



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Motores Eléctricos Eficientes para el Sector Industrial

Autor: Sergio Espada Moya
Tutor: Fernando Soto Martos

Leganés
Febrero 2015

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado pone de manifiesto la importancia de la eficiencia energética en el entorno industrial, y en particular focalizado en los motores eléctricos, ya que es el ámbito de la industria que más energía consume.

Para lograr este objetivo se realiza una introducción relativa al ahorro de energía en la actualidad, además de realizar un breve análisis del sistema eléctrico, con las fuentes de generación más importantes en España.

Más adelante se analiza la demanda eléctrica residencial e industrial del sistema eléctrico español, haciendo especial hincapié en ésta última, estudiando el consumo eléctrico en estos últimos años de los cuatro sectores industriales españoles más consumidores de energía eléctrica.

A continuación, se introducen el concepto de eficiencia energética, tanto de manera global como en el ámbito industrial. Se referencian ciertas normativas nacionales y europeas para la mejora de la eficiencia y como consecuencia se reduzca el consumo de electricidad.

Para conseguir lo anterior en el entorno industrial, es necesario poner el foco en los motores eléctricos, ya que son los responsables de la mayor parte del consumo eléctrico industrial. Debido a su importancia se comienza por explicar brevemente su funcionamiento, así como ciertas características útiles para comprender mejor su actividad. Además se explica el porqué del interés en estos últimos años acerca de los variadores de frecuencia, utilizados sobre todo en accionamientos de régimen intermitente.

Habiendo realizado lo anterior se procede a la explicación de ciertas normativas y regulaciones relacionadas con los motores eléctricos como la normalización del cálculo de rendimiento de un motor, las clases de eficiencia existentes y la reglamentación acerca de la obligatoriedad del uso de ciertas máquinas en función de la potencia demandada.

Tras esto se muestra una comparación entre dos motores equipotenciales en régimen continuo, esclareciendo ciertas diferencias de consumo debido a los distintos rendimientos.

Para terminar, se expone una herramienta informática que se ha desarrollado para realizar una selección previa de la potencia necesaria del motor. Después se realiza una comparación energética y económica entre dos máquinas de igual potencia de manera sencilla y dinámica.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	8
1.1. Objetivos del Trabajo Fin de Grado	8
1.2. Estructura de la memoria.....	8
Capítulo 2. Contexto energético.....	10
Capítulo 3. Sistema eléctrico español	11
3.1. Generación de electricidad	11
3.1.1. Ciclos combinados a gas natural.....	13
3.1.2. Nucleares	14
3.1.3. Eólica	16
3.1.4. Hidráulica	16
3.2. Demanda de electricidad	17
3.2.1. Demanda residencial, de comercios, servicios y administraciones públicas	18
3.2.2. Demanda industrial	20
Capítulo 4. Eficiencia	27
4.1. Eficiencia industrial	28
Capítulo 5. Motores eléctricos.....	30
5.1. Tecnología	30
5.2. Características.....	34
5.3. Variadores de frecuencia.....	39
5.4. Normativa y regulación	44
5.5. Motores eficientes.....	50
5.6. Selección de motores	52
Capítulo 6. Herramienta informática	54
6.1. Estructura de la herramienta.....	54
6.2. Simulación de casos.....	56

Capítulo 7. Cronograma y presupuesto	60
Capítulo 8. Conclusiones	62
8.1. Conclusiones técnicas	62
8.2. Conclusiones personales.....	63
Bibliografía	64
Anexo I.....	66
Anexo II	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Potencia instalada en la Península a 31/12/12	12
Figura 2. Potencia instalada en la Península a 31/12/13	12
Figura 3. Potencia instalada de renovables en la Península en 2009 y 2013 ..	12
Figura 4. Cobertura de la demanda eléctrica en 2013	13
Figura 5. Situación de las centrales de ciclo combinado en España en 2013..	14
Figura 6. Situación de las centrales nucleares en España en 2013.....	15
Figura 7. Evolución de la potencia eólica instalada en España hasta 2013	16
Figura 8. Energía producible hidráulica diaria durante 2013	17
Figura 9. Demanda anual de energía eléctrica (b.c.) en la Península.....	18
Figura 10. Evolución y desglose del consumo eléctrico residencial	19
Figura 11. Evolución y desglose del consumo eléctrico en comercios, servicios y administraciones públicas.....	20
Figura 12. Número de centros de consumo	20
Figura 13. Consumo eléctrico en sectores	20
Figura 14. Evolución del IRE agregado con correcciones de laboralidad y temperatura	21
Figura 15. Evolución de la demanda eléctrica en el sector industrial en España	21
Figura 16. Evolución del consumo y producción de la Industria Química	23
Figura 17. Evolución del consumo y producción de la Industria de Alimentación, Bebidas y Tabaco	24
Figura 18. Evolución del consumo y producción de la Industria Metálica básica.....	25
Figura 19. Situación de escobillas y conmutador	30
Figura 20. Funcionamiento del conmutador	31
Figura 21. Descripción gráfica del teorema de Ferraris.....	32

Figura 22. Circuito equivalente de una fase de un motor de inducción trifásico.....	33
Figura 23. Curvas par-velocidad de un motor asíncrono.....	34
Figura 24. Corriente (I) y par (M) en conexión estrella y triángulo.....	35
Figura 25. Tipos de servicios más comunes de motores eléctricos	36
Figura 26. Modificación de la curva par-velocidad producida con un variador de frecuencia	39
Figura 27. Curva de temperatura frecuencia-par.....	40
Figura 28. Conexión del variador de frecuencia en lazo abierto y cerrado.....	41
Figura 29. Comparación entre sistema de bomba con arrancador y bomba con variador	43
Figura 30. Balance de pérdidas en un motor eléctrico	45
Figura 31. Alisado de los datos de las pérdidas residuales.....	46
Figura 32. Herramienta informática. Potencia del accionamiento	56
Figura 33. Herramienta informática. Datos de los motores seleccionados para servicio continuo.....	57
Figura 34. Herramienta informática. Resultados de servicio continuo.....	57
Figura 35. Herramienta informática. Gráfica (Años vs Gasto Total) de servicio continuo.....	57
Figura 36. Herramienta informática. Datos del ciclo.....	58
Figura 37. Herramienta informática. Datos de los motores seleccionados para servicio intermitente.....	58
Figura 38. Herramienta informática. Resultados de servicio intermitente	58
Figura 39. Herramienta informática. Gráfica (Años vs Gasto Total) de servicio intermitente	59
Figura 40. Desglose de planificación.....	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información básica de las centrales nucleares en España.....	15
Tabla 2. Valores Añadidos de las industrias que demandan más energía eléctrica.....	26
Tabla 3. Factores de servicio	37
Tabla 4. Tarifas de penalización por consumo de energía reactiva	37
Tabla 5. Especificaciones de la bomba y los dos sistemas para SinaSave	42
Tabla 6. Resultados energéticos de SinaSave.....	43
Tabla 7. Resultados económicos de SinaSave	43
Tabla 8. Resultados energéticos de SinaSave IE3 vs IE2	44
Tabla 9. Límites nominales (%) para rendimiento IE1, IE2, IE3 y IE4 a 50 Hz	48
Tabla 10. Relación entre las distintas nomenclaturas de eficiencia de motores eléctricos	49
Tabla 11. Comparativa entre motores con eficiencia IE3 y IE4.....	51
Tabla 12. Potencia admisible en función de la temperatura y altitud.....	52
Tabla 13. Horas de dedicación al Trabajo Fin de Grado	60
Tabla 14. Costes de realización del Trabajo Fin de Grado	61

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La sociedad actual es totalmente dependiente de la energía, ya sea de manera directa o indirecta. Se trata de una necesidad básica pero que en ocasiones puede suponer un alto gasto económico. Las personas necesitan energía para calentarse o desplazarse, pero también necesitan productos que fabrican las industrias con energía.

Si a lo anterior se une la concienciación cada vez mayor de la sociedad en cuidar el medio ambiente, surge la necesidad del empleo de la eficiencia energética.

Particularizando en el ámbito industrial, que una fábrica sea eficiente significa que aprovecha al máximo la energía demandada, lo que deriva en un menor gasto energético mensual y un ahorro de emisiones de gases a la atmósfera.

1.1. Objetivos

Los objetivos principales de este Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

- Analizar importancia de la eficiencia energética en el ámbito industrial y la relevancia de los motores eléctricos en la disminución del consumo eléctrico industrial, analizando además normativas que envuelven esta materia y cómo seleccionar un motor en función de ciertas características.

- Estudiar las normativas que aplican en esta materia y de ellas las que se utilizan para seleccionar un motor en función de ciertas características.

Asimismo, se desarrollará una aplicación informática que ayude a seleccionar y comparar motores de manera sencilla y de esta manera ver de manera visual los posibles ahorros, tanto energéticos como económicos.

1.2. Estructura de la memoria

- Contexto energético

Se trata de un apartado introductorio en el que se muestra la situación energética que se vive en la actualidad.

- Sistema eléctrico español

En este punto se analiza el estado de la generación de energía eléctrica en España, explicando de manera breve la situación de cuatro de las fuentes generadoras más importantes del país.

Se muestra la evolución de la demanda eléctrica residencial e industrial, detallando el consumo eléctrico y la producción de cuatro de las industrias españolas más importantes y demandantes de energía eléctrica.

- Eficiencia

Este apartado supone una introducción a conocer la importancia de la eficiencia y el ahorro energético tanto en el ámbito global como industrial. Se señalan varias normativas vigentes en relación con este tema.

- Motores eléctricos

En el quinto apartado se explica de manera breve el funcionamiento de un motor eléctrico de CC y de CA, así como ciertas características básicas para el entendimiento de posteriores apartados.

Se explica qué es un variador de frecuencia y los resultados que puede proporcionar al instalarlo en un motor eléctrico.

Se analizan ciertas normativas relacionadas con los motores eléctricos y su eficiencia que se encuentran vigentes en la actualidad.

Se pone de manifiesto las diferencias económicas y energéticas entre dos motores de distinto rendimiento, así como una serie de factores imprescindibles a la hora de seleccionar el motor más adecuado.

- Herramienta informática

En este punto se explica el desarrollo de una aplicación que permita seleccionar y comparar motores eléctricos para el sector industrial indicando varios resultados energéticos y económicos. Además se exponen ejemplos de uso de la aplicación.

- Cronograma y presupuesto

Se exponen las tareas y horas dedicadas a este Trabajo Fin de Grado, así como su presupuesto.

- Conclusiones

En este último apartado se describen las conclusiones técnicas y personales extraídas de la realización de este Trabajo Fin de Grado.

Capítulo 2. CONTEXTO ENERGÉTICO

Uno de los elementos más importantes para la vida del ser humano es la energía. En su ámbito más general es imprescindible ya que sin ella no podríamos ver en la oscuridad, no sería posible realizar trayectos de un modo seguro y rápido, pasaríamos mucho calor en verano y nos helaríamos en invierno, no podríamos tener un acceso ilimitado a la información y un largo etcétera.

Es sabido que la población mundial está aumentando, y con ello el consumo energético, estimando según estudios que para el año **2035 la demanda de energía se habrá visto incrementada en un 30%**.

La generación de energía tiene un alto coste, sobre todo si se basa en las tres fuentes principales a nivel mundial como son el petróleo, gas natural y carbón. Todas ellas fósiles, con alto poder calorífico y muy contaminantes. Pero la gran ventaja de los hidrocarburos es que, mientras continúen existiendo en el planeta, en ningún momento nos quedaremos sin ellos. Sus precios pueden subir o bajar, pero seguro que la gasolinera dispondrá de carburante para vender a cualquier conductor que lo necesite.

Por otra parte se sitúan las denominadas energías renovables, mayoritariamente las que se basan en el viento y el Sol, aún muy nuevas en comparación con el resto pero que en la actualidad proporcionan gran interés y desarrollo a su alrededor. También es cierto que existen detractores debido a su falta de control sobre la materia prima, ya que las energías renovables dependen de fuentes de las cuales no podemos controlar su cantidad en cualquier instante. Aun así, muchos países están apostando por estas tecnologías ya que no tienen coste de combustible y no contaminan.

Llegados a este punto, se tienen por un lado unas fuentes muy buenas desde el punto de vista energético aunque caras, agotables y contaminantes, y por otra parte unas fuentes gratuitas, inagotables, limpias pero incontrolables. Por todo esto es tan importante pensar en la eficiencia energética casi como otra fuente de energía. Se producen menos pérdidas y se aprovecha mejor la energía, evitando un aumento excesivo en la generación.

Desde el punto de vista industrial o internacional, cualquier estructura que proporcione las necesidades energéticas, las aproveche mejor y produzca costes económicos menores, será más proclive al crecimiento y desarrollo.

Concretamente, la energía eléctrica es la más importante y por ello existen diversas fuentes desarrolladas para su generación. Además, es necesario disponer de una red que conecte los puntos de producción con los de consumo, lo que la hace cómoda para el usuario pero a su vez compleja para las autoridades.

Capítulo 3. SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

El sistema eléctrico se puede dividir en cuatro etapas: generación, transporte, distribución y consumo de la energía.

En la etapa de generación se sitúan las centrales eléctricas cuyos máximos representantes en España son las centrales nucleares y de ciclo combinado a gas natural, así como los parques eólicos y centrales hidráulicas.

Para transportar la energía eléctrica producida se necesita una red de transporte y un centro capaz de controlar este flujo energético. En España, la empresa que se ocupa de esta labor es Red Eléctrica de España (REE). Sus tareas principales son asegurar el buen funcionamiento del sistema y garantizar el suministro eléctrico continuo. Para ello debe asegurar que en todo momento exista un equilibrio entre la energía generada y la demandada debido a la imposibilidad de almacenamiento energético en grandes cantidades. Esta tarea se realiza desde el Centro de Control Eléctrico (CECOEL) propiedad de REE.

Una vez realizado el tránsito de electricidad desde las centrales hasta las zonas próximas al consumo se produce la fase de distribución, cuya responsabilidad es de las distintas compañías energéticas distribuidoras. Su misión es hacer llegar la electricidad a los hogares, industrias, etc. que hayan contratado con ellas y garantizar la calidad del suministro proporcionando un nivel de tensión adecuado en cada caso, ya que el consumo doméstico ronda los 220 V y el industrial oscila entre los 132 V y los 12,5 kV en función del tipo de industria.

Finalmente, en la última etapa se sitúa el consumo de la energía, donde hogares e industrias son los máximos responsables de este proceso, principalmente en la producción química, alimentaria y metalúrgica.

3.1. Generación de electricidad

Según datos de REE [\[1\]](#), **la potencia instalada en el sistema eléctrico peninsular español a 31 de Diciembre de 2013 es de 102.395 MW**, habiendo experimentado un aumento de 699 MW (+0,7%) con respecto al año 2012. Aunque el incremento ha sido menor que en el año anterior (+2,4%), éste sigue siendo notable y se ha producido principalmente por el desarrollo de algunas plantas renovables. Así, se instalaron 453 MW de energía solar (350 de termoeléctrica y 103 de fotovoltaica) y 237 MW de eólica.

Como se puede ver en las figuras 1, 2 y 3, los tres grupos predominantes de potencia instalada son las centrales de ciclo combinado, generación eólica e hidráulica, por lo que poco a poco las renovables han ido tomando mayor protagonismo.

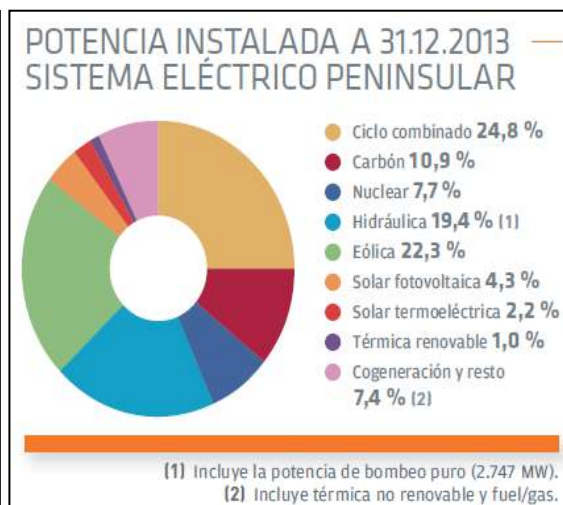
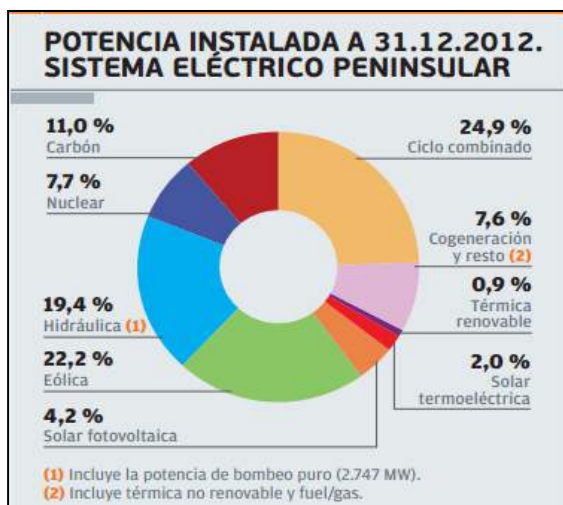


Figura 1. Potencia instalada en la Península a 31/12/12. Fuente: REE [1]

Figura 2. Potencia instalada en la Península a 31/12/13. Fuente: REE [1]

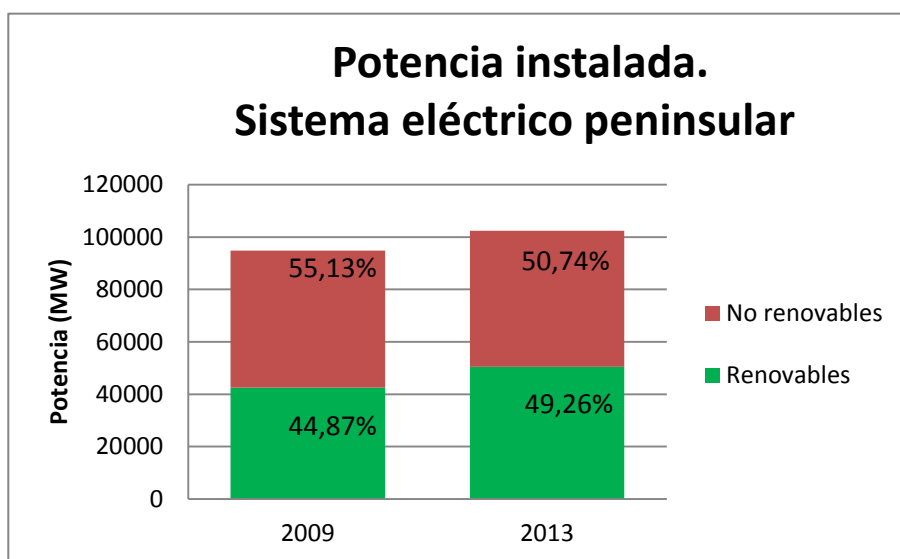


Figura 1. Potencia instalada de renovables en la Península en 2009 y 2013. Fuente: Datos REE [1]

Aunque las centrales de ciclo combinado ocupen el mayor porcentaje de la potencia instalada con un 24,8%, su contribución en 2013 a atender la demanda fue sólo del 9,5% de energía generada. Esto se debe en parte a la utilización de la energía nuclear como generación de base y el aumento en estos últimos años de la producción renovable, eólica e hidroeléctrica. Prueba de ello, la figura 4, donde se pueden ver los porcentajes de las distintas energías suministradas para satisfacer la demanda energética.

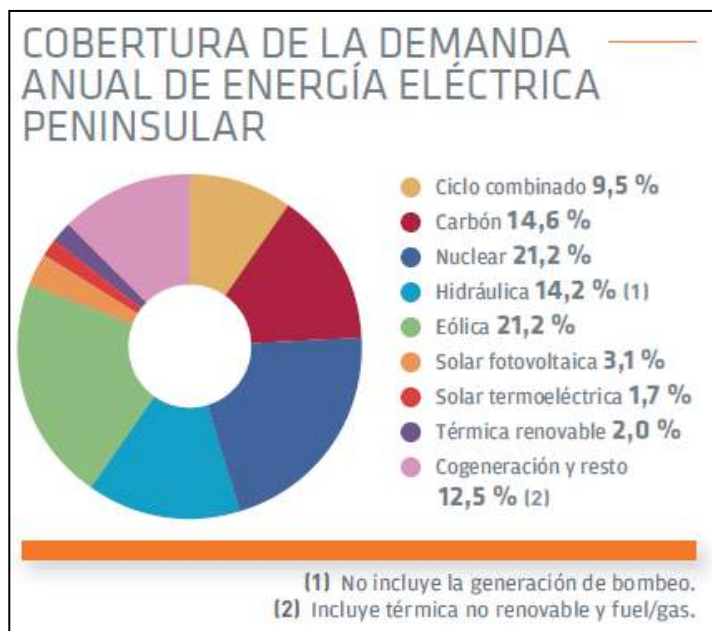


Figura 4. Cobertura de la demanda eléctrica en 2013.

Fuente: REE [1]

Además de garantizar el suministro de la demanda peninsular, la generación eléctrica debe estar preparada para facilitar los intercambios de energía con el archipiélago balear y con los países colindantes.

En el último año las islas Baleares obtuvieron un 22,4% de la energía a través del enlace Península-Baleares, lo que suponen 1.269 GWh importados del sistema peninsular.

En cuanto a los enlaces con Francia, Andorra, Marruecos y Portugal, el saldo total continúa siendo exportador, aunque menor que en 2012. Durante el último año, los saldos con Andorra y Portugal han sido positivos y superiores al saldo importador resultante con Francia. A esto hay que sumarle que el enlace España-Marruecos proporciona a España una conexión eléctrica de exportación total de energía eléctrica, lo que provoca que el saldo total de la península con los países colindantes sea exportador.

3.1.1. Ciclos combinados a gas natural

Actualmente, aunque existan 67 grupos de ciclo combinado a gas natural en toda la geografía española (**23.353 MW**), su factor de utilización en los últimos años está siendo muy bajo, cercano a las 1.000 h, muy por debajo de su factor de diseño de utilización que son unas 5.000 h, lo que hace más complicado recuperar la inversión realizada, ya que esta tecnología se empezó a utilizar en España a partir del año 2002. En comparación con la energía nuclear y el carbón, las ventajas principales de esta tecnología son el menor tiempo de arranque de la central, situándose alrededor de la hora necesaria desde frío a plena carga. La inversión

inicial por kilovatio también es mucho menor que en las otras tecnologías (en torno a 450 €/kW), además de verse reducido el plazo de ejecución de la central. Los volúmenes de gases que emiten las centrales de ciclo combinado (CO₂ y NO_x) son menores que los de las centrales de carbón, aunque nada despreciables. Como inconvenientes se debe resaltar la necesidad de gas natural como combustible, haciendo contaminante el proceso para el medio ambiente al tratarse de un combustible fósil y además, constituyendo la mayor parte del coste del kWh (≈70%). [2]

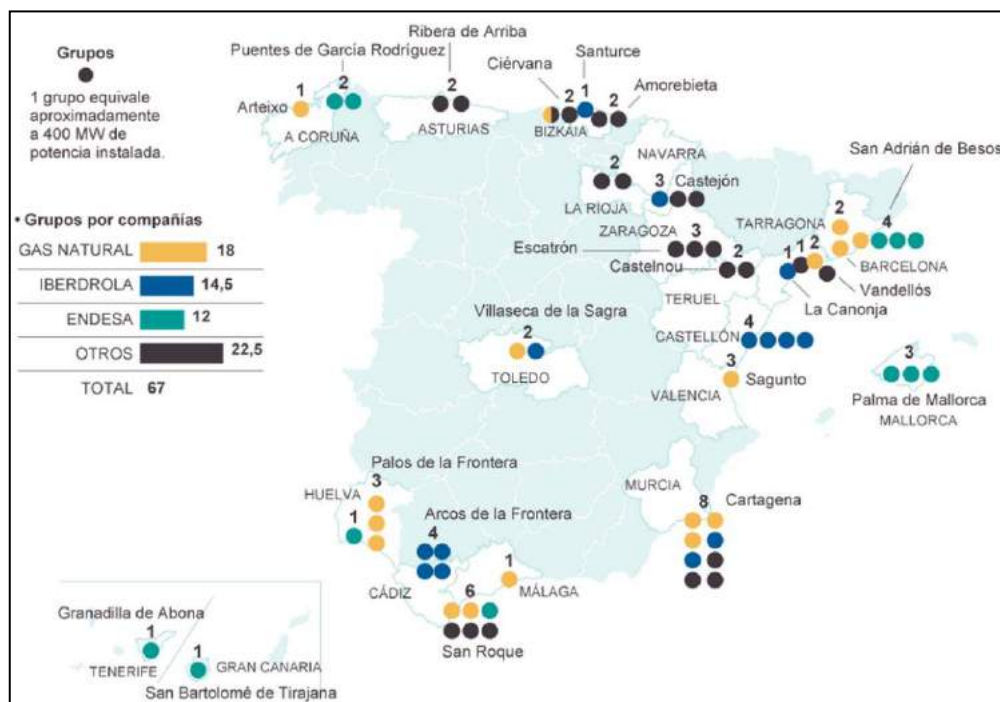


Figura 5. Situación de las centrales de ciclo combinado en España en 2013
Fuente: El País. 2013 [3]

3.1.2. Centrales Nucleares

Las centrales nucleares, desde los **7.866 MW** de potencia instalada y el cambio de regulación en 1998, han ocupado la primera posición del suministro de energía eléctrica del país. Esto se debe a que son precio aceptantes. Esto quiere decir que la energía que producen las centrales nucleares la ofrecen a 0 €/MWh, aunque finalmente reciben el mismo precio que la última central que haya entrado en la subasta. Se ofrecen a precio cero para ser la primera energía (junto con las renovables) en entrar para abastecer la demanda. Esto se debe a que las centrales nucleares no tienen capacidad de marcha-paro (tiempo de arranque muy alto) y tienen que realizar una generación continua, por lo que siempre quieren vender todo lo producido. Por todo esto la producción de energía eléctrica mediante centrales nucleares siempre mantiene un valor más o menos constante. Comparando esta energía con el resto de energías no renovables cabe destacar su nula aportación de CO₂ a la atmósfera. La inversión inicial para la construcción de

una central de este tipo, así como su desmantelamiento, es muy alta (en torno a 1500 €/kW), por lo que aunque la producción de energía sea barata, los costes iniciales hacen que esta energía en conjunto sea cara y se tarde mucho tiempo en recuperar la inversión. [2]



Figura 6. Situación de las centrales nucleares en España en 2013

Fuente: Minetur [4]

Central	Propietarios	Potencia eléctrica (MW)	Año entrada en servicio
Sta. María Garoña	Nuclenor: Iberdrola Generación S.A. (50%) y Endesa Generación S.A. (50%)	466.00	1971
Almaraz I	Iberdrola Generación S.A. (52,7%), Endesa Generación S.A. (36,0%) Gas Natural S.A. (11,3%)	1035.30	1981
Ascó I	Endesa Generación S.A. (100%)	1032.50	1983
Almaraz II	Iberdrola Generación S.A. (52,7%), Endesa Generación S.A. (36%) Gas Natural S.A. (11,3%)	1045.00	1983
Cofrentes	Iberdrola Generación, Nuclear S.A.	1092.02	1984
Ascó II	Endesa Generación S.A. (85%), Iberdrola Generación S.A. (15%)	1027.21	1985
Vandellós II	Endesa Generación S.A. (72%), Iberdrola Generación S.A. (28%)	1087.14	1987
Trillo	Iberdrola Generación S.A. (48%), Gas Natural S.A. (34,5%) Hidroeléctrica Cantábrico (15,5%), Nuclenor (2%).	1066.00	1988

Tabla 1. Información básica de las centrales nucleares en España en 2013

Fuente: Minetur [4]

3.1.3. Energía eólica

Como se ha dicho anteriormente, la energía renovable que más ha crecido en estos últimos 10 años ha sido la eólica, llegando a los **22.854 MW** instalados a finales de 2013 y debido a ello (y sobre todo a las condiciones atmosféricas) pudo igualar la energía producida por las centrales nucleares el pasado año. Este incremento se vio favorecido al primar las construcciones de parques renovables en función de su potencia instalada. Aunque actualmente esta normativa está en proceso de cambio, el número de aerogeneradores instalados en la actualidad hace que España esté a la cabeza de Europa en generación de energía eólica en relación a la demanda. Se trata de una energía limpia donde los inconvenientes más relevantes son la necesidad de grandes extensiones de terreno y el impacto visual y ambiental.

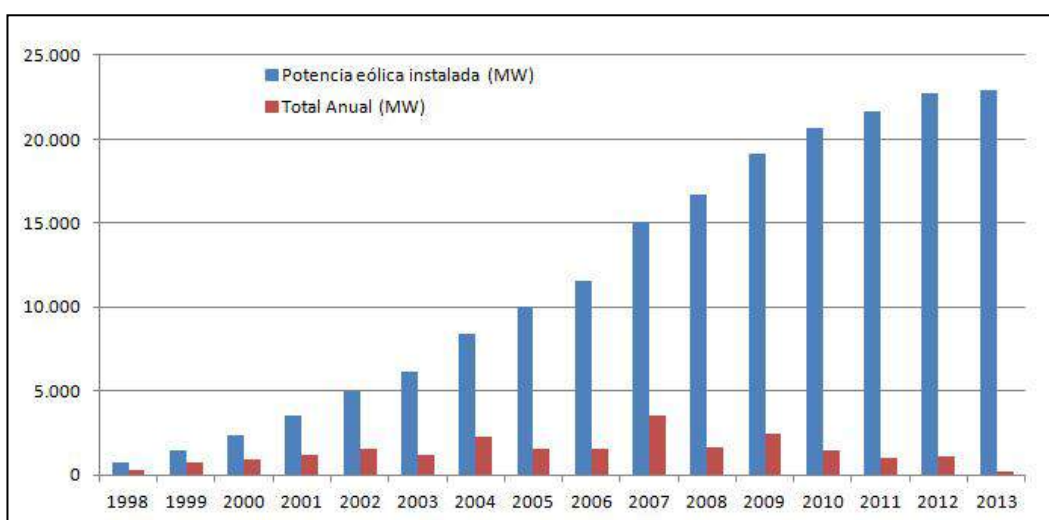


Figura 7. Evolución de la potencia eólica instalada en España hasta 2013.

Fuente: AEE [5]

3.1.4. Energía hidráulica

En la actualidad hay **17.785 MW** (más 2.102 MW de régimen especial) de potencia instalada en la Península, y aunque en los últimos años estos datos no han sufrido grandes cambios, en el año 2013 se incrementó su producción de energía en un 156% en el régimen ordinario y un 52,8% en el régimen especial. Como se puede ver en la figura 8, la energía hidráulica producible durante el año 2013 fue muy superior a la media histórica, y en este dato la variable que más influye es la cantidad de lluvias que hacen que los embalses varíen su nivel. Se trata de una energía limpia, ya que no produce emisiones (salvo en la construcción de la presa), con una materia prima prácticamente inagotable y un alto rendimiento energético. Los inconvenientes de esta tecnología son similares a los de la energía eólica, ya que el impacto medioambiental que puede producir en la zona siempre se debe tener en cuenta y debe ser el mínimo.

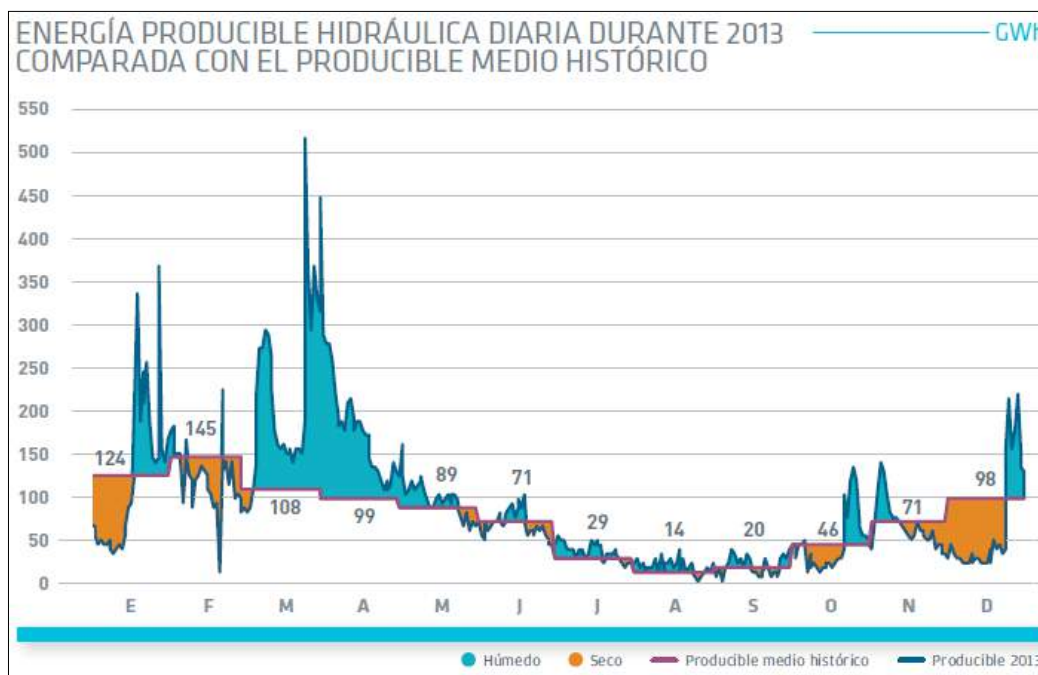


Figura 8. Energía producible hidráulica diaria durante 2013.
Fuente: REE [1]

Actualmente en España existe una sobrecapacidad de potencia instalada del sistema eléctrico debido a la caída en el consumo de electricidad y a la sobreconstrucción de centrales de ciclo combinado a partir de los primeros años del nuevo milenio. Debido a una demanda de electricidad al alza, el objetivo era asegurar de forma responsable el suministro de energía, pero pocos años después la política energética se vio modificada para favorecer las energías renovables con subvenciones, y el sector que más creció desde ese momento fue el eólico, provocando un aumento masivo de la energía eólica disponible año a año. Por ello en el último año las energías más utilizadas han sido la nuclear y la eólica, completando algo más del 40% de la demanda de electricidad.

3.2. Demanda de electricidad

Como se ha dicho anteriormente, el consumo de electricidad en España se ha visto reducido en el año 2013 a niveles de 2005, concretamente a **246.313 GWh**. Tal y como se puede ver en la figura 9, la tendencia del consumo eléctrico español estuvo al alza hasta el año 2008, año en el que comienza la recesión económica. A partir de este periodo la demanda sufre una tendencia a la baja, llegando a tener una reducción del orden de 5.000 GWh cada año desde 2010, y viéndose disminuida también la punta máxima de demanda, especialmente en 2013.

Las empresas y algunos organismos suelen realizar unas correcciones del consumo por causa de la temperatura y laboralidad (factor que depende de los días

de labor, aparición de puentes, festivos, etc.) para poder comparar los valores de consumo en las mismas condiciones, ya que estos dos factores pueden influir de manera significativa en la demanda doméstica e industrial. De esta forma se normalizan los valores de consumo y se pueden comparar de manera más homogénea, aunque los valores no sean los reales.

Un concepto importante referido a la demanda eléctrica es el de barras de central (b.c.) que supone realizar las mediciones de energía en bornes de alternador a la cual se le deduce la energía consumida en generación y bombeo. De esta manera, los valores obtenidos no son las generaciones reales de las centrales, sino un balance de energía. [6]

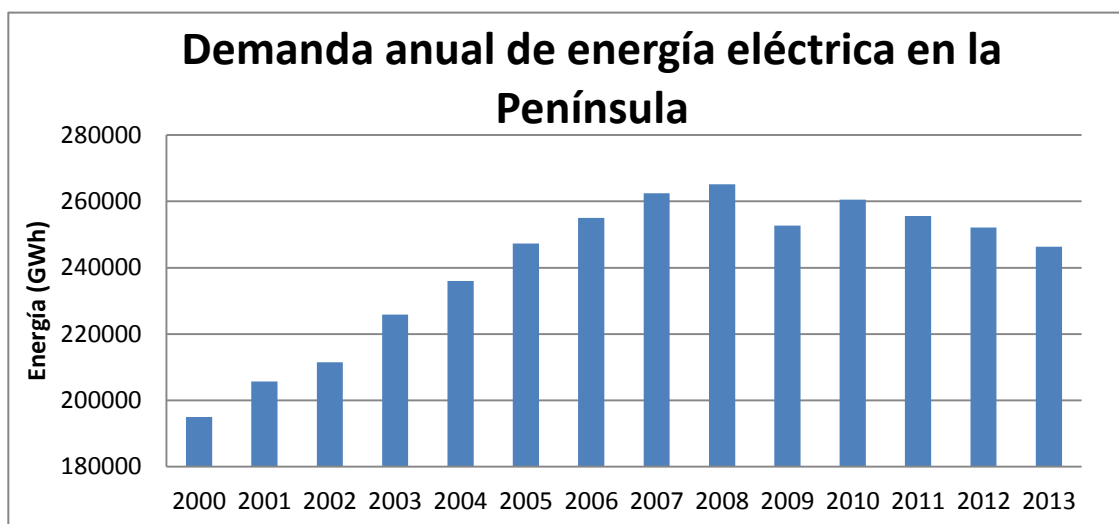


Figura 9. Demanda anual de energía eléctrica (b.c) en la Península.
Fuente: Datos de REE [1]

La mayor parte del consumo eléctrico se puede englobar en tres grupos: Residencial, de comercios y servicios, y la industrial. Sólo estos tres sectores cubren aproximadamente el 95% de la demanda de electricidad del país.

3.2.1. Demanda residencial, de comercios, servicios y admin. públicas.

En primer lugar, hay que destacar que la demanda eléctrica residencial se coloca en el segundo puesto entre estos tres sectores en los que se ha dividido el consumo eléctrico. Se sitúa por delante del sector industrial, por lo que los comercios, servicios y administraciones públicas son los que demandan más energía eléctrica, con datos del año 2012.

En la figura 10 se puede ver cómo el consumo residencial se ha mantenido más o menos constante durante los últimos años. Como dato, destacar el esperado y elevado porcentaje de demanda debido a los electrodomésticos. Se tratan de aparatos muy comunes y necesarios en los hogares, normalmente con un alto consumo individual, y de ahí su alto grado de protagonismo. Años atrás la parte de consumo referida a iluminación tenía más protagonismo, pero en la actualidad las bombillas LED y de bajo consumo han hecho que su aportación ronde el 10% de una vivienda, dato pequeño si tenemos en cuenta las horas de uso al año.

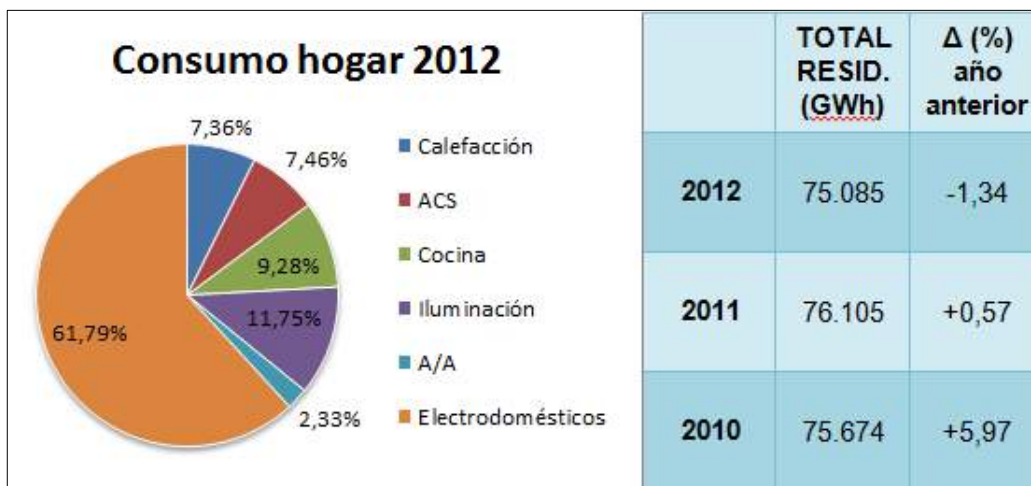


Figura 10. Evolución y desglose del consumo eléctrico residencial.
Fuente: Datos de IDAE [7] [8]

En cuanto al consumo referente a los comercios y administraciones públicas, éstos comprenden la demanda eléctrica referente a oficinas, hospitales, restaurantes y alojamiento, educación y los propios comercios.

Tal y como se muestra en la figura 11, existe una pequeña tendencia a la baja de los consumos eléctricos en estos sectores desde 2010 hasta 2012 (último año publicado), situándose en valores de 2008, cuando la crisis económica golpeaba más fuerte. Además es interesante observar cómo los sectores más consumistas fueron las oficinas y los comercios, superando incluso a los hospitales, lo que hace suponer que tal vez estos dos sectores tengan aún más margen de mejora en cuanto a su consumo eléctrico, ya que además los negocios siempre buscan el mayor beneficio, y menor consumo eléctrico se traduce en menor gasto económico.

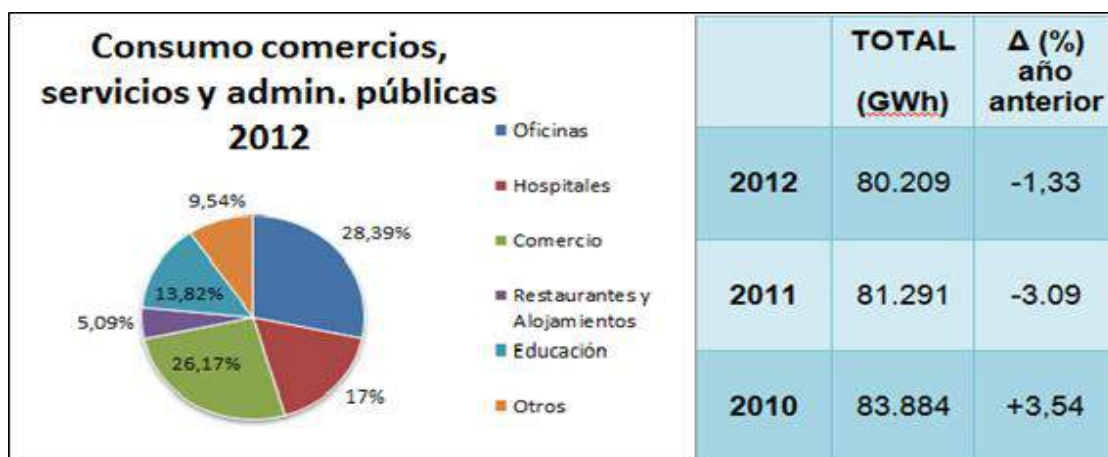


Figura 11. Evolución y desglose del consumo eléctrico en comercios, servicios y admin. públicas. Fuente: Datos de IDAE [7] [9]

Cabe destacar que **la suma de los consumos residenciales, de comercio, servicios y administraciones públicas representa aproximadamente un 60% de la demanda eléctrica** total de la Península, por lo que estos sectores tienen una importancia muy elevada. La característica principal que diferencia a estos grupos de consumo del resto es que en muchos casos la demanda eléctrica depende de las personas y sus hábitos, pudiendo modificar estos valores por iniciativa propia, y sin necesidad de políticas explícitas.

3.2.2. Demanda industrial

Según datos a 31 de Diciembre de 2012 de REE, el número de centros de consumo vigentes era de 21.285 correspondientes a 13.160 empresas. Como se puede ver en las figuras 12 y 13, el número de centros de servicios e industriales es muy parejo, pero como es de esperar, **la industria ocupa gran parte de la demanda eléctrica empresarial** ya que sus actividades requieren de mayor consumo diario, llegando prácticamente a las tres cuartas partes del consumo.

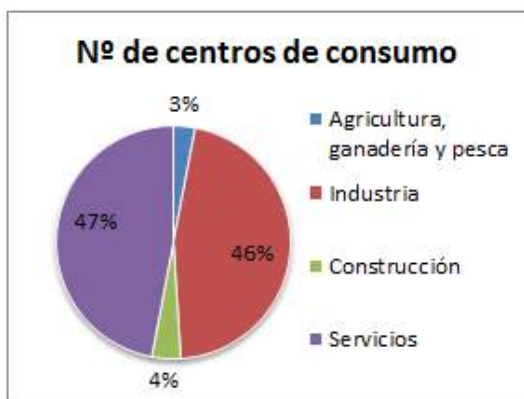


Figura 12. Número de centros de consumo. Fuente: REE [10]

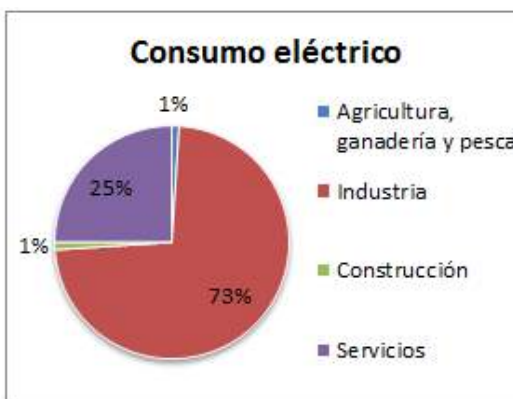


Figura 13. Consumo eléctrico en sectores Fuente: REE [10]

Red Eléctrica de España posee una medida indicadora de la evolución del consumo eléctrico del conjunto de empresas con una potencia contratada mayor de 450 kW, y que facilita una información del consumo a las pocas semanas, lo que la hace útil como indicador económico adelantado de la actividad económica del país. Esta medida es el IRE (Índice de Red Eléctrica) y existen tres tipos, el industrial, de servicios y el agregado, que recoge a ambos. Para su puesta en marcha REE tomó como referencia el año 2009, siendo el IRE de este año igual a 100, y a partir de ahí indican las diferencias del año actual con el anterior y con 2009. [10]

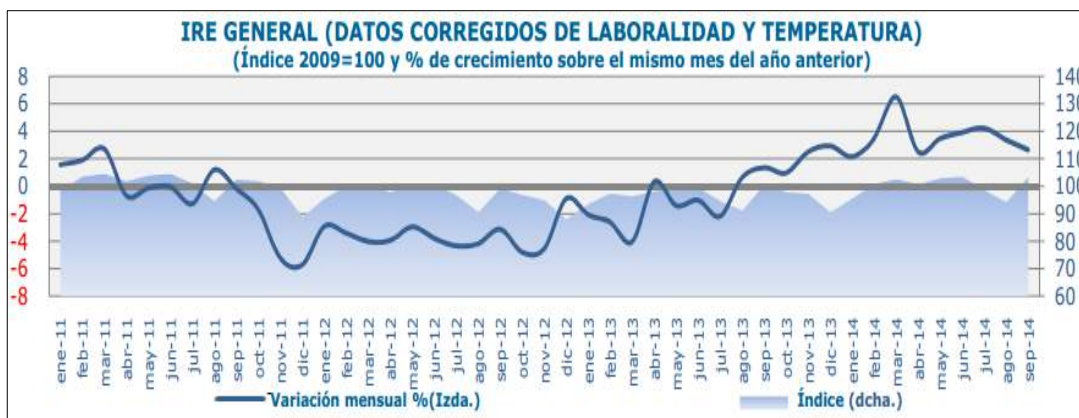


Figura 14. Evolución del IRE agregado con correcciones de laboralidad y temperatura. Fuente: REE [11]

Centrándose únicamente en la demanda de carácter industrial, en la figura 15 se puede apreciar nuevamente una disminución en el consumo de electricidad debido al comienzo de la recesión económica a partir de 2008 y notándose con mucha más fuerza en 2009. Aunque también se ha de decir que en los últimos años la demanda se ha visto estabilizada en valores que rondan los **73.000 GWh**, al nivel de los años 97-98, y que suponen alrededor del **30% de la demanda eléctrica total en España**.

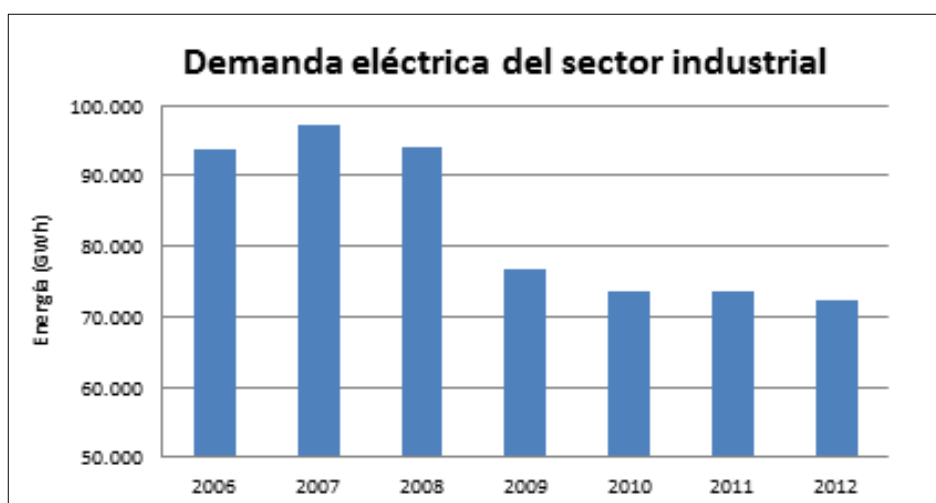


Figura 15. Evolución de la demanda eléctrica en el sector industrial en España. Fuente: Datos de IDAE [7]

Dentro de la industria existen varios sectores de los cuáles también resulta interesante estudiar el consumo de cada uno. A principios de los años 90, la empresa que más energía eléctrica demandaba era la química, con una media de unos 10.000 GWh/año, pero a partir de 1995 este sector se vio superado por el grupo de la siderurgia y fundición, e incluso también por el sector de la metalurgia no ferrosa a partir de 2009, y además comenzó a reducir su consumo eléctrico. Igualmente, otra división que se vio en aumento del consumo fue la de minerales no metálicos, ya que entre los años 2000 y 2008 siempre se situó entre los tres primeros puestos de demanda eléctrica. Como datos más recientes publicados por IDAE (año 2012) la siderurgia y fundición llegó a los 13.250 GWh y la metalurgia no férrea hasta los 10.500 GWh, siendo los mayores consumidores de energía eléctrica. [\[7\]](#)

Siguiendo el espíritu del IRE, se puede ver cómo existen ciertas relaciones entre los altibajos de consumo de energía eléctrica con las variaciones en la producción de las empresas.

El Instituto Nacional de Estadística (INE) desarrolla una medida referente para todas las divisiones de la industria española. Se trata del Índice de Producción Industrial (IPI) y funciona de la siguiente manera:

El IPI es un índice que se publica de forma mensual y anual y que establece una relación entre el volumen de producción de la empresa (output) en un periodo t y en un periodo 0 (año base). En ambas producciones también se tiene en cuenta lo consumido por la industria para generar esa producción (input). Según reglamento (CE) Nº 1165/98 del Consejo sobre las estadísticas coyunturales modificado por el reglamento (CE) Nº 1158/2005 del Parlamento Europeo y del Consejo, los índices deben cambiar de base cada cinco años, siendo los años base los terminados en cero o cinco, y todos los índices deberán adaptarse a esta nueva base en un plazo máximo de tres años a partir del final de dicho año base. [\[12\]](#)

El IPI medio del año base siempre será de 100, y los índices del resto de años indican un porcentaje de lo producido con respecto al año base, que actualmente es el 2010.

Considerando los cuatro sectores más consumistas de electricidad como los más relevantes para este trabajo, a continuación se realiza un pequeño análisis de cada división:

La industria química ocupó en ese año el cuarto puesto en demanda eléctrica entre los grupos industriales. Se trata de una posición elevada, pero si se tienen en cuenta años anteriores, como se puede ver en la figura 16, el consumo empezó a reducirse desde el año 2005, y teniendo las mayores caídas durante 2008 y 2009, seguramente debido a la crisis económica ya que además coinciden con disminuciones en el IPI (producción).

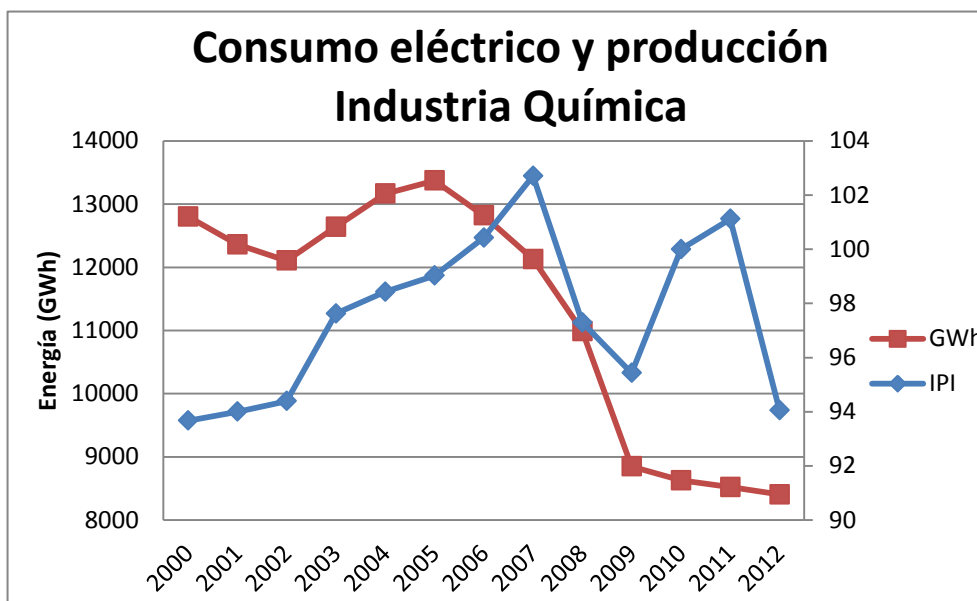


Figura 16. Evolución del consumo y producción de la Industria Química
Fuente: Datos de IDAE e INE [7] [13]

Durante los últimos años, la demanda eléctrica ha ido disminuyendo lentamente pero sin influir en cifras de negocios. Esto es que, aunque en 2010 y 2011 creciera la producción y en 2012 cayera hasta valores de 2001, los valores ofrecidos por Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Minetur) indican que desde 2010 se han estabilizado las cifras de negocios, siendo los valores más altos que se conocen hasta la fecha, rondando los 55.000 M€. [14]

También cabe destacar que, si por un lado la demanda eléctrica ha sido menor, por el contrario se ha incrementado en un 150% el uso de gas natural desde 2010. Aunque existan diferencias entre las distintas energías utilizadas, según el Informe de Responsabilidad Social 2013 de FEIQUE, el consumo de energía total por tonelada producida ha disminuido un 18% desde 1999, obteniéndose el menor consumo histórico en la industria química. [15]

Esta clase de industria engloba áreas muy diferentes y en muchas ocasiones sin relación entre ellas, lo que hace que la demanda de según qué productos necesite de un tipo concreto de producción y energía, así como el precio del producto, que será distinto. Por ello, se puede dar el caso de que la producción disminuya pero lo producido tenga mayor valor de lo que se ha dejado de producir, pudiendo así verse incrementada la cifra de negocios.

La tercera posición del consumo eléctrico la ocupó la industria de alimentación, bebida y tabaco. En este sector también se obtiene un valor inferior a los anteriores desde 2010, habiendo una tendencia a la baja del consumo, como se puede apreciar en la figura 17. También se puede ver cómo en este sector la

recesión económica no tiene tanta influencia como en el resto de sectores al tratarse en muchos casos de bienes de primera necesidad y/o difíciles de evitar. Esto también se puede notar en la curva del IPI, donde en general, sigue una tendencia ascendente desde el año 2000 hasta ahora. Las cifras de negocios son también buenas y crecen año a año, rondando actualmente los 100.000 M€, siendo las cifras más altas de la historia. [14]

En cuanto al resto de energías utilizadas, sucede algo similar a la eléctrica, ya que en los últimos años no existen cambios demasiado bruscos salvo una disminución de un 35% en el uso del gas natural durante 2011, aunque al año siguiente volvió a incrementarse llegando a superar las cifras anteriores.

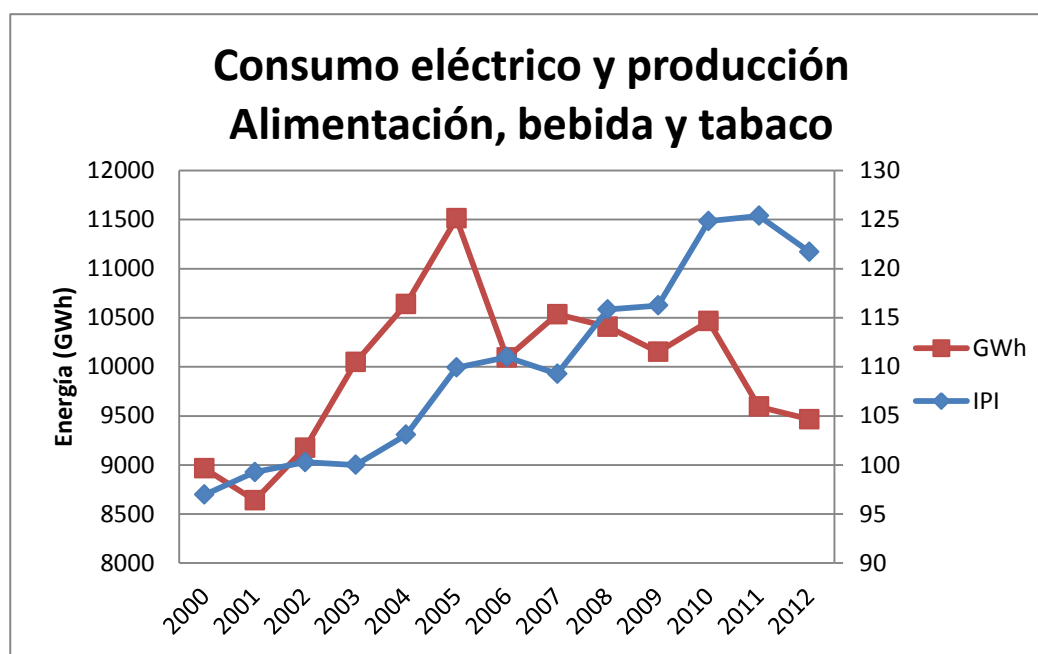


Figura 17. Evolución del consumo y producción de la Industria de Alimentación, Bebidas y Tabaco.

Fuente: Datos de IDAE e INE [7] [13]

Según la clasificación sectorial del IDAE, la industria Siderúrgica y Fundición y la Metalúrgica no ferrosa ocupan los primeros puestos de consumo respectivamente, pero el Ministerio de Industria, Energía y Turismo considera estos dos sectores como uno sólo, denominándolo metálicas básicas, por lo que éste último sería el sector más consumista de energía eléctrica en España. Para simplificar, se han sumado los consumos energéticos, así como una media del IPI en cada año.

En este caso es donde existe mayor relación entre la demanda eléctrica y los niveles de producción, como se puede ver en la figura 18, con aumentos y disminuciones casi sincronizadas. También observar que como en la mayoría de la industria en España, los años 2008 y 2009 son los peores en cuanto a variación porcentual de la producción, ya que son los más negativos. Los niveles de

producción actualmente rondan los valores de 2001, quedándose muy por debajo del máximo de 2007. Cabe recordar que desde el año 2000 la construcción de vivienda en España se fue incrementando año a año hasta que estallara la burbuja inmobiliaria, y este hecho se puede ver en la figura 17, ya que el acero es un elemento principal para ello. Incluso el balance comercial era negativo, por lo que importábamos más acero que el que exportábamos. Esta tendencia se vio invertida a partir de 2008, y hasta la actualidad el saldo sigue siendo positivo. Es por ello que las cifras de negocios rondaron los 30.000 M€ entre 2011 y 2012, a nivel del año 2006. [14]

Si se atiende al resto de energías utilizadas, desde 2010 la única variación brusca fue la disminución de casi un 30% en la utilización de productos petrolíferos. También destacar el alto nivel de uso de carbones, situando la energía obtenida de ellos en un nivel algo superior a la mitad de la eléctrica.

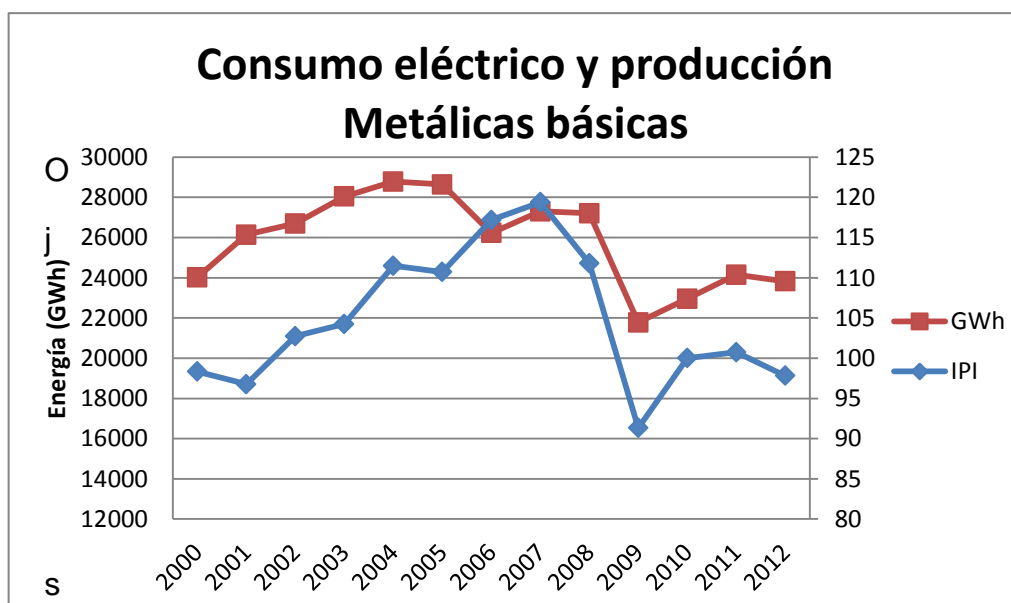


Figura 18. Evolución del consumo y producción de la Industria Metálica básica
Fuente: Datos de IDAE e INE [7] [13]

Éstas son las industrias con mayor consumo eléctrico en España y se puede apreciar en las gráficas anteriores cómo el nivel de producción y la demanda eléctrica están directamente relacionados, aunque siempre puede haber perturbaciones externas. Por todo esto si se utilizan índices como el IRE para prever datos de producción, se pueden cometer errores.

Estos tres sectores citados tienen una importancia muy significativa en la economía del país puesto que todos entran dentro de los diez primeros puestos en cuanto Valor Añadido Bruto (VAB) de las industrias del país. El VAB es la riqueza generada por diferencia entre el valor de la producción y los consumos intermedios utilizados (materias primas, servicios, etc.) y está estrechamente relacionado con el PIB. [16]

2012	VA (M€)	% total VA	Puesto (VAB)
Industria Química	10.938	8,72	3º
Alimentación, bebidas y tabaco	19.436	15,5	2º
Metálicas básicas	3.904	3,11	10º

Tabla 2. Valores Añadidos de las industrias que demandan más energía eléctrica.

Fuente: Datos de Minetur [14]

Capítulo 4. EFICIENCIA

Definiendo eficiencia como la **capacidad de utilizar el mínimo de recursos posibles**, ésta se debe combinar siempre con la eficacia, que es la capacidad de lograr una meta. Es lo ideal para cualquier objetivo, conseguirlo y además hacerlo sin derrochar.

Concretando en el tema energético, que es el que nos ocupa, los mecanismos ya existentes son eficaces porque cumplen su cometido, pero la eficiencia es un concepto que es relativamente nuevo, sobre todo en el ámbito residencial.

El sector de la industria fue el primero en empezar a preocuparse por la eficiencia. Todas las empresas tienen un objetivo en común, y ese es obtener el mayor nivel de beneficios posibles y mejorar su competitividad. Antes este fin se conseguía con métodos para mejorar la productividad o aumentar las ventas de los productos, pero como los beneficios son esencialmente la diferencia entre los gastos e ingresos, otro método complementario a lo anterior es reducir los gastos en la empresa, y esto se puede conseguir echando mano de la eficiencia energética.

La importancia de la energía consumida en la economía de las empresas y hogares es muy elevada, y dentro de ella, el caso concreto de la energía eléctrica que es utilizada en multitud de procesos, cifra que sigue aumentando en detrimento de sistemas dependientes de los combustibles fósiles, aunque éstos aún se mantengan a la cabeza como fuente de energía primaria. Millones de toneladas de estos combustibles son quemadas cada año para generar energía, pero debido a ineficiencias desde la extracción hasta el consumo, se desperdicia alrededor del 80% de su potencial. [\[17\]](#)

La disminución del gasto energético se puede conseguir con políticas de empresa que insten a empleados a prestar cierta atención a todo tipo de aparato eléctrico, así como en el hogar se intenta derrochar el mínimo de energía posible preocupándonos de temas como encender el lavavajillas o la lavadora al máximo de capacidad o siendo cuidadosos con la iluminación, en las empresas se realizan actos similares. Estos gestos son útiles cuando se puede evitar que un dispositivo esté en funcionamiento, pero obviamente existirá tiempo en el que deban estar trabajando para cumplir su cometido, con un nivel de energía que consume y otro de que devuelve. Esta relación la da el **rendimiento del mecanismo** y es una de las partes más importantes de la eficiencia. Un elemento con un alto rendimiento evitará que las pérdidas energéticas provoquen un gasto económico extra en la fuente de energía.

Además del factor económico, que es el más evidente, existe el factor ambiental. Éste es menos visible y tangible que el anterior, pero realmente mucho más importante. Empresas y hogares intentan reducir el consumo energético

generalmente para ahorrar gastos, pero pocos lo hacen pensando realmente en todo lo que hay detrás.

Hace unas décadas la sociedad no se paraba a pensar en si los recursos eran limitados y no se preocupaba -o incluso no conocía- por la contaminación siempre que fuera asequible económicamente. De ahí los distintos inventos de épocas anteriores donde sólo se buscaba el cumplimiento de un proceso y que pudiera ser útil para la sociedad. Afortunadamente, en la actualidad se tiene mucho más cuidado con los temas relacionados con los gases contaminantes y residuos, ya que además existen normativas que regulan estos asuntos como el Reglamento (UE) N° 517/2014 y el N°715/2007. El primero referido a los gases fluorados de efecto invernadero y el segundo a las emisiones de vehículos ligeros de motor. [\[18\]](#)
[\[19\]](#)

Otra medida de carácter más general es el **objetivo 20-20-20** marcado por la Unión Europea en 2008. Con esta norma se estableció como horizonte el año 2020 para disminuir un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a valores de 1990, conseguir un 20% de la energía producida por medio de fuentes renovables y una reducción del consumo energético en un 20% con respecto a las previsiones para 2020 gracias a una mayor eficiencia energética. [\[20\]](#)

Para el caso concreto de España, en los últimos años se han puesto en funcionamiento algunas medidas para conseguir los objetivos anteriores. Una de ellas son los **Proyectos Clima**, por la que el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente valora distintos proyectos verdes propuestos y contrata según eficiencia económica, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y sostenibilidad financiera. De esta forma también se favorece otro de los objetivos del 20-20-20, que es la promoción del crecimiento y los trabajos “verdes”. [\[21\]](#)

En conclusión, con los conocimientos que se tienen en la actualidad, se debería intentar ser eficientes a voluntad propia para aprovechar la energía al máximo, pero por otro lado la parte económica siempre ocupa gran importancia en todos los procesos. Por ejemplo un motor con un rendimiento muy alto pero que por sus componentes y construcción sea extremadamente caro o que utilice un combustible con un alto precio, será muy difícil de amortizar. Cualquier máquina, **además de ser eficiente debe ser rentable** o eficiente económicamente.

4.1. Eficiencia industrial

Actualmente el artículo 7.1 de la **Directiva 2012/27/UE** obliga a alcanzar, a cada Estado miembro, un objetivo de ahorro de energía final acumulado antes del 31 de Diciembre de 2020. [\[22\]](#)

La consecución de este objetivo supondrá unos ahorros energéticos acumulados durante el periodo de 7 años comprendido entre 2014 y 2020. Originalmente, el método de cálculo del ahorro necesario para su cumplimiento se obtiene de aplicar un 1,5% acumulado del consumo promedio del sector industrial de los años 2010, 2011 y 2012. Esto supondría para España una necesidad de ahorro de 21.305 ktep entre 2014 y 2020. Pero como se indica en el artículo 7.2, cada país puede aplicar ciertos mecanismos de flexibilidad para poder rebajar este ahorro hasta un 25%, quedando finalmente **15.979 ktep como objetivo de ahorro para España**, es decir, 579 ktep/año suponiendo distribución lineal de las cuales un 80% se verá reflejado en los sectores de la Industria (55%) y el Transporte (25%). Para el caso industrial, la medida más relevante es la adopción de mejoras tecnológicas disponibles en equipos y procesos.

Para acreditar que se cumple lo anterior, según el artículo 8 de la Directiva 2012/27/UE todas las empresas no consideradas PYMES deben **realizar una auditoría energética** antes del 5 Diciembre de 2015 y una actualización de ésta cada cuatro años. Otra forma de atenerse a la normativa es realizar otro tipo de auditorías que cumplan los requisitos necesarios y/o establecer sistemas de gestión energética o ambiental acorde con la normativa establecida. [\[23\]](#)

Para que las industrias puedan cumplir con el objetivo necesitan consumir menos energía, y uno de los mecanismos que más consumen son los **motores eléctricos**, siendo un **65% de la energía eléctrica en la industria**.

Actualmente no existe ningún método de subvenciones o ayudas para las industrias en relación con motores eléctricos eficientes o eficiencia energética. Sin embargo sí existe un fondo europeo con el propósito de mejora de eficiencia energética y/o uso de energías renovables vigente hasta el 31 de Diciembre de 2015.

Se trata del fondo JESSICA – F.I.D.A.E. promovido por IDAE y operado por el Banco Europeo de Inversiones (BEI) por el que se puede solicitar hasta el 70% del gasto. Entidades públicas, empresas de servicios energéticos y otras empresas privadas son los entes que pueden aspirar a esta financiación, siempre y cuando los proyectos de mejora de eficiencia estén situados en alguna de las ocho comunidades autónomas involucradas. Además es necesario que los proyectos planificados pertenezcan a los sectores de edificación, industria, transporte o infraestructuras de servicios públicos relacionados con la energía y traten alguno de los siguientes temas: eficiencia energética, solar térmica, solar fotovoltaica aislada, biomasa o el transporte limpio. [\[24\]](#)

Capítulo 5. MOTORES ELÉCTRICOS

A principios del s. XIX, el químico danés Hans Christian Ørsted demostró una relación entre la electricidad y el magnetismo, haciendo interactuar un hilo conductor de corriente con una aguja imantada de una brújula. Este experimento dio pie unos años después a que Michael Faraday desarrollara un experimento donde hacía colgar un hilo conductor desde una estructura conductora hasta un recipiente que contenía un imán y mercurio para cerrar el circuito. Se le aplicaba una corriente eléctrica a la estructura y hacía que el hilo rotara alrededor del imán. De esta forma Faraday produjo el primer movimiento de rotación provocado por energía eléctrica descubriendo que dos campos magnéticos que interactúan pueden producir movimiento, sentando las bases de los motores eléctricos que se utilizan en la actualidad.

5.1. Tecnología

Todos los motores eléctricos se pueden dividir en dos partes. Una móvil (rotor) y otra fija (estator). Dicho esto se pueden diferenciar dos clases: los que se alimentan de corriente continua (CC ó DC (terminología inglesa)) y los que usan corriente alterna (CA ó AC (terminología inglesa)).

El funcionamiento de un **motor de CC** consiste, primeramente, en crear un campo magnético en el interior del estator mediante electroimanes. Bobinando hilo de cobre alrededor de los hierros del estator se consigue producir polos cuando circula corriente por los hilos. Por el mismo principio, se bobina el rotor y se hace pasar corriente por las escobillas (ver figura 19) creando otros polos. Cuando circule corriente por estator y rotor, éste último girará hasta situar sus polos en contraposición con los del estator. Así quedará, norte de rotor con sur de estator y sur de rotor con norte de estator. Pero el eje se pararía una vez los polos estén alineados, por ello es necesario un conmutador que realice un cambio de sentido de la corriente en las bobinas del rotor y de esta forma también de su polaridad, como se muestra en la figura 20.

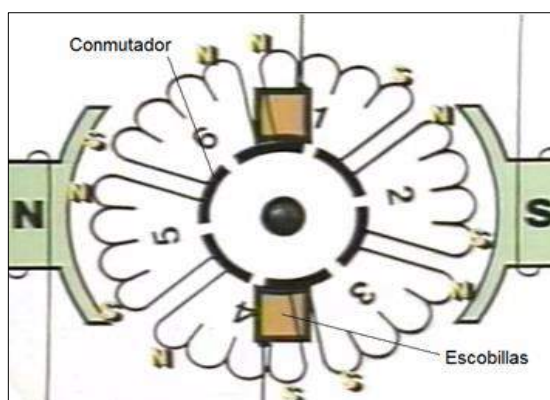


Figura 19. Situación de escobillas y conmutador.
Fuente: Elaboración propia.

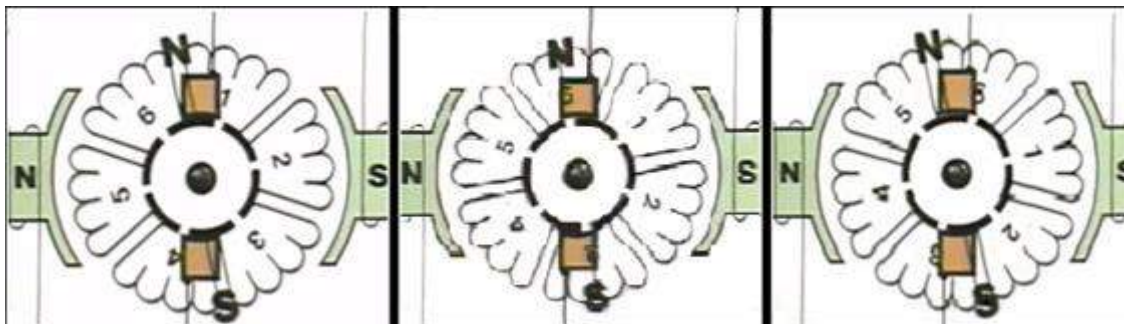


Figura 20. Funcionamiento del conmutador.
Fuente: Elaboración propia.

La cualidad más significativa de los motores eléctricos de CC es la facilidad de regulación de velocidad controlando la corriente del estator y/o rotor. Esto unido a los altos pares de arranque que se pueden obtener lo ha hecho imprescindible para aplicaciones que requieren de variación de velocidad como trenes. Aunque es cierto que en la actualidad estos motores están desapareciendo debido a la inclusión de los variadores de frecuencia que pueden controlar la velocidad de un motor asíncrono de CA, de los cuales se hablará más adelante.

Los **motores de CA** monofásicos son poco comunes en la industria ya que su potencia máxima ronda el $\frac{1}{2}$ CV (0,368 kW). Es por ello que los motores más demandados para potencias elevadas son los motores de inducción trifásicos, cuyo funcionamiento se basa en proporcionar corriente al estator para que induzca otra intensidad en el rotor.

Los rotores de los motores trifásicos de inducción pueden ser bobinados con hilo de cobre, lo que permite cierta manipulación del rotor para variar la resistencia rotórica, o la configuración más utilizada en la industria que es la del rotor de jaula de ardilla. Este rotor está construido por barras ferromagnéticas cortocircuitadas por dos discos en los extremos de ellas.

Los motores asíncronos de jaula de ardilla requieren un bajo nivel de mantenimiento y tienen una relación peso-potencia menor que los motores CC. Además, tienen la capacidad de soportar sobrecargas y su rendimiento es muy elevado, lo que hace que sea el motor más utilizado en el ámbito industrial.

Según la ley de Biot-Savart, una corriente I fluyendo por un conductor produce un campo magnético B , pero si esta corriente es alterna, produce un campo variable en el tiempo y a su vez, un flujo magnético Φ variable en el espacio. Además, el teorema de Ferraris enuncia que cuando por las bobinas del estator situadas a 120° fluyen corrientes desfasadas 120° , se produce un campo magnético giratorio (ver figura 21). Después, por la ley de Faraday-Lenz, se inducen fuerzas electromotrices (fem) que al estar el rotor en cortocircuito (jaula de ardilla) o cerrado mediante reóstato de arranque, aparecen corrientes en los

conductores del rotor, lo que a su vez genera otro campo magnético. De esta manera el campo rotórico sigue al estatórico, que es lo que hace girar al rotor.

Ley de Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad [1]$$

B = Campo magnético [T]
 μ_0 = Permeabilidad magnética en el vacío [$N \cdot A^{-2}$]
 r = Distancia desde el conductor [m]
 I = Corriente [A]

Ley de Faraday-Lenz:

$$\xi = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad [2]$$

ξ = Fuerza electromotriz [V]
 N = Número de espiras
 ϕ = Flujo magnético [Wb]

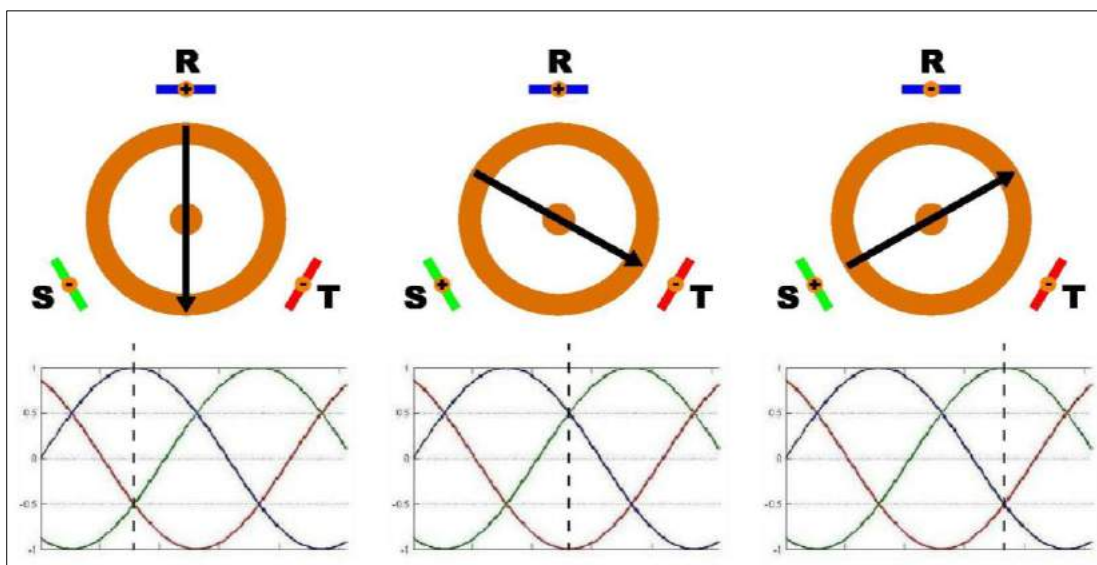


Figura 21. Descripción gráfica del teorema de Ferraris.
 Fuente: Elaboración propia.

La velocidad del rotor nunca llegará a igualarse a la del campo magnético del estator, ya que si se llegaran a igualar no se induciría corriente debido a que B sería constante desde el punto de vista de los conductores del rotor. La velocidad del campo giratorio estatórico se denomina velocidad de sincronismo (n_1) y es por ello que estos motores son calificados como asíncronos. La relación entre n_1 y la velocidad del rotor (n) se denomina deslizamiento (s) y suele situarse entre el 3 y 8%.

Aunque este último término sea difícil de regular, la robustez y simplicidad de estos motores los hacen muy aptos para trabajos como grúas, ascensores o máquinas herramientas donde no es necesaria una velocidad precisa. Es por ello que esta clase de máquina ocupa alrededor del 80% de las aplicaciones industriales de motores eléctricos.

Velocidad de sincronismo:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [3]$$

n_1 = Velocidad de sincronismo (rpm)
 f_1 = Frecuencia de la red (Hz)
 p = Número de pares de polos

Deslizamiento:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad [4]$$

s = Deslizamiento
 n_1 = Velocidad de sincronismo (rpm)
 n = Velocidad del rotor (rpm)

También existen otro tipo de máquinas denominadas síncronas en las que, para su funcionamiento como motor, se debe aplicar una red trifásica al estator y CC al rotor apareciendo un par motor que realiza el movimiento giratorio a una velocidad constante (de sincronismo). Su mayor inconveniente es su necesidad de arrancador externo hasta alcanzar dicha velocidad de sincronismo, lo que puede provocar pérdida de sincronismo con pares de frenados bruscos.

Esta clase de motores se suelen utilizar cuando interesa una gran constancia en la velocidad, como puede ser el caso de relojes eléctricos, pero su uso en modo generador está mucho más extendido siendo la máquina utilizada para centrales hidráulicas, térmicas o nucleares con potencias de hasta 1.000 MW.

Para realizar un estudio más eléctrico de un motor, se utiliza el circuito equivalente, que simula todas las partes y zonas importantes de la máquina y permite un estudio de su comportamiento. Para el caso de un motor asíncrono, su circuito equivalente es el representado en la figura 22, siendo la parte izquierda el estator y la derecha el rotor.

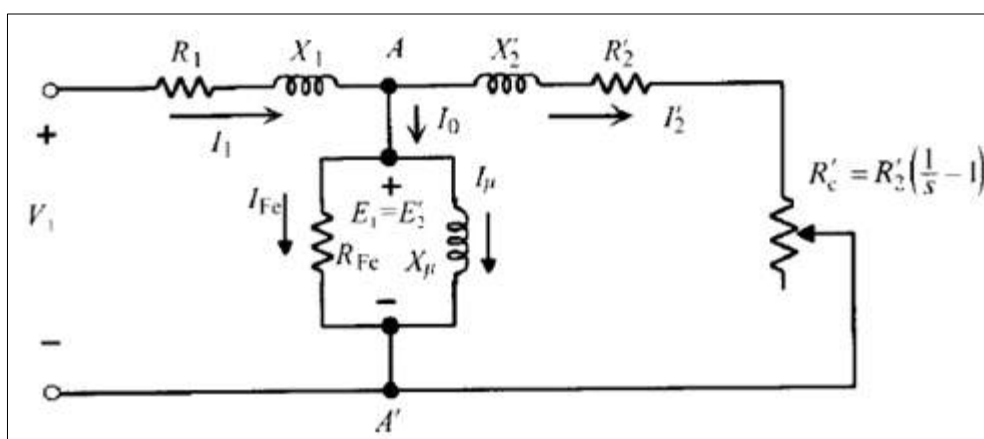


Figura 22. Circuito equivalente de una fase de un motor de inducción trifásico
Fuente: Fraile Mora, Jesús. 'Máquinas Eléctricas' [25]

5.2. Características

Una de las características más importantes acerca de los motores eléctricos es el par (T) que pueden proporcionar. Entendiendo par como una “fuerza”, todos los motores siguen una curva par-velocidad de aspecto similar. Por otro lado está el par resistente o de carga (T_r) que es el par que ejerce la carga y el que esencialmente tiene que vencer el motor. Existen varios tipos de curvas de par resistente, pero las más comunes son las constantes (ascensores o escaleras mecánicas) y las crecientes con la velocidad al cuadrado (hélices o bombas).

En la figura 23 se puede ver cómo se relacionan el par motor y el resistente. En primer lugar, el punto D indica el par de arranque del motor y debe situarse por encima del T_r para que pueda acelerar, sino no podrá ponerse en movimiento. El punto C señala el par máximo que puede proporcionar el motor. Y, por último, los puntos A y B indican el punto de funcionamiento que tendrá el motor con cada par resistente, señalando el par y la velocidad que tendrá el eje (n y n' respectivamente)

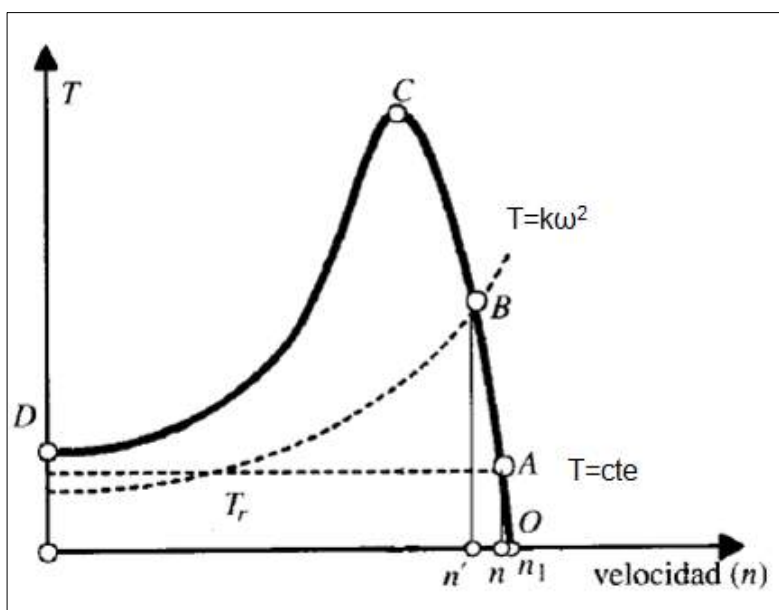


Figura 23. Curvas par-velocidad de un motor asíncrono
Fuente: Fraile Mora, Jesús. 'Máquinas Eléctricas' [25]

En cuanto a los procesos, uno de los más importantes en el funcionamiento de un motor es el momento del **arranque**, y esto se debe a que se produce un consumo muy elevado de corriente que se puede explicar desde el circuito equivalente, ya que la resistencia de carga (R_c) es nula al ser el deslizamiento la unidad, estando prácticamente en cortocircuito.

Para evitar este elevado consumo de potencia en el arranque existen varios métodos como el uso de un autotransformador o el arranque estrella-triángulo, ambos consistentes en proporcionar una tensión inferior a la de red.

Si se conecta un **autotransformador** entre la red y el motor, se consigue tener la posibilidad de varias tensiones durante el arranque hasta llegar al punto deseado. En un primer instante se aprovechan las bobinas del autotransformador para disminuir la tensión lo máximo posible pero lo suficiente como para que el par de arranque sea mayor que el par resistente y pueda producirse aceleración. Después, a medida que el motor va acelerando se debe ir conmutando el autotransformador hasta obtener directamente la misma tensión de la red y hacer que el motor funcione en valores nominales.

Otro procedimiento para ahorrar energía es la **conexión estrella-triángulo**. Se basa en la misma premisa que el anterior, pero en este caso sólo es necesario un sistema de contactores, así como un relé de tiempo. En el momento del arranque se conectan las fases del estator en estrella, proporcionando $1/\sqrt{3}$ la tensión de fase de la red, lo que provoca que la corriente que absorbe el motor sea 3 veces menor. Cuando la máquina comienza a perder demasiado par se conmuta para cambiar a conexión triángulo y proporcionar la tensión de fase de la red. Al igual que con el autotransformador, al reducir la tensión también se reduce el par de arranque del motor, por lo que siempre habrá un mínimo de par dependiente de la carga, y en el caso de la conexión estrella-triángulo será concretamente 3 veces menor que el par nominal.

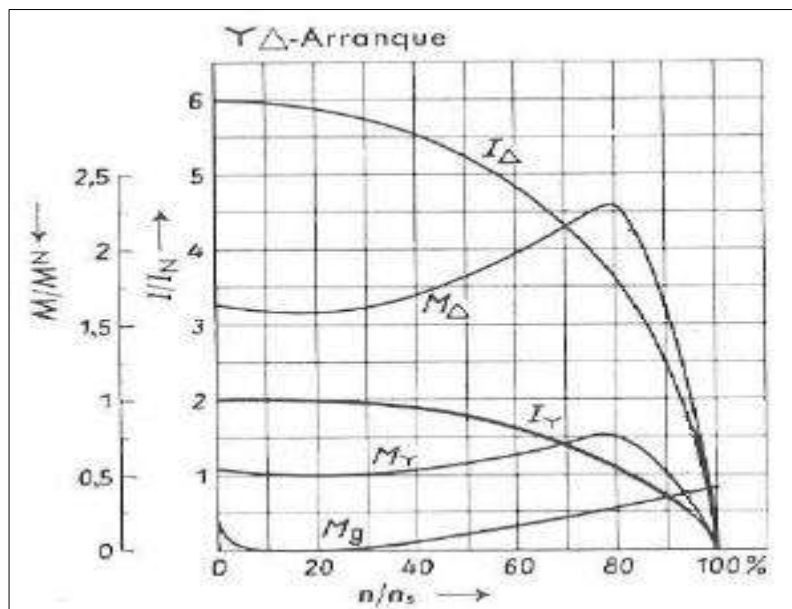


Figura 24. Corriente (I) y par (M) en conexión estrella y triángulo.
Fuente: AEG Motores eléctricos AC trifásicos y monofásicos [26]

Otro concepto importante para ahorrar lo máximo desde el punto de vista económico y energético es el del **tipo de servicio** que realizará el motor. Es uno de los puntos más importantes para adquirir un motor de una potencia u otra.

Como se puede ver en la figura 25, la temperatura en el interior del motor es otro factor importante ya que limita su utilización y provoca fallos de funcionamiento, y es por ello que existen diversas clases de aislamiento y de refrigeración normalizadas. Es relevante ya que la elección de un tipo de aislamiento u otro se ve reflejado en el precio, así como la refrigeración, que además del sistema, si por ejemplo se trata de un ventilador, también consume energía que se contabiliza como pérdidas, provocando un menor rendimiento del motor en cuestión. De esta forma mediante las variables de potencia, tiempos de arranque, frenado y régimen permanente y ciertos coeficientes y parámetros normalizados dependientes de la refrigeración, tipos de mecanismos, etc. se puede hallar la capacidad de sobrecarga de un motor, lo que a su vez puede permitir la adquisición de una máquina de menor potencia, lo que influirá tanto en su precio como en el consumo de energía.

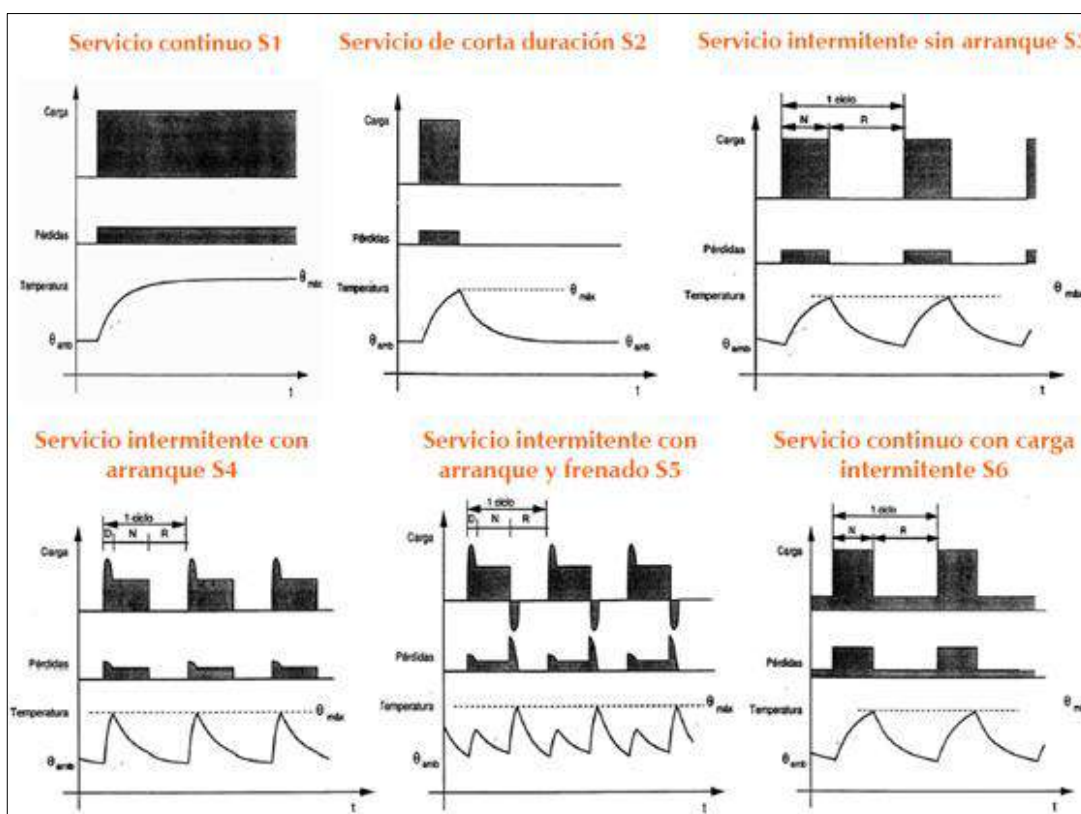


Figura 25. Tipos de servicios más comunes de motores eléctricos.
Fuente: Apuntes de Control de Máquinas Eléctricas [27]

Si se requiere un motor para una aplicación que necesite trabajar en régimen intermitente, mediante la tabla 3 se puede realizar una estimación de la capacidad de sobrecarga en función de varios parámetros. Este hecho es factible, no obstante siempre hay que tener precaución y consultar con el fabricante ya que aunque se cumplan condiciones de tamaño y clase de servicio, uno de los mayores inconvenientes de este método es el sobrecalentamiento, y cada fabricante puede proporcionar unas constantes de calentamiento y de deterioro del aislamiento. Aun así siempre es difícil calcular cuánto de vida útil se está perdiendo al sobrecargar el motor, aunque puede ser que no afecte en absoluto a la máquina. La clase de servicio a la que trabaje será clave para saber si el motor se sobrecalentará, ya que un ciclo con altibajos permite cierta refrigeración, como se puede ver en el servicio S6 de la figura 25.

S3	Nº polos	Factor de servicio (%)		
		Tamaño constructivo		
		63-100	112-250	280-400
15%	2	105	125	130
	4	110	130	130
	6-8	100	110	115
25%	2	110	130	130
	4	135	125	130
	6-8	135	125	130
40%	2	110	110	120
	4	120	110	120
	6-8	125	108	120
60%	2	105	107	110
	4	110	107	110
	6-8	115	105	110

Tabla 3. Factores de servicio.

Fuente: Apuntes de Control de Máquinas Eléctricas [27]

Tratando el tema de ahorro energético y económico, también cabe destacar la importancia del **factor de potencia** ($\cos \phi$). La potencia reactiva es un tipo de energía que consumen los motores, transformadores y todos los dispositivos que posean algún tipo de bobina que genere un campo magnético. No produce trabajo útil y perjudica la transmisión de energía a través de las líneas de distribución eléctrica, por lo que su consumo con dependencia de la potencia activa consumida está penalizado por la compañía suministradora en la tarifa eléctrica.

	fdp	€/kVarh
Tarifas	$0,80 < \cos \phi < 0,95$	0,041554
	$\cos \phi < 0,80$	0,062332

Tabla 4. Tarifas de penalización por consumo de energía reactiva.

Fuente: Iberdrola 2014 [28]

Existen más beneficios además del ahorro con respecto a dichas penalizaciones. Aumentar el factor de potencia repercute en las pérdidas por efecto Joule, reduciéndolas; También disminuye la caída de tensión en las líneas de

distribución y aumenta la capacidad de la red eléctrica. Para tener una idea de la magnitud de este problema, se estima que, considerando lo que se produce como energía extra para contrarrestar las pérdidas, si se compensara el factor de potencia, la capacidad de la Red Eléctrica Española aumentaría un 0,5%, suficiente para abastecer a Ceuta y Melilla durante dos años aproximadamente. [29]

El método más común para corregir el factor de potencia es la instalación de baterías de condensadores. Se pueden situar de forma individual con cada carga o de forma grupal, teniendo que realizar una inversión menor aunque de esta forma aparezca potencia reactiva entre las cargas y el centro de control de motores.

Otra característica básica de los motores es la necesidad de poder **regular su velocidad**. Antes se solían elegir los motores de CC para este cometido, pero su elevado precio y alto coste de mantenimiento hizo investigar acerca de la variación de velocidad en los motores de inducción de jaula de ardilla, consiguiendo varios métodos para conseguir ese ahorro.

A partir de la ecuación del deslizamiento se pueden ver las variables posibles de modificación para regular la velocidad.

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p}(1 - s) \quad [5]$$

Dos de las variables que se pueden modificar son el número de polos y el deslizamiento, pero que en la actualidad están prácticamente en desuso. Conectando los devanados del estator en serie o paralelo se puede conseguir un aumento o disminución del número de polos y por tanto de la velocidad. En cuanto al deslizamiento, se trata de reducir la tensión aplicada al motor, que como se ha visto anteriormente en los sistemas de arranque, tiene el inconveniente de que produce una disminución del par y puede no resultar efectivo.

Por otra parte, desde los años 90 ha habido un alto desarrollo de la electrónica de potencia a nivel mundial, lo que en la actualidad permite hacer uso de ella para regular la velocidad de un motor con los **variadores de frecuencia**, siendo de hecho el sistema más utilizado actualmente tanto para la regulación de velocidad como en el arranque del motor debido a la simplicidad de uso de estos aparatos, además de que provocan un mejor control de los procesos y minimizan las pérdidas en las instalaciones.

5.3. Variadores de frecuencia

Según el **reglamento CE 640/2009** [30] se entiende por variador de frecuencia o mando de regulación de velocidad como un convertidor electrónico que adapta continuamente la electricidad suministrada al motor eléctrico con el fin de controlar la potencia mecánica del motor de acuerdo con la característica de velocidad de rotación de la carga (impulsada por el motor), ajustando la entrada de corriente eléctrica trifásica de 50 Hz a una frecuencia y voltaje variables suministrados al motor.

El funcionamiento de un variador de frecuencia se basa en regular la frecuencia y la tensión de alimentación de la máquina, provocando de esta forma un desplazamiento de la curva típica del par de un motor, como se puede ver en la figura 26. Lo más conveniente es que funcione con flujo magnético nominal, y esto supone que si se proporciona una frecuencia menor que la nominal también se debe disminuir la tensión para que la relación U/f siga siendo constante, ya que el flujo depende directamente de ella. Esta es la zona denominada de flujo constante o de par máximo constante y abarca hasta la velocidad nominal de la máquina. También existe la posibilidad de hacer que el motor gire más rápido que esta velocidad, y esto se puede realizar aumentando la frecuencia y alimentando con tensión nominal, ya que una mayor tensión podría dañar el motor. Al variar sólo un parámetro provoca que el campo magnético y el par máximo disminuyan, y es por ello que esta zona de la gráfica es denominada de variación de flujo o de potencia constante.

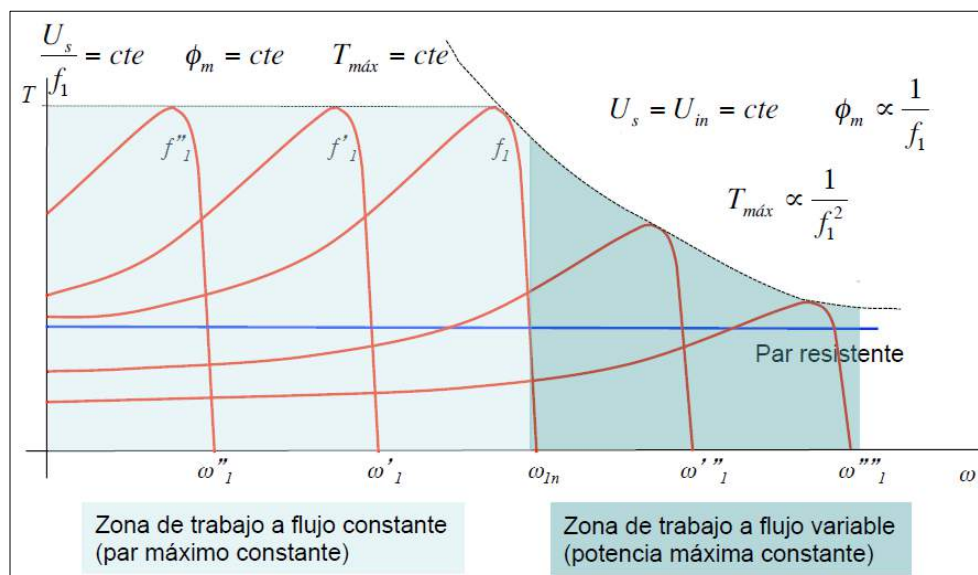


Figura 26. Modificación de la curva par-velocidad producida con un variador de frecuencia.
Fuente: Apuntes Principios de Conservación de la Energía Eléctrica [27]

A la hora de configurar un variador de frecuencia es importante definir las velocidades mínima y máxima y adecuar una frecuencia a cada una teniendo en cuenta la curva de temperatura del motor donde se relaciona frecuencia y par (ejemplo en figura 27). Esta curva depende del grado de refrigeración del motor, así como de su tamaño. El ventilador que se encarga de la refrigeración del motor basa su eficacia en la velocidad del rotor, ya que están unidos. Cuando se disminuye la velocidad de un motor también se está refrigerando menos, por lo que la máquina podrá dar menos par para evitar sobrecalentarse. En el caso de aumentar demasiado la velocidad, el motor se calentará más de lo que el ventilador puede disipar. Es por ello que hay que tener precaución con configurar la máxima velocidad con la frecuencia nominal (50 Hz ó 60 Hz), ya que se podría dar el caso de que el par que aportara a baja velocidad no fuese suficiente. Lo ideal es encontrar el equilibrio, perdiendo algo de par en las dos zonas pero suficiente como para seguir funcionando. Evidentemente, si la refrigeración es externa, el problema que surge con la baja velocidad desaparece, tal y como puede verse en la figura 27.

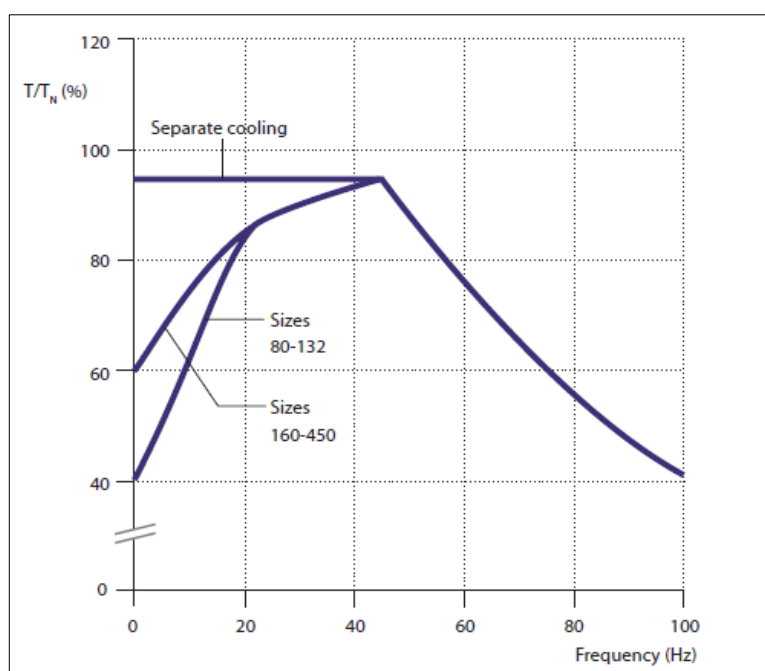


Figura 27. Curva de temperatura frecuencia-par.
Fuente: ABB. 2014 [31]

La disposición del variador con respecto al motor se puede realizar en lazo abierto o cerrado. En el primer caso, el variador responde a las variaciones impuestas desde el control regulando su salida basándose en parámetros prefijados. La regulación en lazo cerrado consiste en colocar además un regulador (PI ó PID) entre el control y el variador. Este dispositivo electrónico se encarga de que, cada vez que se realiza un cambio desde el control, la diferencia entre el valor nuevo y el anterior sea nula, es decir que los parámetros se igualen. El regulador va enviando la información necesaria al variador que irá aumentando o

disminuyendo su salida hasta conseguir el objetivo. Para esto también se necesita tomar muestras reales del motor mediante encoders o similares que permita al regulador comparar y realizar su cometido.

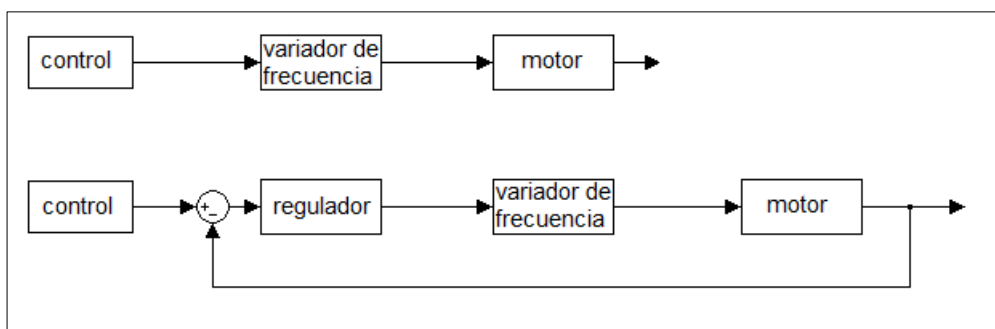


Figura 28. Conexión del variador de frecuencia en lazo abierto y cerrado
Fuente: Elaboración propia

Evidentemente, si el uso que se le va a dar al motor va a ser un régimen S1 o prácticamente continuo como puede ser un accionamiento tipo cinta transportadora, tal vez no sea tan importante la utilización de un variador de frecuencia ya que sólo sería de utilidad para arranques y paradas, consiguiendo únicamente suavidad en estos procesos así como cierto ahorro, y para este cometido existen otros aparatos electrónicos denominados arrancadores suaves, menos eficientes y con el problema de par ya que se basan en la disminución de la tensión de entrada, como se explicó anteriormente, pero más económicos que los variadores de frecuencia. En cambio existen otras aplicaciones industriales como ventiladores o bombas donde los variadores son de gran utilidad. La necesidad de variación de flujo en estos accionamientos es elevada y antes de que existieran métodos electrónicos lo que se utilizaba eran remedios mecánicos que modificaban el flujo y presión (método de estrangulamiento). De esta forma se conseguía el objetivo necesario pero en cambio el motor mantenía su consumo energético ya que seguía trabajando a velocidades más altas que las requeridas. Gracias a los variadores de frecuencia se puede regular directamente la velocidad del motor provocando una **disminución del ruido y un ahorro eléctrico** considerable, teniendo en cuenta la relación cúbica entre velocidad y potencia eléctrica. Una de las grandes ventajas de los variadores es la **posibilidad de automatización**, pudiendo programar los valores desde el control y consiguiendo de esta forma un aumento en la flexibilidad, eficiencia y productividad del proceso. Además, estos dispositivos poseen un factor de potencia prácticamente unitario, por lo que evita el uso de baterías de condensadores y consumo de energía reactiva.

$$\text{Caudal: } q = q_0 \times \frac{n}{n_0} \quad [6] \quad \text{Potencia: } P = P_0 \times \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad [8]$$

$$\text{Presión: } p = p_0 \times \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad [7] \quad \text{Nivel potencia } L = L_0 + 50 \log\left(\frac{n}{n_0}\right) \quad [9]$$

sonora:

Los accionamientos de **bombas y ventiladores** son muy comunes en la industria, llegando a acaparar alrededor de un 50% de la energía eléctrica consumida por accionamientos en el ámbito industrial. Es por ello que la inclusión de los variadores ha sido de gran importancia para el ahorro energético.

Siemens posee una herramienta informática denominada SinaSave [32] dedicada a bombas y ventiladores donde es posible calcular la diferencia de consumo energético entre un sistema con arrancador y estrangulamiento y otro con variador.

A continuación se presenta una comparación realizada con SinaSave de la energía consumida para una bomba con las especificaciones que se muestran en la tabla 5 y que hacen que sea necesario utilizar un motor SIEMENS SIMOTICS SD Basic Line de 160 kW para los dos sistemas de control.

Pump head (m)	Flujo (m ³ /h)	Velocidad (rpm)	Días de operación/año	Densidad del fluido (kg/m ³)
150	250	1450	365	1000 (Agua)

Porcentaje de flujo	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Rendimiento bomba	15,2	29,0	40,0	49,0	55,9	60,0	64,2	66,9	68,3	69,0
Horas de operación	0	0	1	2	3	4	3	4	4	3

Drive System 1 Arrancador / Estrangulamiento		Drive System 2 Variador de frecuencia	
Motor SIMOTICS SD Basic Line		Motor SIMOTICS SD Basic Line	
Potencia (kW)	160	Potencia (kW)	160
Velocidad (rpm)	1490	Velocidad (rpm)	1490
Rendimiento	IE2 94,9%	Rendimiento	IE2 94,9%
Arrancador SIRIUS 3RW Soft Starter		Variador SINAMICS G130	
Potencia (kW)	160	Potencia (kW)	160
Corriente (A)	280	Corriente (A)	302
Rendimiento	99,94%	Rendimiento	97,60%
Red 3AC / 400V / 50Hz		Red 3AC / 400V / 50Hz	

Tabla 5. Especificaciones de la bomba y los dos sistemas para SinaSave.
Fuente: Elaboración propia

Introduciendo los valores anteriores, la herramienta informática proporciona una gráfica (figura 29) donde se puede ver la potencia que demanda la bomba y los dos sistemas en cada punto de funcionamiento de flujo. Se aprecia cómo la curva referente al sistema con variador de frecuencia (drive system 2) prácticamente se solapa con la curva de potencia de la bomba, y es por ello que este sistema ahorra tanta energía, porque hace que el motor proporcione la potencia necesaria, sólo añadiendo al balance las pérdidas del propio variador que van aumentando a

medida que se aumenta la potencia. Además muestra en cifras la energía consumida por los dos sistemas en un año mediante los valores de horas de trabajo para cada flujo introducidos anteriormente.

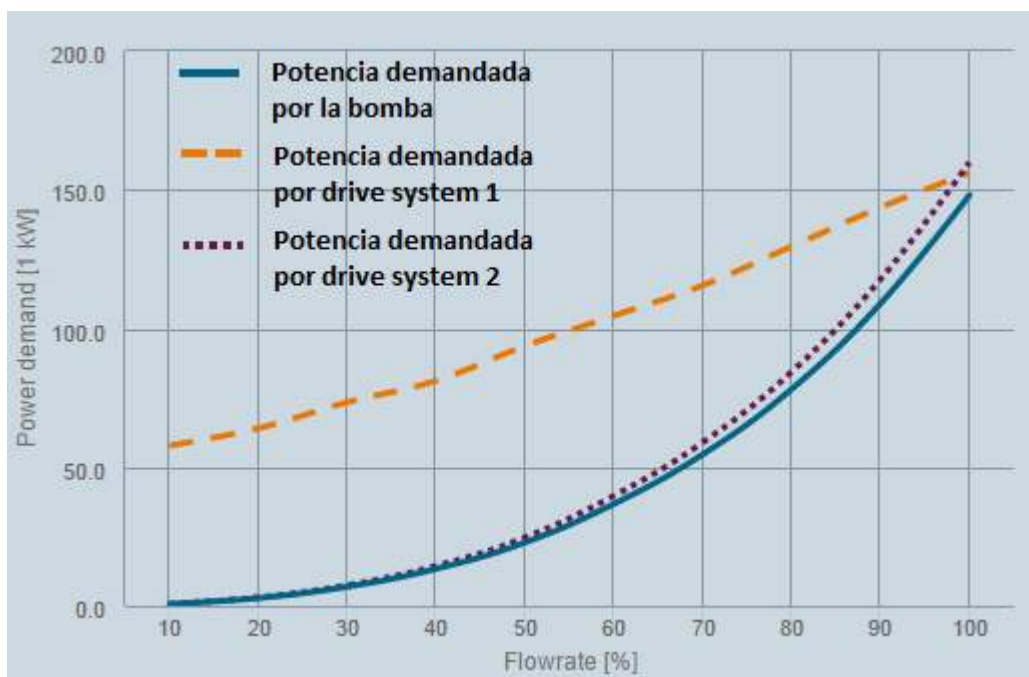


Figura 29. Comparación entre sistema de bomba con arrancador y bomba con variador.
Fuente: SinaSave.

Energía DriveSystem 1 (kWh/año)	Energía DriveSystem 2 (kWh/año)	Ahorro de energía (kWh/año)	Ahorro emisiones CO ₂ (t/año)
1.037.877	632.996	404.881	255,9

Tabla 6. Resultados energéticos de SinaSave.
Fuente: Datos de SinaSave.

Además de poder ver la diferencia energética, SinaSave también proporciona una visión comercial de los sistemas seleccionados, proporcionando al usuario el precio del motor, arrancador y variador escogidos, así como las cifras económicas de ahorro de energía (con la tarifa energética que se desee) y el tiempo de amortización, ya que los variadores son mucho más caros que los arrancadores aunque después resulte rentable la inversión.

Coste energía ahorrada (€)	Coste de inversión de Drive System 1 (€)	Coste de inversión de Drive System 2 (€)	Amortización en meses	Amortización en horas de trabajo
56.683	30.000	39.878	2,1	1527

Tabla 7. Resultados económicos de SinaSave.
Fuente: Datos de SinaSave.

Por último señalar que la comparación ha sido realizada con dos motores exactamente iguales y con el mismo nivel de eficiencia (IE2). Si se considerara el sistema de variador con el mismo motor pero con un nivel IE3 de rendimiento, los resultados son los siguientes:

Coste energía ahorrada (€)	Coste de inversión de Drive System 1 (€)	Coste de inversión de Drive System 2 (€)	Amortización en meses	Amortización en horas de trabajo
57.516	30.000	42.878	2,7	1.961

Tabla 8. Resultados energéticos de SinaSave IE3 vs IE2.
Fuente: Datos de SinaSave.

5.4. Normativa y regulación

Como se ha dicho anteriormente, la eficiencia de un motor depende de su rendimiento, es decir de las pérdidas existentes entre la energía eléctrica que se le suministra y la energía mecánica que proporciona. Para realizar los cálculos de las pérdidas y del rendimiento existen ciertas normativas que normalizan los mecanismos de obtención. Existen normas internacionales que regulan lo anterior (IEC y IEEE), pero también normativas estadounidenses (NEMA), europeas (EN) y nacionales de cada país. Los fabricantes de motores pueden elegir la norma y métodos que utilizan para determinar el rendimiento de sus motores, pero deberán indicar en la documentación qué método ha sido utilizado. En este caso se desarrollará de manera breve la norma española **UNE-EN 60034-2-1:2009** que adopta la normativa internacional IEC 60034-2-1:2007 en lo referente a la determinación de las pérdidas y rendimiento de motores de inducción trifásicos:

El cálculo del **rendimiento** (η) de un motor se puede realizar de forma directa o indirecta. Si se sigue el primer método, sólo se implica en el cálculo la potencia eléctrica de entrada en función de voltaje y corriente, y la potencia mecánica de salida en función de la velocidad y par del eje. Una variante de este procedimiento es la medida de la entrada y salida eléctricas en dos máquinas conectadas en oposición con objeto de eliminar la potencia mecánica del cálculo, ya que es compleja de medir.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad [10]$$

Funcionamiento como motor:

P_1 = Potencia eléctrica (entrada) [W]

P_2 = Potencia mecánica (salida) [W]

La medición indirecta consiste en medir la potencia eléctrica de entrada e ir restando los distintos tipos de pérdidas en el motor hasta llegar a la mecánica de salida. De esta manera se tiene un conocimiento más concreto sobre las pérdidas de la máquina, pudiendo realizar un estudio más específico.

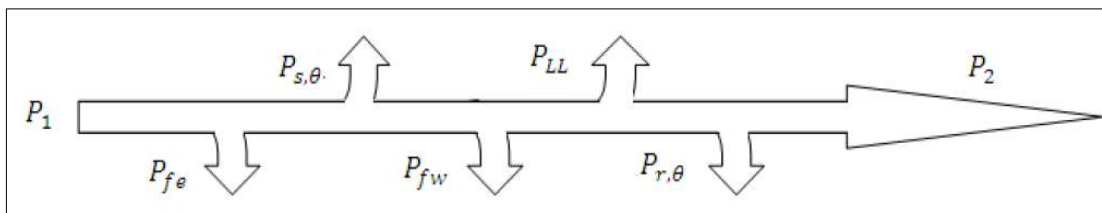


Figura 30. Balance de pérdidas en un motor eléctrico.

Fuente: Guardiola de Cabo, Luis Antonio. Análisis de la norma IEC 60034-2-1 [34]

-Pérdidas por rozamiento y ventilación (P_{fw}): Son las provocadas por el rozamiento mecánico y aerodinámico, incluyendo la energía absorbida por los ventiladores.

-Pérdidas en el bobinado (P_s , P_r): Son las producidas en los conductores de las bobinas del estator y del rotor.

-Pérdidas en carga adicionales (P_{LL}): Son las producidas por la corriente de carga en el hierro activo y en otras partes metálicas que no sean los conductores. Estas pérdidas son producidas por las denominadas corrientes de Foucault o parásitas.

-Pérdidas en el hierro (P_{Fe}): Pérdidas en el hierro de las partes activas y pérdidas adicionales en vacío en otras partes metálicas.

Éstas son las pérdidas que se pueden hallar en un motor trifásico de inducción. Se deben realizar ensayos en vacío (sin carga) para determinar las llamadas pérdidas constantes y después los ensayos de carga, todos ellos con diferentes valores de tensión que se indican en la norma. Además hay que tener en cuenta que hay que realizar correcciones de temperatura (θ) en función de qué pérdidas se estén hallando.

La norma UNE-EN 60034-2-1:2009 permite determinar las pérdidas de carga mediante distintos métodos; de esta forma se pueden determinar mediante **ensayo de carga**, ensayo de carga a tensión reducida o mediante el circuito equivalente. Si se sigue el primer procedimiento, se han de hallar las pérdidas en el estator y rotor con su corrección de temperatura correspondiente. Además también existen las pérdidas en las escobillas, pero sólo en los rotores bobinados, no en los de tipo jaula de ardilla.

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad [11]$$

$$P_{s,\theta} = P_s + k_\theta \quad [12]$$

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad [13]$$

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{Fe}) \times s \times k_\theta \quad [14] \quad s = \text{Deslizamiento}$$

I = Intensidad [A]

R = Resistencia del estator [Ω]

k_θ = Factor de corrección

θ_w = Temperatura del devanado según aislamiento [$^\circ\text{C}$]

θ_c = Temperatura de entrada del fluido refrigerante [$^\circ\text{C}$]

Para determinar las pérdidas adicionales en carga también existen varias posibilidades: **Ensayo de carga con medición de par**, ensayo con rotor extraído y con rotación inversa, tolerancia asignada y ensayo *Eh-estrella*. Como en el caso anterior, se explicará brevemente el primer método citado. Consiste en ensayar el motor con distintos puntos de carga y registrar los valores de las pérdidas residuales para cada punto, lo que resultará en una recta aproximando los puntos mediante mínimos cuadrados. De esta manera se puede generar una ecuación que determinará el valor de las pérdidas adicionales según el par que esté aplicando el motor.

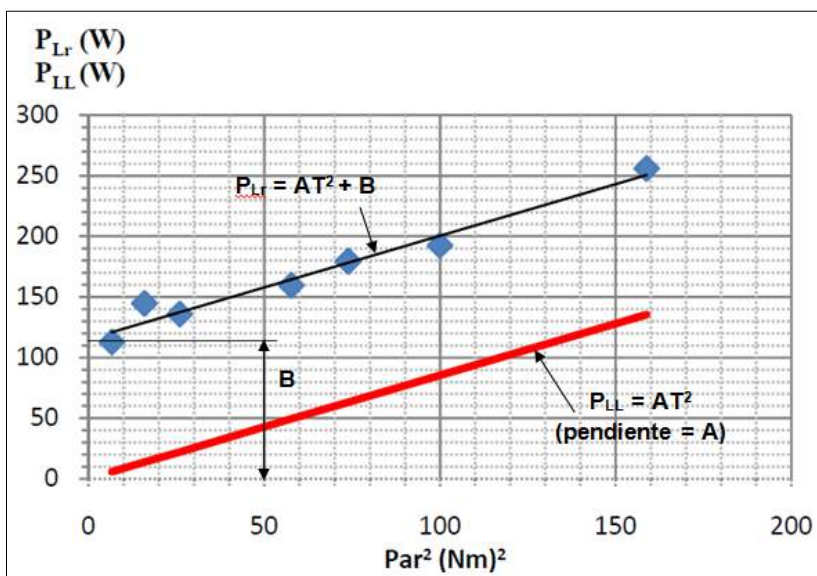


Figura 31. Alisado de los datos de las pérdidas residuales.

Fuente: Guardiola de Cabo, Luis Antonio. Análisis de la norma IEC 60034-2-1 [34]

Aunque existen algunas diferencias entre las dos normas internacionales referentes al rendimiento de motores (IEEE-112 y IEC 60034-2-1) como es el caso del cálculo de ciertos parámetros, el rendimiento resultante del motor es muy similar si se utiliza el método de separación de pérdidas, procedimiento que es considerado el más fiable, especialmente cuando mayor es la potencia del motor en cuestión.

Una vez se conoce el rendimiento de un motor, se debe clasificar según normativa. La última reglamentación internacional referente a este tema fue lanzada recientemente en Agosto de 2014 como IEC 60034-30-1:2014, lo que equivale a **EN 60034-30-1:2014** como norma europea.

La clasificación engloba los motores de potencias nominales comprendidas entre 0,12 y 1000 kW con un número de polos posible de 2, 4, 6 u 8 y una frecuencia de alimentación de 50 ó 60 Hz. La designación de la clase de rendimiento energético consta de las letras "IE" (abreviatura de International Energy-efficiency Class) seguidas inmediatamente de la cifra 1, 2, 3 ó 4 que describirá progresivamente un nivel mayor de eficiencia.

Output kW	IE1				IE2				IE3				IE4			
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0,12	45,0	50,0	38,3	31,0	53,6	59,1	50,6	39,8	60,8	64,8	57,7	50,7	66,5	69,8	64,9	62,3
...
5,5	84,7	84,7	93,1	81,4	87,0	87,7	86,0	83,8	89,2	89,6	88,0	86,2	90,9	91,9	90,5	88,3
7,5	86,0	86,0	84,7	83,1	88,1	88,7	87,2	85,3	90,1	90,4	89,1	87,3	91,7	92,6	91,3	89,3
11	87,6	87,6	86,4	85,0	89,4	89,8	88,7	86,9	91,2	91,4	90,3	88,6	92,6	93,3	92,3	90,4
15	88,7	88,7	87,7	86,2	90,3	90,6	89,7	88,0	91,9	92,1	91,2	89,6	93,3	93,9	92,9	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	86,9	90,9	91,2	90,4	88,6	92,4	92,6	91,7	90,1	93,7	94,2	93,4	91,7
22	89,9	89,9	89,2	87,4	91,3	91,6	90,9	89,1	92,7	93,0	92,2	90,6	94,0	94,5	93,7	92,1
30	90,7	90,7	90,2	88,3	92,0	92,3	91,7	89,8	93,3	93,6	92,9	91,3	94,5	94,9	94,2	92,7
37	91,2	91,2	90,8	88,8	92,5	92,7	92,2	90,3	93,7	93,9	93,3	91,8	94,8	95,2	94,5	93,1
45	91,7	91,7	91,4	89,2	92,9	93,1	92,7	90,7	94,0	94,2	93,7	92,2	95,0	95,4	94,8	93,4
55	92,1	92,1	91,9	89,7	93,2	93,5	93,1	91,0	94,3	94,6	94,1	92,5	95,3	95,7	95,1	93,7
75	92,7	92,7	92,6	90,3	93,8	94,0	93,7	91,6	94,7	95,0	94,6	93,1	95,6	96,0	95,4	94,2
90	93,0	93,0	92,9	90,7	94,1	94,2	94,0	91,9	95,0	95,2	94,9	93,4	95,8	96,1	95,6	94,4
110	93,3	93,3	93,3	91,1	94,3	94,5	94,3	92,3	95,2	95,4	95,1	93,7	96,0	96,3	95,8	94,7
132	93,5	93,5	93,5	91,5	94,6	94,7	94,6	92,6	95,4	95,6	95,4	94,0	96,2	96,4	96,0	94,9
160	93,8	93,8	93,8	91,9	94,8	94,9	94,8	93,0	95,6	95,8	95,6	94,3	96,3	96,6	96,2	95,1
200	94,0	94,0	94,0	92,5	95,0	95,1	95,0	93,5	95,8	96,0	95,8	94,6	96,5	96,7	96,3	95,4
250	94,0	94,0	94,0	92,5	95,0	95,1	95,0	93,5	95,8	96,0	95,8	94,6	96,5	96,7	96,5	95,4
315	94,0	94,0	94,0	92,5	95,0	95,1	95,0	93,5	95,8	96,0	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
355	94,0	94,0	94,0	92,5	95,0	95,1	95,0	93,5	95,8	96,0	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
400	94,0	94,0	94,0	92,5	95,0	95,1	95,0	93,5	95,8	96,0	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
450	94,0	94,0	94,0	92,5	95,0	95,1	95,0	93,5	95,8	96,0	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4
500-1000	94,0	94,0	94,0	92,5	95,0	95,1	95,0	93,5	95,8	96,0	95,8	94,6	96,5	96,7	96,6	95,4

Tabla 9. Límites nominales (%) para rendimiento IE1, IE2, IE3 y IE4 a 50 Hz.

Fuente: Datos de ABB [\[36\]](#)

De manera complementaria, en la norma EN 60034-30-1:2014 se indica una descripción de cada cifra, denominando a IE1 como estándar, IE2 como alta, IE3 como Premium e IE4 como superpremium. Además, se indica que la tipología IE5 se encuentra en fase de estudio tanto por fabricantes como organismos normativos y que el objetivo es poder reducir en un 20% las pérdidas de un motor con eficiencia IE4.

Aparte de la clasificación internacional IEC existen otros tipos de nomenclatura de eficiencia como por ejemplo la estadounidense NEMA, la cual realiza la equivalencia NEMA Premium a IE3 y EAct a IE2. Europa también poseía una clasificación propia mediante CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics), la cual igualaba su nivel de eficiencia EFF1 a IE2, EFF2 a IE3 y EFF3 a una eficiencia menor a la estándar. Se trata de una clasificación todavía común pero que realmente dejó de ser empleada a partir de 2011 por iniciativa del propio comité CEMEP.

	CEMEP	EEUU	IEC 60034-30
Super Premium Efficiency			IE4
Premium Efficiency		NEMA Premium	IE3
High Efficiency	EFF1	EAct	IE2
Standard Efficiency	EFF2		IE1
Below Standard Efficiency	EFF3		

Tabla 10. Relación entre las distintas nomenclaturas de eficiencia de motores eléctricos.
Fuente: Morena, Javier de la. Fenercom 2013 [37]

En cuanto a la obligatoriedad de los tipos de eficiencia, siguiendo el **reglamento CE 640/2009** [30], a partir del 16 de Junio de 2011 el nivel de rendimiento de los motores con potencia nominal entre 0,75 y 375 kW no podía ser inferior a IE2. La siguiente fecha a tener en cuenta es la actual, ya que se indica que a partir del 1 de **Enero de 2015** los motores con potencias comprendidas entre 7,5 y 375 kW deberán tener la clase de **eficiencia IE3** o al nivel IE2 si está equipado con un mando regulador de velocidad. Como último horizonte programado se encuentra 2017, donde se aplica la misma norma anterior pero afectando a los motores de potencias entre 0,75 y 375 kW, completando de esta manera con los motores de baja potencia.

5.5. Motores eficientes

Hasta hace poco tiempo, cuando se requería la adquisición de un nuevo motor era común realizar la selección en función del coste inicial de la máquina. Sin embargo, otro criterio a tener en cuenta, incluso de mayor importancia, es el consumo energético del motor.

Estadísticamente, para cada euro invertido en la compra de un motor, 100 euros más se emplearán en su funcionamiento durante los siguientes 10 años. Estos gastos engloban los consumos energéticos y las necesidades de mantenimiento, poniendo de relieve la importancia de la eficiencia del motor seleccionado y el tipo, ya que el motor con jaula de ardilla es el más común por su bajo nivel de mantenimiento, lo que todo esto se traduce en menores pérdidas económicas.

Utilizar un motor con un rendimiento lo más alto posible siempre es algo a tener en cuenta, pero también es importante el uso que se le dará a la máquina. Si se utilizará en un servicio de corta duración o intermitente, tal vez no sea tan importante y las diferencias entre un nivel de rendimiento y otro no sean tan significativas, ya que en estos servicios lo más importante es la zona del arranque, la cual ya se ha comentado anteriormente cómo solucionar su alto consumo energético. Sin embargo, cuando se trata de un motor que se utilizará en servicio continuo, su nivel de eficiencia es fundamental.

Existen algunas fórmulas sencillas para realizar un cálculo aproximado de las diferencias energéticas y económicas entre los niveles de eficiencia.

$$C_T = P_i + \frac{P \times TO \times R}{\eta} \quad [15]$$

C_T =Coste total [€]
 P_i =Precio inicial del motor [€]
 P =Potencia del motor [kW]
 TO =Tiempo de operación del motor (vida útil) [h]
 R =Tarifa de la compañía [€/kW]
 η =Rendimiento del motor

$$A_A = P \times R \times TR \times \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \quad [16]$$

A_A =Ahorro anual [€]
 TR =Tiempo de operación de trabajo al año [h/año]

Una comparativa general realizada con los últimos motores de jaula de ardilla desarrollados de eficiencia IE4 pone de manifiesto las grandes ventajas de adquirir un motor con la más alta eficiencia. Seleccionando por ejemplo, dos motores de 200 kW y 3000 rpm para actuar en régimen continuo (8760 h/año) y a

plena carga, siendo uno de clase IE3 con un rendimiento del 95,8%, y el otro de clase IE4 con un 97,1%. A simple vista puede parecer que la diferencia entre las eficiencias de las dos máquinas no es muy significativa, pero a continuación se puede ver cómo influye en la parte económica y de pérdidas energéticas.

Potencia (kW)	Velocidad (rpm)	Polos	Tarifa (€/kWh)	TR (h)	CO ₂ (kg/kWh)
200	3000	2	0,14	8760	0,6*

*Fuente: ABB

	η	Peso (kg)	L _{PA} (dB)	Cos φ	Pérdidas (kW)	Consumo (kWh/año)	Gasto (€/año)
Motor IE3	0,958	1.190	81	0,88	8,768	1.828.810	256.033
Motor IE4	0,971	1.220	77	0,90	5,973	1.804.325	252.606

ΔR_{dto} (%)	Δ Pérdidas (kW)	Δ Pérdidas (%)	Δ Consumo (kWh/año)	Δ CO ₂ (t)	Δ Gasto (€/año)
1,34	2,795	31,9	24.485	14,7	3.428

Tabla 11. Comparativa entre motores con eficiencia IE3 y IE4.

Fuente: Elaboración propia

Al realizar esta comparativa hay que tener en cuenta que se están comparando dos motores de una potencia considerable y con una alta velocidad nominal, por lo que cualquier mínima mejora se puede traducir en una gran diferencia. Esto sucede por ejemplo con el rendimiento, que con tal sólo **un incremento de poco más de un 1% se traduce en una reducción del 30% en las pérdidas**, lo que a su vez conlleva un ahorro de unos 3.500 € habiendo pasado un año de funcionamiento continuo y a plena carga. Además se puede destacar el ahorro de 14,7 toneladas de CO₂ de emisiones al medio ambiente, lo que equivale a las emisiones de un vehículo estándar (150 gCO₂/km) recorriendo casi 100.000 km.

Si además se consideran los precios de ambos motores, 22.100 y 26.200 € respectivamente, se puede ver cómo con respecto al valor obtenido en el incremento de gasto anual, en poco más de un año se habría recuperado la diferencia entre los precios.

5.6. Selección de motores

En apartados anteriores se ha comentado que los motores más comunes en el ámbito industrial son los de inducción con rotor de jaula de ardilla o en su defecto con rotor cortocircuitado. Es por ello que, cuando se proceda a seleccionar un determinado motor, se dará por supuesto el tipo de motor a seleccionar y se tendrán en cuenta el resto de factores que se comentan a continuación. [38]

El **lugar de la instalación** donde se ubicará el motor es un factor más importante de lo que pueda parecer a simple vista, y en ocasiones se pasa por alto. Por norma, los motores están diseñados para trabajar con 40°C de temperatura ambiente y a una altitud menor de 1000 msnm. Cualquier ambiente por encima de estas condiciones hará que el motor trabaje por debajo de sus valores nominales. En el caso de la altitud, la mayoría de los motores de jaula de ardilla tienen refrigeración por aire, y a mayor altitud el aire se vuelve más denso, por lo que para una misma velocidad se obtendrá menor flujo de aire. Con el componente de la temperatura ambiente ocurre que la refrigeración diseñada no está preparada para temperaturas superiores, lo que desemboca en el mayor deterioro de los aislamientos. Estos factores son acumulables, por lo que los factores se ven multiplicados, provocando que aunque la ubicación del motor esté por encima de los 1000 msnm pueda compensarse si la temperatura ambiente es menor de 40 °C.

Temperatura (°C)	30	40	45	50	55	60	70	80
Pot. Adm. (%P_n)	107	100	96,5	93	90	86,5	79	70
Altitud (msnm)	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	
Pot. Adm. (%P_n)	100	96	92	88	84	80	76	

Tabla 12. Potencia admisible en función de la temperatura y altitud.
Fuente: Apuntes Máquinas Eléctricas Rotativas [27]

El siguiente factor a tener en cuenta es el **grado de protección** necesario del motor en cuestión. En función de la localización donde trabajará la máquina podrá verse afectado por diversos agentes externos. Por ello existe un código de protección denominado IP (Internal Protection) facilitado por el fabricante y que, seguido de distintas cifras, proporciona una información acerca de la protección de la máquina, indicando la primera cifra la seguridad contra el ingreso de elementos sólidos, y la segunda de elementos líquidos. Las protecciones más comunes son:

-IP21: Protección frente al contacto con los dedos, el ingreso de cuerpos sólidos mayores de 12 mm y gotas verticales de agua.

-IP22: Mismo nivel que el anterior pero añadiendo la protección frente a gotas de agua con una inclinación hasta 15° con la vertical.

-IP55: Protección completa frente a contacto, acumulación de polvos nocivos y chorros de agua en todas direcciones.

La carga define el **factor mecánico**, así como la potencia y velocidad del motor. Es conveniente realizar un estudio del momento de inercia y la curva par-velocidad de la carga y con estos datos poder definir el comportamiento dinámico del motor y el tiempo de arranque. Es importante recalcar que los comportamientos de los distintos accionamientos no son similares, de esta forma una bomba requerirá de atención en ciertos puntos distintos a los de una cinta transportadora.

El siguiente componente es **la red**, la cual es caracterizada por tensión y frecuencia, siendo esta última normalizada a 50 Hz en la zona europea y a 60 Hz en la mayor parte del continente americano. En cuanto a la tensión, dada la diversidad de aplicaciones existentes en industrias, los valores oscilan entre 220 y 480 V para baja tensión y entre 2,3 y 6,6 kV para alta tensión.

El **método de arranque** se llevará a cabo garantizando un menor calentamiento del motor y una menor corriente consumida, tal y como se ha explicado en el apartado 4.2.

Como últimos factores a tener en cuenta se encuentran la **potencia y eficiencia** del motor. La primera es consecuencia de la velocidad de rotación y el par requerido por el motor. Además se puede tener en cuenta el factor de servicio explicado en el apartado 4.2. en función del ciclo que vaya a desarrollar. En cuanto a rendimiento, es un factor importante para el ahorro energético ya que determina las pérdidas de potencia que posee el motor.

Capítulo 6. HERRAMIENTA INFORMÁTICA

Se ha desarrollado una aplicación informática mediante un libro de Excel y programación en Visual Basic cuya utilidad es la **selección y comparación energética y económica** de dos motores asíncronos con rotor de jaula de ardilla.

Cabe destacar que el objetivo final es la comparación energética y económica, por lo que el dato principal será la potencia del accionamiento, aunque realmente existen otros factores a tener en cuenta a la hora de elegir un motor eléctrico como se ha mencionado en el apartado anterior.

6.1. Estructura de la herramienta

Primero, al abrir la aplicación se debe elegir entre el tipo de servicio que llevará a cabo el motor: continuo o intermitente.

Para el caso de motor en **servicio continuo** se debe insertar la potencia necesaria para el accionamiento, así como las condiciones externas de temperatura y altitud que pueden modificar los kilovatios necesarios ya que los motores se ven afectados por estos factores según la tabla 12. El resultado se puede ver debajo de “Potencia mínima del motor recomendada” al pulsar en el botón “Calcular”.

Más abajo se encuentran los valores prefijados de “Tarifa energética”, “Tiempo de trabajo” y “Emisiones CO₂”, todos ellos modificables por el usuario. La tarifa se ha situado en 0,14 €/kWh de manera aproximada según la situación actual en España. El tiempo de trabajo se encuentra en 8760 h/año, lo que supone un año entero sin parada de ningún tipo. Por último las emisiones de CO₂ se han situado en 0,6 kg/kWh.

En función del valor de potencia obtenido, el usuario debe buscar dos motores que cumplan las condiciones necesarias para el accionamiento e introducir sus características en las tablas, teniendo en cuenta que el Motor1 debe ser el de menor rendimiento para evitar valores negativos en posteriores análisis. Tras insertar sus datos, el usuario debe pulsar el botón “Cálculo energético” y los resultados individuales y comparativos de los dos motores aparecerán en la parte derecha de la pantalla. En el cálculo del gasto económico en energía reactiva se han seguido las tarifas de la tabla 4. Además, más abajo se puede ver una gráfica lineal donde es representado el gasto económico frente al tiempo. Se puede apreciar en qué punto el motor de mayor rendimiento comienza a ser más rentable económicamente que el de menor eficiencia, denominando este punto como “Tiempo de equilibrio” y la diferencia de gasto total a los 20 años de vida útil, indicando este valor como “Ahorro total”. También se puede ver la evolución anual de manera numérica en la tabla situada bajo la gráfica.

Para terminar, el usuario puede clicar en el botón “Generar informe” y obtendrá los valores individuales, comparativos y la gráfica impresas en un archivo con formato pdf. Un ejemplo de este documento se puede ver en el anexo I.

Si en la pantalla principal la elección es **servicio intermitente**, el usuario se encontrará con una pantalla de apariencia similar a la del servicio continuo, pero con ciertas diferencias que se explican a continuación.

En este caso, en lugar de indicar una única potencia necesaria para el accionamiento, se deben introducir las distintas potencias con sus respectivos tiempos durante un ciclo, la duración del ciclo, el número de ciclos al día y el número de días al año que estará en funcionamiento. Además es importante tener cuidado al insertar los periodos de los ciclos ya que si su suma no coincide con la duración del ciclo indicada o el tiempo de funcionamiento diario supera las 24 horas, el programa hará saltar un aviso de error.

Una vez que han sido introducidos los valores de potencias y tiempos, el usuario debe clicar en “Calcular” para obtener la potencia mínima recomendada. Esta potencia es hallada mediante una media ponderada cuyos pesos son los tiempos de cada potencia, consiguiendo de esta forma una potencia necesaria menor que la máxima (aunque el variador de frecuencia sí debe estar dimensionado para la potencia mayor del ciclo). Aunque se trate de una media ponderada se pueden dar casos donde la máxima potencia sea muy elevada con respecto a la proporcionada por el programa y/o su tiempo en el ciclo sea relevante. Por esto último se ha introducido un coeficiente de seguridad variable basado en la tabla 3 que asegura que si la potencia media ponderada es menor que el 80% de la potencia máxima y ésta es necesaria durante al menos un 15% del tiempo total del ciclo, el resultado se verá incrementado hasta alcanzar el 80% de la potencia máxima del ciclo. Si la duración del periodo con mayor potencia llegase a superar el 40% del tiempo del ciclo, el coeficiente se incrementaría hasta alcanzar el 90% de la potencia máxima. Tras este incremento, el resultado se verá modificado por los coeficientes de altitud y temperatura. En el caso de que la media ponderada y el tiempo de potencia máxima no se encuentren entre lo anterior, sólo se aplicarán las condiciones ambientales al resultado.

Habiendo obtenido la potencia recomendada se debe proceder de la misma manera que en el apartado anterior, con excepción de las eficiencias, ya que en este caso se deben introducir los rendimientos para el 100, 75 y 50% de carga debido a la variabilidad de potencias durante el ciclo. Se clica en “Cálculo energético” y se obtienen los resultados, la gráfica, el tiempo de equilibrio y el ahorro total a los 20 años de vida útil. Es importante señalar que en este caso no existe consumo de energía reactiva de la red ya que se está suponiendo el uso de variador de frecuencia.

Por último, al igual que en la ventana del servicio continuo, si se clicca en “Generar informe” se podrá disponer de toda la información relevante en un informe en formato pdf. En el anexo II se puede ver un ejemplo de este informe.

6.2. Simulación de casos

A modo de ejemplo de uso se realizarán dos simulaciones para los dos casos de la herramienta informática.

En el caso del **servicio continuo**, se ha elegido un accionamiento de 200 kW situado en un emplazamiento donde se alcanza una temperatura ambiente de 50 °C y una altitud estándar de 1000 msnm. Estos datos resultan en una potencia mínima del motor recomendada de 214 kW.

Figura 32. Herramienta informática. Potencia del accionamiento.
Fuente: Elaboración propia

Al obtener este resultado, se ha consultado un catálogo de motores de un fabricante [31] y se han elegido de hierro fundido, 3000 rpm y de una potencia semejante a la calculada, siendo uno de clase IE2 y otro IE4, de los cuales se han introducido los datos en sus respectivas casillas. En los apartados referentes al precio se han insertado 25.000 y 32.500 € respectivamente como precios estimados. En este caso también se han modificado las horas de trabajo al año ya que se considerarán 10 días reservados para revisiones y mantenimiento, dejando la cifra en 8.520 h/año.

IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cos φ	Current				Torque	Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ²	Weight kg	Sound pressure Level L _{PA} dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _N A	I _ε /I _N	T _N Nm	T _r /T _N				
3000 r/min = 2 poles				400 V 50 Hz				High-output design							
250	M3BP 315 LKA 2	3GBP311810-••G	2980	95.7	95.7	95.2	0.89	423	8.1	801	2.8	2.9	2.65	1440	78

IE4 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014

250	M3BP 315 LKB 2	3GBP311820-••M	2981	96.9	97.1	97.1	0.91	409	7.9	800	2.5	2.7	2.90	1540	77
-----	----------------	----------------	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	----

Figura 33. Herramienta informática. Datos de los motores seleccionados para servicio continuo.
Fuente: ABB. 2014. [31]

Al terminar se obtienen los resultados de cálculo energético, la gráfica, el tiempo de equilibrio y el ahorro total que se muestran a continuación.

<u>Resultados</u>		
Motor IE2	Motor IE4	
Consumo 1.905.204 kWh/año	Consumo 1.881.610 kWh/año	ΔConsumo 23.594 kWh/año
Gasto energía activa 266.728,53 €/año	Gasto energía activa 263.425,39 €/año	ΔConsumo 1,24 %
Gasto energía reactiva 40.559,40 €/año	Gasto energía reactiva 35.623,70 €/año	ΔGasto energía activa 3.303,14 €/año
Gasto energético total 307.287,92 €/año	Gasto energético total 299.049,08 €/año	ΔGasto energético total 8.238,84 €/año
		ΔEmisiones CO₂ 14.156 t/año

Tiempo de equilibrio < 1 año	Ahorro total 157.276,85 €
--	-------------------------------------

Figura 34. Herramienta informática. Resultados de servicio continuo.
Fuente: Elaboración propia.

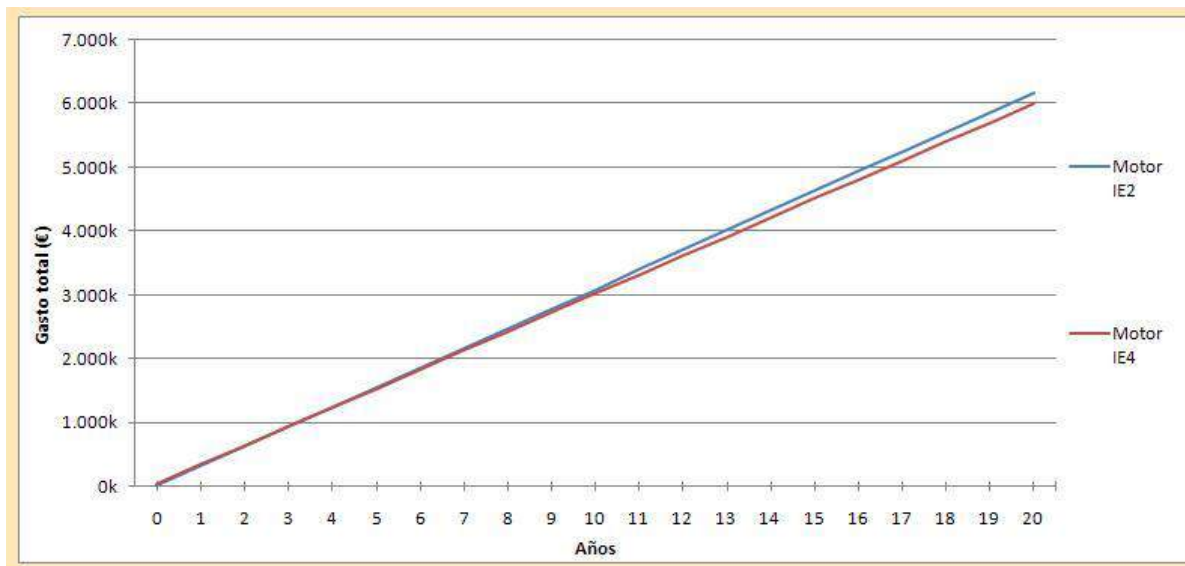


Figura 35. Herramienta informática. Gráfica (Años vs Gasto Total) de servicio continuo.
Fuente: Elaboración propia.

Para mostrar el caso de un accionamiento con **servicio intermitente** se han mantenido la temperatura y altitud estándar y se han elegido los siguientes datos referentes al ciclo de funcionamiento, modificando el número de días al año al considerar 10 días sin actividad.

	Duración del ciclo		Números de ciclos al día			Número de días al año	
	60 min		24			355	
Potencia (kW)	40	55	25	90	30	10	
Tiempo (min)	10	15	10	10	5	10	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Potencia mínima del motor recomendada 72,0 kW </div>							

Figura 36. Herramienta informática. Datos del ciclo.
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, elegimos dos motores de potencia mayor y similar a la obtenida. En este caso se tratarán de motores de hierro fundido y de 1000 rpm.

IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014																
Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cos φ	Current				Torque		Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ²	Weight kg	Sound pressure Level L _{pk} dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _N A	I _{sc} /I _N	T _N Nm	T ₁ /T _N	T ₂ /T _N				
1000 r/min = 6 poles				400 V 50 Hz				GENELEC-design								
75	M3BP 315 SMA 6	3GBP313210-**G	982	94.4	94.4	93.5	0.82	139	7.4	721	2.4	2.8	3.20	830	70	
IE4 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014																
75	M3BP 315 SMC 6	3GBP313230-**M	994	96.2	96.3	95.9	0.84	133	7.0	721	2.2	2.8	4.90	1000	67	

Figura 37. Herramienta informática. Datos de los motores seleccionados para servicio intermitente.
Fuente: ABB. 2014. [31]

En las casillas referentes al precio de cada motor se ha estimado un valor de 6.000 y 9.500 € respectivamente, quedando los siguientes resultados en la comparación.

Resultados		
Motor IE2	Motor IE4	
Consumo	Consumo	ΔConsumo
395.586 kWh/año	387.517 kWh/año	8.069,129 kWh/año
Gasto energético	Gasto energético	ΔConsumo
55.382,08 €/año	54.252,40 €/año	2,04 %
		ΔGasto energético
		1.129,68 €/año
		ΔEmisiones CO₂
		4.841 t/año
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Tiempo de equilibrio Ahorro total Entre 3 y 4 años 19.093,56 € </div>		

Figura 38. Herramienta informática. Resultados de servicio intermitente.
Fuente: Elaboración propia.

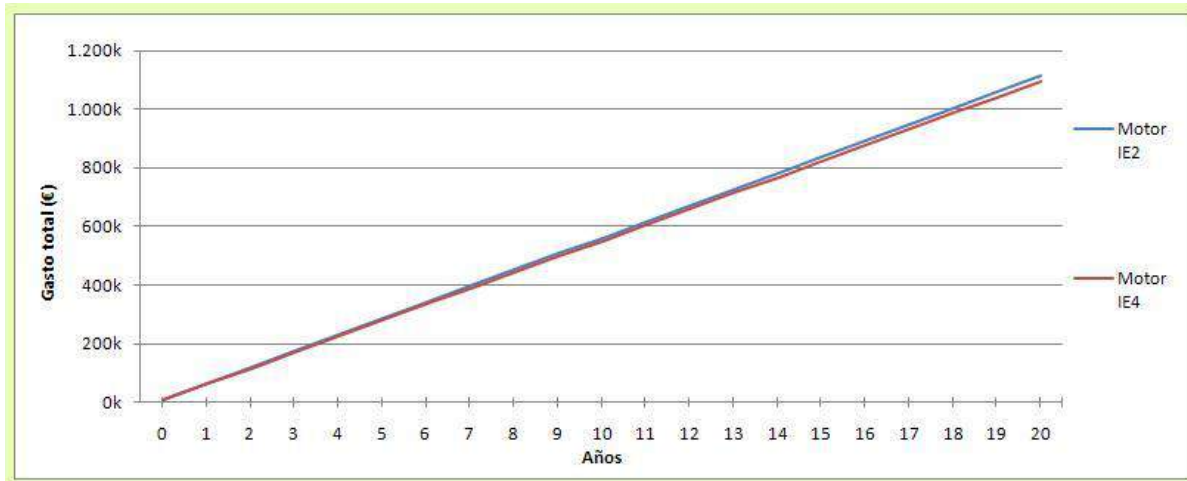


Figura 39. Herramienta informática. Gráfica (Años vs Gasto Total) de servicio intermitente.
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 7. CRONOGRAMA Y PRESUPUESTO

Las actividades necesarias para la realización de este Trabajo Fin de Grado han sido divididas en tres bloques principales como se puede ver en la figura 40. El primer bloque hace referencia a la planificación del TFG, definir sus objetivos y estructurarlo. El segundo bloque comprende los tres temas más relevantes en la memoria, como son la eficiencia, los motores eléctricos y la normativa. En el tercer bloque se presenta el desarrollo de la herramienta informática de selección y comparación de motores.

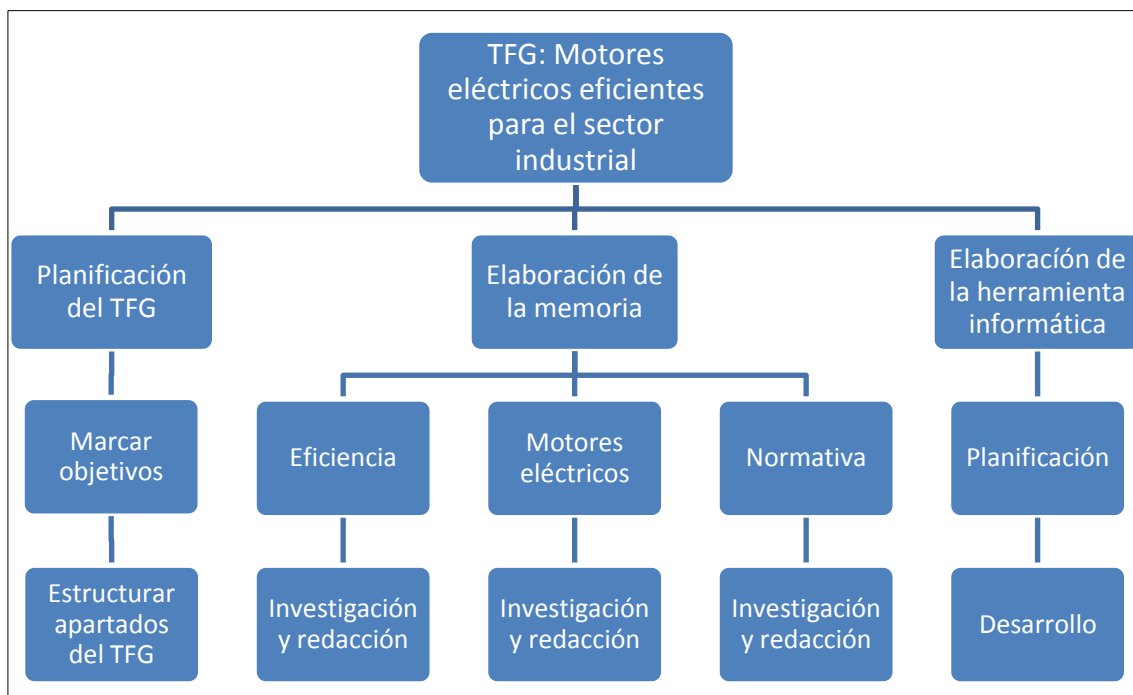


Figura 40. Desglose de la planificación.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan los recursos necesarios para la realización de este Trabajo Fin de Grado diferenciando los recursos humanos y los materiales.

Recursos humanos: La dedicación al proyecto ha sido de unas 6 horas diarias durante los 5 meses de realización, con un desglose de actividades que se muestra a continuación en la tabla 13.

Descripción	Horas
Planificación, investigación y búsqueda de información	200
Redacción	130
Realización de figuras y tablas	20
Elaboración de la herramienta informática	120
Reuniones con docentes	10
TOTAL	480

Tabla 13. Horas de dedicación al Trabajo Fin de Grado.
Fuente: Elaboración propia.

Estimando una tarifa de un técnico junior de 20 €/h, el coste total de los recursos humanos resulta en:

Total de horas dedicadas x Tarifa (€/h) = 480 x 20 = 9.600 €

Recursos materiales: Este trabajo ha sido realizado mediante software gratuito, por lo que no afecta en el presupuesto. En cuanto al hardware, la tecnología utilizada ha sido un ordenador de sobremesa con un coste total de 900 € y un tiempo de amortización de 45 meses según la Agencia Tributaria.

$$\text{Coste de amortización: } \frac{\text{Coste total}}{\text{Tiempo amortización}} \times \text{Duración proyecto} = 90 \text{ euros}$$

También ha sido necesaria una conexión a internet con un precio de 40 €/mes, la cual ha sido usada en un 50% para la realización del Trabajo durante la duración del mismo.

Descripción	Coste (€)
Mano de obra	9.600
Hardware	90
Conexión a internet	20x5
TOTAL	9.790

Tabla 14. Costes de realización del Trabajo Fin de Grado

Fuente: Elaboración propia.

El presupuesto total del Trabajo Fin de Grado asciende a 9.790 € + IVA.

Capítulo 8. CONCLUSIONES

8.1. Conclusiones técnicas

Como conclusión es importante resaltar que se han alcanzado los objetivos principales de este Trabajo Fin de Grado, como son:

- Analizar la importancia de la eficiencia energética en el ámbito industrial y la relevancia de los motores eléctricos en la disminución del consumo eléctrico industrial.

- Estudiar las normativas que aplican en esta materia y que se utilizan para seleccionar un motor en función de ciertas características.

- Desarrollar una aplicación informática que ayude a seleccionar y comparar motores de manera sencilla y de esta forma ver de manera visual los posibles ahorros, tanto energéticos como económicos.

Se ha resaltado la importancia de la eficiencia energética en general pero principalmente en el sector industrial, donde se pueden obtener diferencias económicas relevantes en un corto periodo de tiempo, lo que se traduce en menores gastos para la empresa y a su vez en mayores beneficios. Además se ha indicado el alcance medio ambiental con el ahorro de emisiones de gases debidas a la generación de energía eléctrica.

Aparte de señalar las ventajas económicas y ambientales, se han analizado y comentado algunas de las normativas relacionadas con la eficiencia energética destacando la Directiva 2012/27/UE que afecta de manera directa al sector industrial y su aplicación supone un ahorro energético progresivo hasta 2020.

Se ha indicado un ámbito donde poder reducir el consumo energético como es el de los motores eléctricos, señalando métodos de ahorro como la instalación de variadores de frecuencia o arrancadores suaves. Además se ha explicado la importancia del rendimiento del motor y cómo se halla según normativa, así como la clasificación de motores en función de su eficiencia y la inclusión de la nueva clase IE4 en la regulación. Un ejemplo con dos motores de 200 kW expone las diferencias entre una clase de rendimiento y otra.

Se ha destacado la importancia de ciertos factores como el lugar de instalación o grado de protección del motor que son necesarios para la selección de un motor de manera correcta, conduciendo al desarrollo de una aplicación informática.

Por último, con la herramienta informática desarrollada se han realizado simulaciones de casos de estudio que esclarecen la importancia de seleccionar un motor de la potencia adecuada y las diferencias energéticas y económicas entre dos motores equipotenciales de distinto rendimiento, señalando el tiempo de equilibrio y el ahorro producido al alcanzar los 20 años de vida útil.

8.2. Conclusiones personales

La realización de este Trabajo ha supuesto adentrarme en un tema grato para mí como es el de la eficiencia y los motores eléctricos. Es un entorno que siempre me ha producido interés y por ello decidí realizar este Trabajo.

El desarrollo del documento ha conllevado una familiarización con la normativa de aplicación, reuniones con expertos y consultas a fabricantes. Además, se han desarrollado otras facetas como la investigación y búsqueda de información rigurosa, así como ciertas habilidades informáticas. Aptitudes muy útiles para el futuro profesional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ['Informe sistema eléctrico español 2013'](#). Red Eléctrica de España (REE).
- [2] [Santiago Sabugal. 'La generación de electricidad con ciclos combinados. Proyectos en España'](#). 2002.
- [3] ['Centrales de ciclo combinado en España'](#). El País. 2013
- [4] [Centrales nucleares en España](#). Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Minetur). 2013
- [5] [Evolución de la potencia eólica instalada en España](#). Asociación Empresarial Eólica (AEE). 2013
- [6] [Glosario términos energéticos](#). Comunidad de Madrid. 2014
- [7] [Balances de consumo de energía final](#). Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). 2013
- [8] [Consumo de energía final: Sector Residencial/Hogares](#). Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). 2010
- [9] [Consumo de energía final: Sector Servicios](#). Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). 2012
- [10] ['Nota metodológica de publicación del índice IRE de consumo eléctrico de grandes consumidores'](#). Red Eléctrica de España (REE). 2014
- [11] ['Evolución sectorial de la demanda de electricidad en grandes consumidores'](#). Red Eléctrica de España (REE). 2014
- [12] ['Índices de Producción Industrial \(IPI\) Base 2010. Metodología'](#). Instituto Nacional de Estadística (INE). 2010
- [13] [Índice de Producción Industrial. \(Base 2010\)](#). Instituto Nacional de Estadística (INE). 2014
- [14] [Presentaciones sectoriales](#). Ministerio de Industria, Energía y Turismo. 2014
- [15] ['Informe 2013 de Responsabilidad Social del Sector Químico Español'](#). Federación Empresarial de la Industria Química Española (Feique). 2013
- [16] [Valor añadido bruto \(VAB\)](#). Instituto de Estadística de Cataluña (Idescat). 2014
- [17] [Eficiencia energética](#). ABB. Acceso en Diciembre 2014
- [18] [Reglamento \(UE\) N° 517/2014](#). Unión Europea (UE). 2014
- [19] [Reglamento \(CE\) N° 715/2007](#). Unión Europea (UE). 2007
- [20] [The 2020 climate and energy package](#). European Commission. 2014

- [21] [Proyectos Clima. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente \(Magrama\). 2012](#)
- [22] [Directiva 2012/27/UE. Unión Europea \(UE\). 2012](#)
- [23] ['Plan nacional de acción de eficiencia energética'. Ministerio de Industria, Energía y Turismo \(Minetur\). 2014](#)
- [24] [Fondo JESSICA – F.I.D.A.E. de financiación de eficiencia energética. Acceso Enero 2015.](#)
- [25] Fraile Mora, Jesús. *'Máquinas Eléctricas'* 5ºed. McGraw Hill
- [26] *'Motores eléctricos AC trifásicos y monofásicos'*. AEG. 2010
- [27] Apuntes Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales en Universidad Carlos III de Madrid.
- [28] [Precios regulados 2014 electricidad y gas. Iberdrola](#)
- [29] ['Compensación de Energía Reactiva'. RTR Energía. 2012](#)
- [30] [Reglamento \(CE\) nº 640/2009 relativo a los requisitos de diseño ecológico para los motores eléctricos](#)
- [31] [Low voltage. Process performance motors according to EU MEPS. ABB. 2014](#)
- [32] [Herramienta de ahorro energético SinaSave. SIEMENS. 2014](#)
- [33] Norma UNE-EN 60034-2-1:2009
- [34] [Guardiola de Cabo, Luis Antonio. Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos.](#)
- [35] Norma UNE-EN 60034-30:2010
- [36] ['Technical note. IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors'. ABB. 2014](#)
- [37] [Morena, Javier de la. 'Motores de alta eficiencia y variación de velocidad' Fenercom. 2013](#)
- [38] [Selección y aplicación de motores eléctricos. WEG.](#)

ANEXO I

INFORME GENERADO CON LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA
DE UN TIPO DE SERVICIO CONTINUO

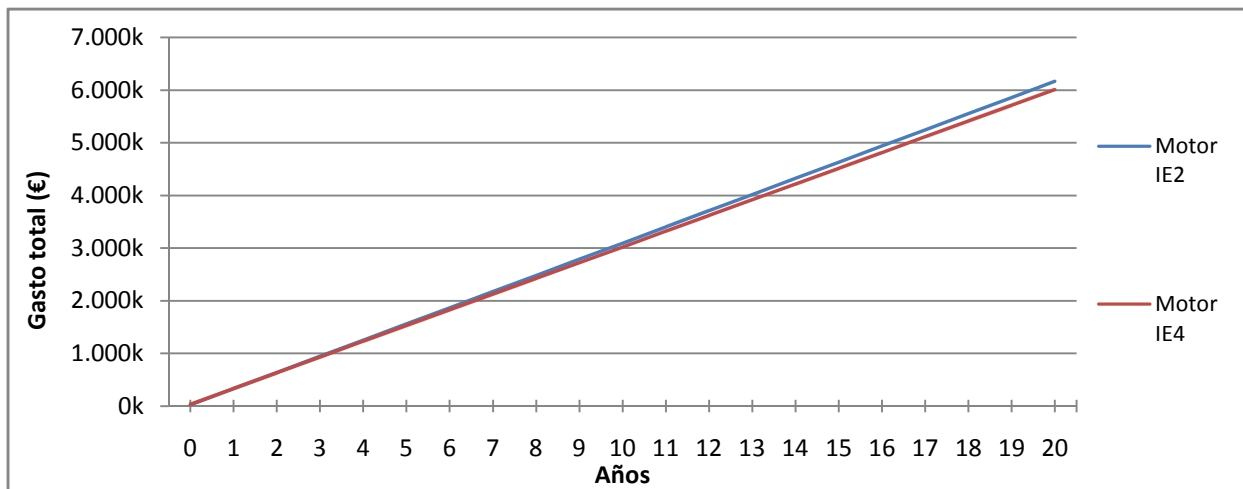
INFORME DE MOTORES SELECCIONADOS

18/02/2015 17:12



	Motor IE2	Motor IE4
Potencia (kW)	250	250
Velocidad (rpm)	2.980	2.981
Rendimiento	0,957	0,969
Peso (kg)	1.440	1.540
Par de arranque (N·m)	2242,8	2000
Factor de potencia	0,89	0,91
Precio (€)	25.000,00	32.500,00
Consumo (kWh/año)	1.905.204	1.881.610
Gasto energía activa (€/año)	266.728,53	263.425,39
Gasto energético total (€/año)	307.287,92	299.049,08

ΔConsumo	ΔGasto energía activa
23.594 kWh/año	3.303,14 €/año
1,24 %	
ΔEmisiones CO₂	ΔGasto energético total
14.156 t/año	8.238,84 €/año



Tiempo de equilibrio
< 1 año

Ahorro total (€)
157.276,85

ANEXO II

INFORME GENERADO CON LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA
DE UN TIPO DE SERVICIO INTERMITENTE

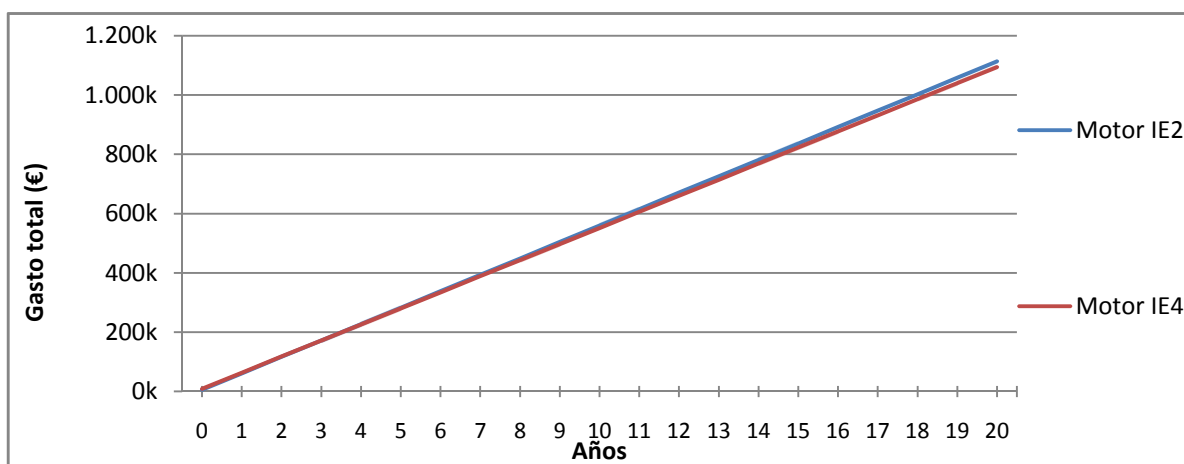
INFORME DE MOTORES SELECCIONADOS

18/02/2015 17:28



	Motor IE2	Motor IE4
Potencia (kW)	75	75
Velocidad (rpm)	992	994
Rendimiento 100%	0,944	0,962
Rendimiento 75%	0,944	0,963
Rendimiento 50%	0,935	0,959
Peso (kg)	830	1.000
Par de arranque (N·m)	1730,4	1586,2
Precio (€)	6.000,00	9.500,00
Consumo (kWh/año)	395.586	387.517
Gasto energético (€/año)	55.382,08	54.252,40

ΔConsumo	ΔGasto energético
8.069 kWh/año	1.129,68 €/año
2,04 %	
ΔEmisiones CO₂	
4.841 t/año	



Tiempo de equilibrio
Entre 3 y 4 años

Ahorro total (€)
19.093,56