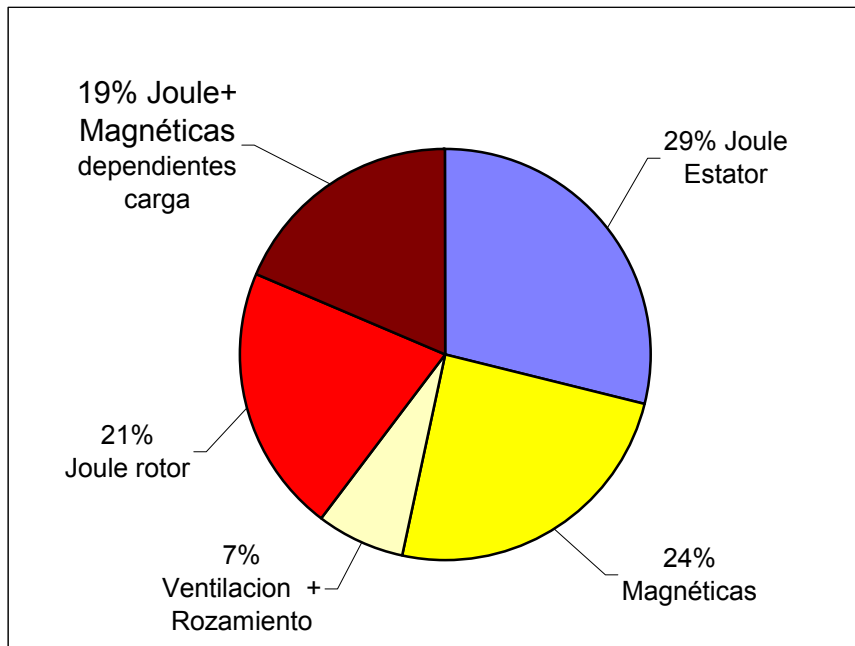
Figura 6 Característica Par-Corriente velocidad de un ventilador regulación 1500/3000 [1/min]. Mg Par resistente del ventilador (30kW 3000/min).

### Regla 3: Motor de alto rendimiento

Para que el motor de inducción cumpla con los rendimientos mínimos indicados en el acuerdo Europeo, la Ley EEact y la Ley EPact, este se tiene que optimizar teniendo en cuenta donde se originan las pérdidas. En la tabla 2 y la figura 7 se presentan los valores característicos de un motor de 18,5kW 1500/min con un rendimiento del 92,2%.

Tabla 2 Distribución pérdidas en un motor eff1 de 18,5kW 1500/min

Potencia Nominal cedida al eje		18500	[W]
Potencia Electrica Absorbida		20065	[W]
Total de Pérdidas	100%	1565	[W]
Pérdidas Magnéticas	29%	454	[W]
Pérdidas Joule Estator	24%	376	[W]
Pérdidas Joule Rotor	21%	329	[W]
Pérdidas dependientes de la carga Joule y magnéticas	19%	297	[W]
Pérdidas ventilación y rozamiento	7%	110	[W]



**Figura 7 Distribución pérdidas originadas en motor eff1 18,5kW rendimiento 92,2%**

A continuación se presentan las mejoras que se han introducido en los motores de alto rendimiento para alcanzar el objetivo fijado en el Acuerdo Europeo y las Leyes Americanas.

### **Pérdidas por efecto Joule estator**

Aumentar la cantidad cobre alojado en las ranuras del estátor  
 Mayor tamaño de ranura  
 Disminuir cabeza de bobina

### **Pérdidas Magnéticas**

Mejorar la calidad de la chapa magnética  
 Disminuir el grosor de las chapas que componen el empilado del motor  
 Mejorar los procesos de fabricación, evitar rebabas  
 Aumento entrehierro  
 Mejorar el factor de bobinado. Por ej Mot 2 capas  
 Aumentar el tamaño del empilado, longitud del paquete magnético

### **Pérdidas por efecto Joule en el rotor**

Aumentar la inducción en el entrehierro  
 Aumentar tamaño de las barras conductoras del rotor  
 Aumentar la conductividad de las barras, utilizar rotores de cobre.



## **Pérdidas Mecánicas**

Optimización de la ventilación: Utilización de ventiladores más eficientes  
Disminuir las pérdidas por rozamiento: Utilización de rodamientos con bajo nivel de pérdidas y rodamientos más pequeños.

En muchos casos las pérdidas mecánicas no son debidas al propio motor sino que existe un sistema de transmisión que hace que debido a las pérdidas que en éste se originan, disminuya el rendimiento global del accionamiento. Este fenómeno se puede evitar controlando las tensiones de las transmisiones por correas. También hay que estudiar la posibilidad de sustituir el sistema de correas o de reductor con caja de engranajes por accionamiento directo mediante regulación de velocidad.

## **Pérdidas dependientes de la carga Joule y magnéticas [2]**

Este tipo de pérdidas no dejan de ser pérdidas por efecto Joule y magnéticas que se originan en el cobre del estator, en el aluminio o cobre del rotor y en la chapa magnética y aunque son análogas a las indicadas anteriormente se tratan separadamente, ya que para su determinación se utilizan métodos diferentes a los utilizados en los apartados anteriores. Estas pérdidas se pueden reducir mediante la actuación sobre los siguientes parámetros:

- Modificación del número ranuras del rotor  $N_2$
- Inclinación ranuras del rotor
- Bobinado paso acortado
- Devanado 2 capas
- Conexión en triángulo/estrella
- Grupos en paralelo
- Tamaño espineta rotor
- Resistencia transversal del rotor
- Forma de las ranuras del rotor
- Mejorando el mecanizado
- Actuando sobre el entrehierro

## **Regla 4: No comprar el motor solamente por el precio de venta.**

En la tabla 3 adjunta se presenta un estudio cuantitativo de las ventajas que supone la inversión en un motor eléctrico de alto rendimiento  $\text{eff}_1$ , respecto a un motor de rendimiento mejorado  $\text{eff}_2$ .

El motor  $\text{eff}_1$ , desarrollado en cumplimiento de las recomendaciones en la Regla 3, alcanza un rendimiento del 93,1% frente el valor del 91,6% del motor  $\text{eff}_2$ .

**Tabla 3 Estudio comparativo ahorro económico con el motor de alto rendimiento eef1 respecto un eff2 de rendimiento mejorado.**

TIPO		AMHE 200LP2	AM 200LLA2
<b>Clase Eficiencia (CEMEP)</b>		<b>EFF1</b>	<b>EFF2</b>
<b>RENDIMIENTO</b>	<b>[%]</b>	93,1	91,6
<b>Potencia EJE</b>	<b>[kW]</b>	30	30
<b>Potencia Red</b>	<b>[kW]</b>	32,22	32,75
<b>Precio Energía</b>	<b>[Eur/kW-h]</b>	0,071238	
<b>Precio Motor</b>	<b>[Eur]</b>	2.422,54	2.202,14
<b>Ahorro Eur/hora</b>	<b>[Eur]</b>	0,0376	
<b>Amortización Diferencia precio horas</b>	<b>[horas]</b>	<b>3.094</b>	<b>128 días</b>
<b>Amortización Motor Eff1 horas</b>	<b>[horas]</b>	<b>64445</b>	<b>7 años</b>

Esta diferencia de rendimiento hace que en tan sólo 128 días se ahorre la diferencia que costaría haber comprado un motor eff1. Para un valor del precio de la energía eléctrica de 0,071238 Eur/kWh, por cada hora de utilización se ahorrarían 0,0376 Euros respecto a lo que se tendría que pagar con el motor eff2. Aunque esta cifra pueda parecer pequeña, a lo largo del tiempo se llega prácticamente a pagar el motor de clase eff1.

Desde el punto de vista medioambiental, un ahorro de 0,528 kWh, significaría la disminución de emisiones en 0,311kg de CO<sub>2</sub> por hora.

## 5.1 Conclusiones

En las nuevas instalaciones o adecuación de las existentes se sustituirán los motores poco eficientes por motores de mayor eficiencia probada y a ser posible con regulación de velocidad.

En los casos que se requiera una reparación, el taller tendrá en cuenta la modificación del bobinado en función de las reglas anteriormente citadas así como de otros elementos de la instalación para mejorar el rendimiento del motor.

## BIBLIOGRAFÍA.

[ 1 ] Energy Efficient Motor Driven Systems. European Copper Institute (ECI), Fraunhofer-ISI, KU Leuven and University of Coimbra. Published by ECI in April 2004

[ 2 ] A. L. Orille, A. Jornet, S. Jareño, A. Pérez, "Optimal desig and efficiency test method of induction motors fed by frecuency converters", EEMODs 2002, Treviso, Italy