

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de la Energía

### Sobredimensionamiento en la selección de motores de inducción: aspectos técnicos y económicos

Autor: Juan Isaac Campos Lara

Tutores: Manuel Burgos Payán

Juan Manuel Roldán Fernández

**Dpto. Ingeniería Eléctrica**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería de la Energía

# **Sobredimensionamiento en la selección de motores de inducción: aspectos técnicos y económicos**

Autor:

Juan Isaac Campos Lara

Tutores:

Manuel Burgos Payán

Juan Manuel Roldán Fernández

Dpto. de Ingeniería Eléctrica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera: Sobredimensionamiento en la selección de motores de inducción:  
aspectos técnicos y económicos

Autor: Juan Isaac Campos Lara

Tutores: Manuel Burgos Payán  
Juan Manuel Roldán Fernández

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor, Manuel, por confiar en mí y por darme esta oportunidad de poder participar en este trabajo de tal calibre. Además agradecer su preocupación, paciencia y ayuda prestada.

Agradezco a mi familia el apoyo durante estos cuatro años de aprendizaje, con sus momentos buenos y no tan buenos, pero siempre con la mejor de las predisposiciones.

Agradezco a mis amigos de toda la vida, así como, a mis amigos energéticos las experiencias vividas durante estos cuatro años, que seguro se propagarán en el tiempo.

Agradezco a mi amiga especial por aguantarme durante todo el año, pero especialmente en épocas de exámenes cuando a pesar de mi mala actitud y mi negatividad conseguía darle el vuelco que necesitaba a la situación para afrontar esa época tan dura.

Agradecer también a la Escuela, a mi querida ETSI, a su biblioteca, a sus merenderos, por hacer más amena mi estancia allí y por ayudarme con la consecución del grado, así como, a cada trabajador por su respeto y educación.

Posiblemente estas palabras de agradecimientos se queden cortas, pero es que es algo inefable.

Gracias a todos,



## Resumen

---

El desconocimiento a la hora de la elección de un motor de inducción puede acarrear una pérdida económica y un mal uso de la energía.

En este proyecto se abordan las ventajas e inconvenientes que puede tener utilizar un motor con mayor potencia a la potencia demandada. Para ello, se ha estructurado el proyecto en dos partes: una parte más tecnológica o de ingeniería y otra parte económica.

Dentro de la parte ingenieril, se ha tratado el estudio teórico de los motores, la utilización y el entendimiento de catálogos, así como, el análisis de gráficas y de posibles cambios en el futuro, es decir, análisis de sensibilidad. La parte económica, también ha sido de gran importancia en este proyecto debido a que la finalidad de éste es averiguar la mayor rentabilidad dentro de una serie de situaciones diferentes. Para estos análisis de rentabilidad se han utilizado indicadores como el valor actualizado neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el pay back (PB).

Además, se ha estudiado una hipotética situación, en la cual se produciría un cambio de motor a uno más eficiente, repercutiendo tanto en una nueva inversión, como en una menor cantidad de energía consumida (mejora de la eficiencia del sistema).

# Abstract

---

The lack of knowledge at the time of choosing an induction motor can result in a loss of money.

This project addresses the advantages and disadvantages that can be used to use a motor with more power to the power demanded. For this, the project has been structured in two parts: an engineering part and an economic part.

Within the engineering part, the theoretical study of motors, the use and understanding of catalogs, as well as the analysis of graphs and possible changes in the future, that is, sensitivity analysis, have been discussed. The economic part, has also been of great importance in this project because the purpose of this is to find out the highest profitability within a series of different situations. For these profitability analyzes, indicators such as NPV, IRR and PB have been used.

In addition, a hypothetical situation has been studied, in which there would be a change of engine to a more efficient, impacting both a new investment, and a lower energy consumption.

... -translation by google-

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>9</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>12</b>
<b>Índice</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>15</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>18</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>19</b>
1.1 <i>Motor de Inducción</i>	19
1.2 <i>Factores que producen el sobredimensionamiento de motores</i>	20
1.3 <i>Tipos de motores según su eficiencia</i>	21
1.4 <i>Ventajas e inconvenientes del sobredimensionamiento de motores</i>	22
1.5 <i>Variación del rendimiento nominal con la potencia nominal de un motor</i>	23
1.6 <b>CATÁLOGO</b>	26
1.6.1 <i>Primera parte. Teoría Casos Prácticos</i>	28
1.6.2 <i>Segunda parte. Análisis de sensibilidad</i>	31
1.6.3 <i>Tercera parte. Curva ordenada de carga</i>	32
<b>2 CASOS PRÁCTICOS</b>	<b>11</b>
2.1 <i>CASO 1. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW y FC unidad.</i>	18
2.2 <i>CASO 2. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.</i>	23
2.3 <i>CASO 3. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.</i>	26
2.4 <i>CASO 4. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.</i>	28
2.5 <i>CASO 5. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.</i>	31
2.6 <i>CASO 6 Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.</i>	33
<b>3 Análisis de sensibilidad</b>	<b>36</b>
3.1 <i>Análisis sensibilidad Perfil de Carga B</i>	36
3.1.1 <i>Variación del precio de la energía eléctrica</i>	37
3.1.2 <i>Disminución del número de horas de funcionamiento del motor</i>	42
3.1.3 <i>Aumento de la tasa de descuento</i>	46
3.1.4 <i>Aumento del coste de adquisición del motor</i>	49
3.1.5 <i>Disminución del coste de adquisición del motor</i>	51
3.2 <i>Análisis sensibilidad Perfil de Carga A</i>	53
3.2.1 <i>Variación del precio de la energía eléctrica</i>	53
3.2.2 <i>Disminución del número de horas de funcionamiento del motor</i>	58
3.2.3 <i>Aumento de la tasa de descuento</i>	60
3.2.4 <i>Aumento del coste de adquisición del motor</i>	62
3.2.5 <i>Disminución del coste de adquisición del motor</i>	64

---

<b>4</b>	<b>CAMBIO DE MOTOR</b>	<b>66</b>
4.1	<i>MOTOR IE3 NO SOBREDIMENSIONADO</i>	68
4.2	<i>MOTOR IE3 SOBREDIMENSIONADO 37kW</i>	69
4.3	<i>MOTOR IE4 NO SOBREDIMENSIONADO</i>	69
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>70</b>
	<b>Referencias</b>	<b>71</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tolerancias admisibles para motores de inducción	21
Tabla 2. Catálogo de un motor de eficiencia IE1. Fabricante WEG.	11
Tabla 3. Catálogo de un motor de eficiencia IE2. Fabricante WEG.	12
Tabla 4. Catálogo de un motor de eficiencia IE3. Fabricante WEG.	13
Tabla 5. Catálogo de un motor de eficiencia IE4. Fabricante WEG	13
Tabla 6. Datos tomados para la realización de los cálculos	17
Tabla 7. Caso ejemplo de rendimientos en catálogo	18
Tabla 8. Constantes de regresión del modelo de pérdidas de un motor de 30kW	19
Tabla 9. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga A	20
Tabla 10. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga A.	21
Tabla 11. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga A	21
Tabla 12. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga A	22
Tabla 13. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga B.	24
Tabla 14. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga B.	24
Tabla 15. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga B.	25
Tabla 16. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga B.	25
Tabla 17. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga C.	26
Tabla 18. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga C.	27
Tabla 19. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga C.	27
Tabla 20. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga C.	28
Tabla 21. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga D.	29
Tabla 22. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga D.	29
Tabla 23. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga D.	30
Tabla 24. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga D.	30
Tabla 25. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga E.	31
Tabla 26. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga E	32
Tabla 27. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga E.	32
Tabla 28. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga E.	33
Tabla 29. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga F.	34
Tabla 30. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga F.	34

Tabla 31. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga F.	35
Tabla 32. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga F.	35
Tabla 33. Aumento del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga B	38
Tabla 34. Aumento del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga B	38
Tabla 35. Aumento del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga B	39
Tabla 36. Aumento del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga B	39
Tabla 37. Disminución del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga B	40
Tabla 38. Disminución del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga B	40
Tabla 39. Disminución del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga B	41
Tabla 40. Disminución del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga B	41
Tabla 41. Disminución a 2.000h del motor IE1 con perfil de carga B	42
Tabla 42. Disminución a 2.000h del motor IE2 con perfil de carga B	43
Tabla 43. Disminución a 2.000h del motor IE3 con perfil de carga B	43
Tabla 44. Disminución a 2.000h del motor IE4 con perfil de carga B	44
Tabla 45. Disminución a 5.000h del motor IE1 con perfil de carga B	44
Tabla 46. Disminución a 5.000h del motor IE2 con perfil de carga B	45
Tabla 47. Disminución a 5.000h del motor IE3 con perfil de carga B	45
Tabla 48. Disminución a 5.000h del motor IE4 con perfil de carga B	46
Tabla 49. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE1 con perfil de carga B	46
Tabla 50. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE2 con perfil de carga B	47
Tabla 51. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE3 con perfil de carga B	47
Tabla 52. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE4 con perfil de carga B	48
Tabla 53. Aumento del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga B	49
Tabla 54. Aumento del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga B	49
Tabla 55. Aumento del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga B	50
Tabla 56. Aumento del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga B	50
Tabla 57. Disminución del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga B	51
Tabla 58. Disminución del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga B	51
Tabla 59. Disminución del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga B	52
Tabla 60. Disminución del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga B	52
Tabla 61. Aumento del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga A	54
Tabla 62. Aumento del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga A	54
Tabla 63. Aumento del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga A	55
Tabla 64. Aumento del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga A	55



Tabla 65. Disminución del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga A	56
Tabla 66. Disminución del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga A	56
Tabla 67. Disminución del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga A	57
Tabla 68. Disminución del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga A	57
Tabla 69. Disminución del número de horas del motor IE1 con perfil de carga A	58
Tabla 70. Disminución del número de horas del motor IE2 con perfil de carga A	58
Tabla 71. Disminución del número de horas del motor IE3 con perfil de carga A	59
Tabla 72. Disminución del número de horas del motor IE4 con perfil de carga A	59
Tabla 73. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE1 con perfil de carga A	60
Tabla 74. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE2 con perfil de carga A	60
Tabla 75. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE3 con perfil de carga A	61
Tabla 76. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE4 con perfil de carga A	61
Tabla 77. Aumento del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga A	62
Tabla 78. Aumento del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga A	62
Tabla 79. Aumento del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga A	63
Tabla 80. Aumento del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga A	63
Tabla 81. Disminución del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga A	64
Tabla 82. Disminución del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga A	64
Tabla 83. Disminución del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga A	65
Tabla 84. Disminución del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga A	65
Tabla 85. Datos de la curva de carga variable en tiempo con un motor de 30kW	67
Tabla 86. Datos MOTOR IE3 de 37kW	69
Tabla 87. Datos MOTOR IE4 de 30kW	69
Tabla 88. Datos MOTOR IE4 de 37kW	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Motor de inducción. Partes	20
Figura 2. Rendimiento motor de inducción a diferentes potencias y cargas	22
Figura 3. Eficiencia motores inducción según potencia nominal	23
Figura 4. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE1	24
Figura 5. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE2	24
Figura 6. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE3	25
Figura 7. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE4	25
Figura 8. Deslizamiento de motores a plena carga.	26
Figura 9. Momento de inercia de motores con distintas clases de eficiencia	26
Figura 10. Ejemplo de un catálogo de un fabricante internacional de motores	27
Figura 11. Curva de carga de un motor real.	32
Figura 12. Ciclo de carga constante. Con FC unidad.	14
Figura 13. Ciclo de carga constante B. Con un escalón.	14
Figura 14. Ciclo de carga constante C. Con un escalón.	15
Figura 15. Ciclo de carga constante D. Con un escalón.	15
Figura 16. Ciclo de carga constante E. Con un escalón.	16
Figura 17. Ciclo de carga constante F. Con un escalón.	16
Figura 18. Comparación rentabilidad motores. Perfil de carga A	22
Figura 19. Evolución temporal de la carga de un motor	66

# 1 INTRODUCCIÓN

---

Actualmente en el mundo, los motores eléctricos consumen el 45% de la electricidad mundial [1]En la industria, que es el ámbito donde tienen más peso, el consumo ronda el 65% de la energía eléctrica producida, y de ese último porcentaje, un 90% corresponde a motores de inducción.

Hoy día, el precio de la electricidad en España se ha incrementado bruscamente en los últimos años, como se puede observar en el mercado ibérico mayorista (OMI). El precio de la electricidad para los siguientes próximos años se está cotizando a un valor más elevado que los años anteriores. Esto es un problema para el desarrollo industrial. La única solución al aumento de precio eléctrico es el ahorro energético, o dicho de otra forma, la eficiencia energética. Se entiende por eficiencia energética, la utilización de energía eléctrica de una forma más eficiente, es decir, consumir menos y mejor. En muchos casos, la industria tiene un consumo fijo, en el cual, los kWh consumidos anuales siempre son los mismos, dentro de unos límites razonables, por lo tanto, no es sencillo pensar un escenario en el que disminuya el consumo. Para paliar esta situación la única manera de seguir con el desarrollo de la industria o seguir adelante, que no es poco en consideración al precio de la electricidad, es consumir mejor.

## 1.1 Motor de Inducción

Un motor de inducción es un tipo de motor de corriente alterna que utiliza la energía eléctrica para producir la rotación del rotor. Está compuesto, como puede verse en la Figura 1, por una parte fija: estator, encargada de crear el campo magnético. El rotor es la parte del núcleo de rotación del motor fijado al eje. Un eje, y rodamientos para permitir la rotación y reducir la fricción entre el eje y el bastidor o carcasa. Una carcasa, que cubre el motor; y dos extremos, el extremo D (*drive*), lado de accionamiento del motor, y el extremo N (*non-drive*), lado contrario.

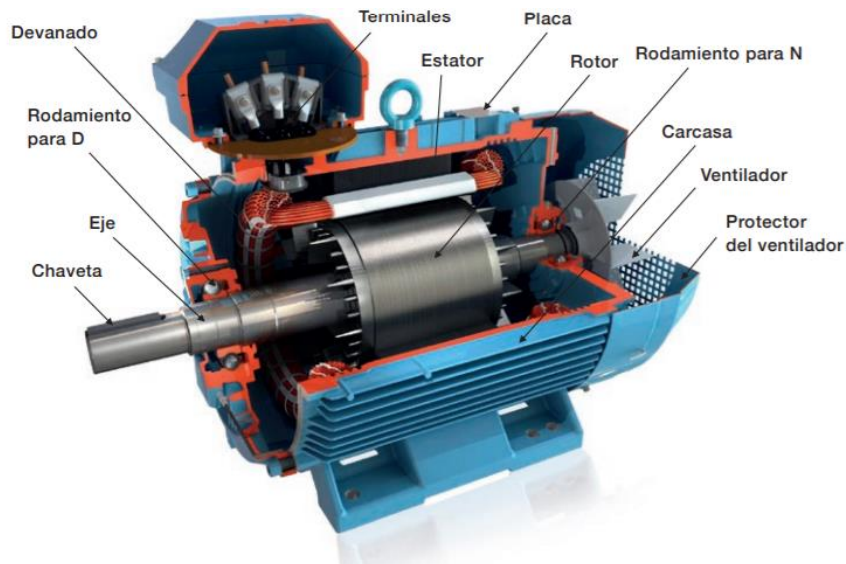


Figura 1. Motor de inducción. Partes

## 1.2 Factores que producen el sobredimensionamiento de motores

Debido a una serie de factores que dificultan su elección, suelen sobredimensionarse los SCIM's para evitar que tengan una menor potencia a la necesitada (en el caso más desfavorable). El sobredimensionamiento de un motor no es más que la utilización de un motor de más potencia a la mínima potencia nominal necesaria.

Como se acaba de comentar, existen una serie de factores causantes del sobredimensionamiento de motores. Los factores principales son los siguientes:

- **Diseño de un sistema conservador.** A la hora de elegir un motor normalmente se suele enfocar en base a dos criterios. Estos criterios son el criterio estático del caso más desfavorable o del criterio térmico. A continuación se definirá brevemente en que consiste cada uno. Por un lado el criterio estático, también llamado el del caso más desfavorable, consiste en determinar la potencia nominal mediante una potencia que garantice que el motor nunca estará sobrecargado. Por lo tanto, esto garantiza que la temperatura siempre sea menor a la temperatura máxima. Por otro lado, en el criterio térmico, se determina la potencia nominal mediante una potencia que garantice que el calentamiento o la temperatura no exceda los límites del aislamiento.
- **Factores de seguridad.** Debido a la incertidumbre de la carga, siempre se opta por dimensionar en un tanto por ciento la potencia necesitada.
- **Potencia discreta.** En numerosas ocasiones, el técnico realiza una serie de cálculos para decidir sobre su motor. Sin embargo, en el catálogo de motores solo hay unos valores de potencias nominales estandarizadas. Por lo tanto, se tiene que optar por elegir la potencia nominal del catálogo inmediatamente superior a la potencia calculada.

Por esto, actualmente en la UE, el factor de carga medio se encuentra en torno al 60% [2]Típicamente, los valores de la carga mecánica que hacen un motor funcione con su máxima eficiencia (mínimas pérdidas) se producen con un factor de carga entre un 60 % y 100 %,

dependiendo de la potencia nominal, la clase de eficiencia y la marca.

También cabe destacar cómo los valores del motor pueden variar con respecto al valor que aparece en su placa de características. Para evitar dificultades, la normativa IEC 60034-1 [3], definió la tolerancia. La tolerancia es la desviación máxima permitida entre el resultado de la prueba y el valor declarado en la placa de características. En la Tabla 1 se resumen los valores o porcentajes en los cuales puede variar esas características.

Tabla 1. Tolerancias admisibles para motores de inducción

	Eficiencia	Factor de Potencia	Intensidad rotor bloqueado	Par rotor bloqueado	Par mínimo	Momento de inercia	Nivel de ruido
$P_n(\text{kW}) < 150$	-15%	-1/6	+20% de la corriente	[-15% +25%]	-15% de su valor	+/-10% de su valor	+3dB(A)

### 1.3 Tipos de motores según su eficiencia

Los motores son máquinas que convierten energía eléctrica en mecánica. Al ser máquinas no son perfectas, por lo tanto, tienen pérdidas en la conversión de energía. La potencia eléctrica absorbida por el motor, no se transforma completamente en potencia mecánica, debido a una serie de factores tanto mecánicos, eléctricos y magnéticos.

En los países desarrollados, mediante acciones políticas el mercado de motores se está moviendo paulatinamente a las clases de alta eficiencia, sin abandonar las tradicionales. Sin embargo, en los países menos desarrollados y emergentes esas acciones no se están produciendo, debido a barreras financieras y otras. Por lo que, en ausencia de política que apuesten por la energía eficiente, se está produciendo que en los países menos desarrollados se estancan los motores más baratos y antiguos, es decir, los motores de baja eficiencia. [1]

Actualmente en el mercado hay cuatro clases de eficiencia.

Tres de ellas, se definieron en IEC/EN 60034-30:2008 [3] y la última, la clase con mayor eficiencia en el IEC/TS 60034-31 [3] para motores trifásicos de inducción con una sola velocidad. Los rendimientos de estos motores se determinan mediante complejos y duros métodos de ensayo descritos por IEC/EN 60034-2-1:2007 [4]. Sin entrar en mayor detalle de las normativas anteriormente mencionadas, las clases de eficiencia para motores son las siguientes:

- IE1. Eficiencia estándar.
- IE2. Alta eficiencia
- IE3. Eficiencia Premium
- IE4. Eficiencia Super Premium

Siendo IE1 la clase de eficiente con menor rendimiento y la IE4 la de mayor eficiencia.

## 1.4 Ventajas e inconvenientes del sobredimensionamiento de motores

Se definió el sobredimensionamiento de un motor como la utilización de un motor de más potencia a la mínima potencia nominal necesaria. Esto provoca una serie de ventajas y por supuesto, una serie de inconvenientes. Entre los inconvenientes del sobredimensionamiento se destacan los siguientes:

- Un mayor coste de adquisición, instalación y puesta en marcha del motor.
- Mayor coste de equipamiento de maniobra, corte y protección
- Peor rendimiento debido al funcionamiento con carga parcial
- Menor factor de potencia también debido al funcionamiento con carga inferior a la nominal
- Mayores costes de operación, producto del funcionamiento con peor rendimiento (mayores pérdidas) y peor factor de potencia

Sin embargo, estos inconvenientes pueden llegar a ser compensados por las ventajas, ya que en las curvas de los motores, se da el caso que el rendimiento sea mayor para un factor de carga menor al 100%.

Se quiere decir, como se observa en la Figura 2 a medida que aumenta la potencia nominal, es menos acusativo la diferencia del sobredimensionamiento llegando en muchos casos a tener el mayor rendimiento cuando el motor no opera a plena carga. Por lo tanto, en esos casos los inconvenientes son totalmente compensados con las grandes ventajas de sobredimensionar un motor desde el punto de vista técnico.

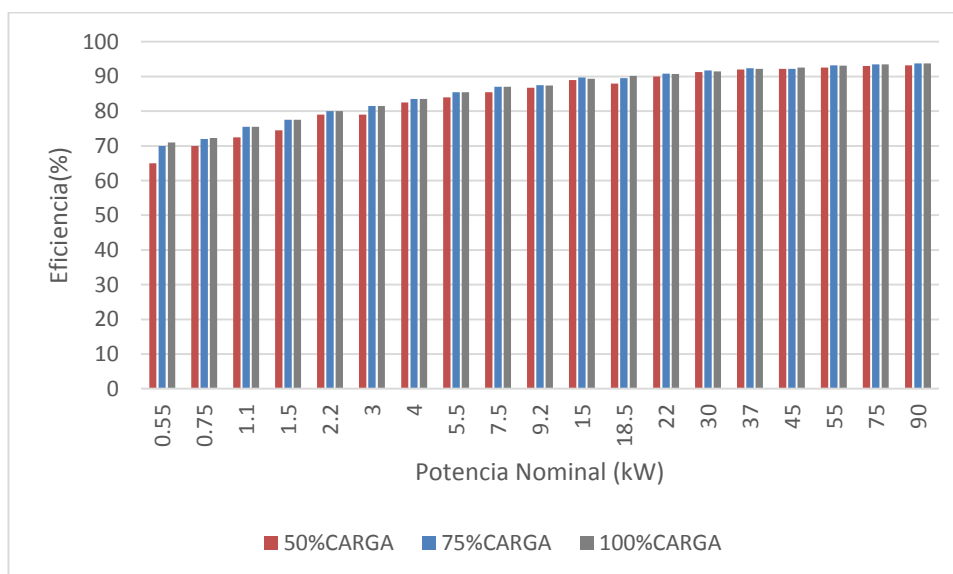


Figura 2. Rendimiento motor de inducción a diferentes potencias y cargas

Otra gran ventaja de sobredimensionar un motor es la temperatura de operación. La temperatura

de operación es menor, por lo que hace que aumente la vida útil del mismo. Cabe precisar que la vida útil de un motor depende de muchos más factores como son el número de ciclos de funcionamiento, el factor de carga, la frecuencia de los ciclos, la calidad de la energía y las condiciones ambientales y por supuesto, la potencia nominal del motor, por lo que no es la única variable importante que depende de la vida útil la temperatura. [ 5]

El principal problema de mantenimiento que sufre un motor se centra en el desgaste de los cojinetes, y en el estator, como se observa problemas puramente mecánicos y producidos por el uso.

Por otro lado, es importante conocer cuál es el propósito de uso del motor, ya que para algunas aplicaciones de arranque-parada , aplicaciones de aceleración y desaceleración constantes y/o aplicaciones que tengan ciclos de inversión de dirección de rotación entre otras, si el motor está sobredimensionado se puede aprovechar la mayor inercia del rotor. Otra característica destacable, es que para una curva de carga par-velocidad dada, cuanto mayor sea la potencia nominal del motor, mayor será la potencia mecánica del eje debido a que tendrá un deslizamiento inferior.

## 1.5 Variación del rendimiento nominal con la potencia nominal de un motor

Una vez realizado un breve análisis teórico sobre los motores de inducción, se decide dar comienzo a una parte más práctica e ingenieril como es el análisis.

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente, existen cuatro clases de rendimiento o eficiencia normalizadas según la normativa.

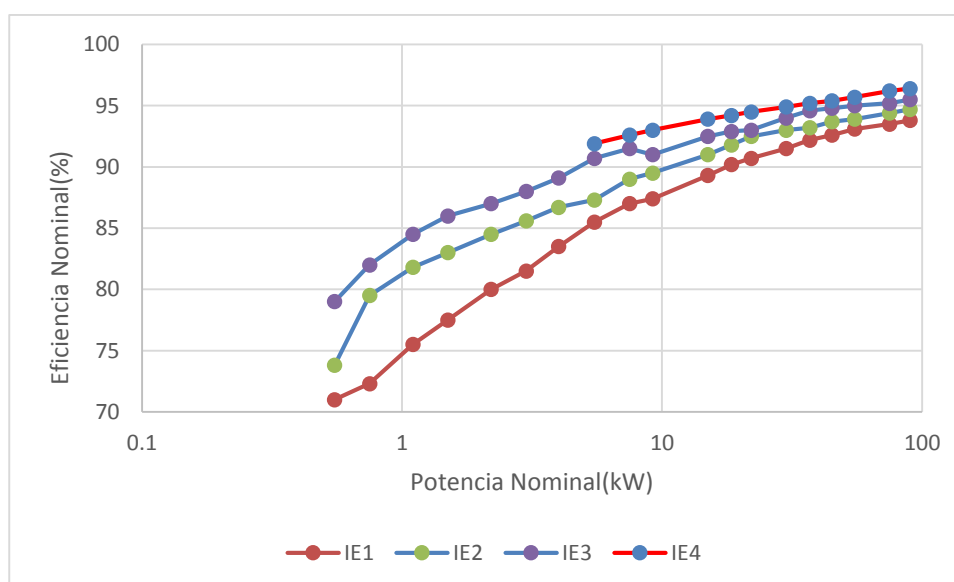


Figura 3. Eficiencia motores inducción según potencia nominal

En la Figura 3 se observa cómo a medida que aumenta la potencia nominal del motor, aumenta el rendimiento exponencialmente hasta quedarse prácticamente constante a muy altas potencias. Por otro lado, se cumple cómo las clases de eficiencia tienen sus diferencias en cuanto a rendimientos y que a medida que aumenta las potencias, los motores tienen menos pérdidas. Por último, comentar cómo los motores de eficiencia más bajas sufren mayores diferencias a medida

que aumenta su potencia.

Una vez, comentada y analizada la Figura 3, se pretende analizar para cada clase de eficiencia el rendimiento, con factores de carga diferentes a la unidad y para todo un rango de potencias.

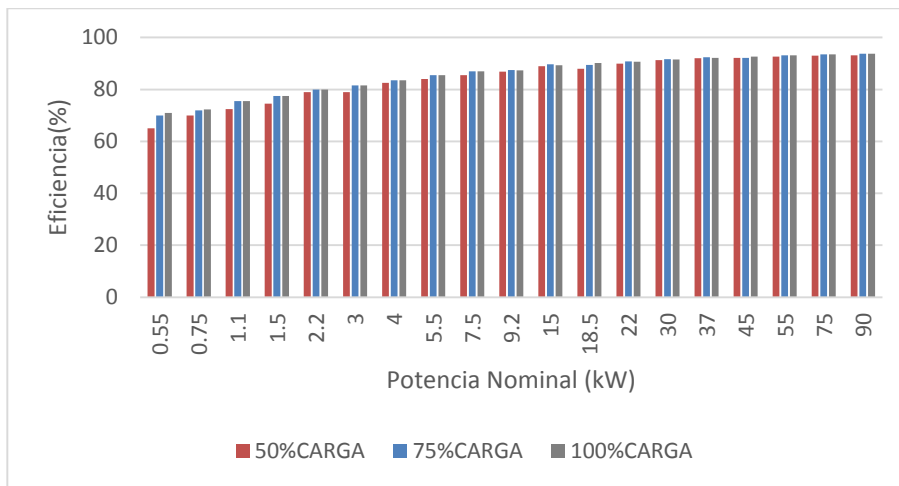


Figura 4. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE1

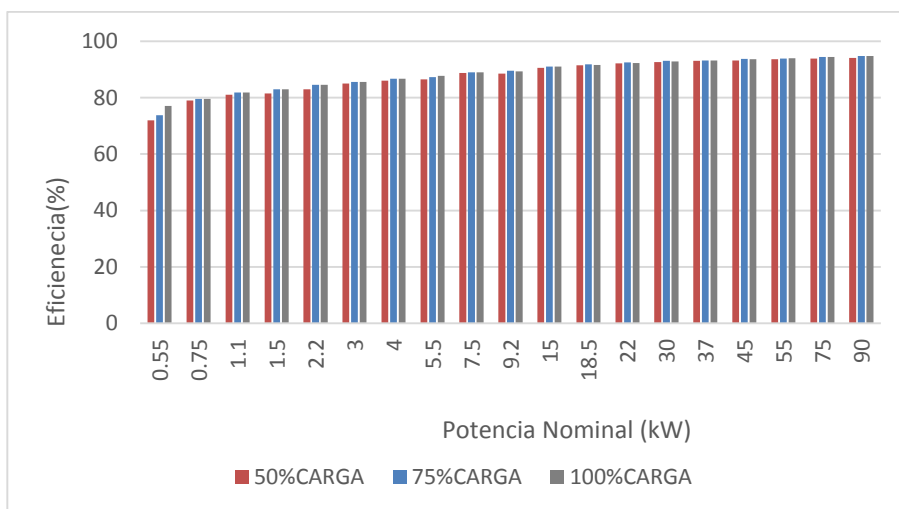


Figura 5. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE2



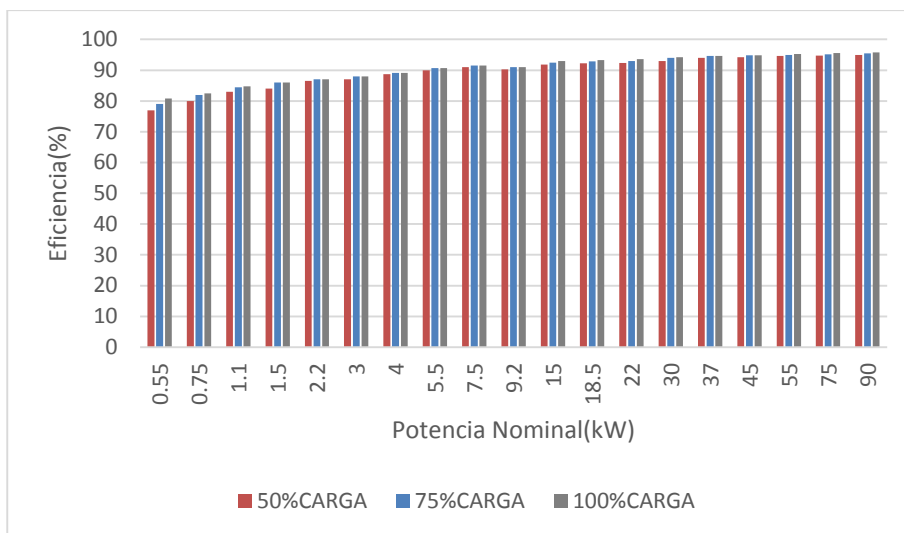


Figura 6. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE3

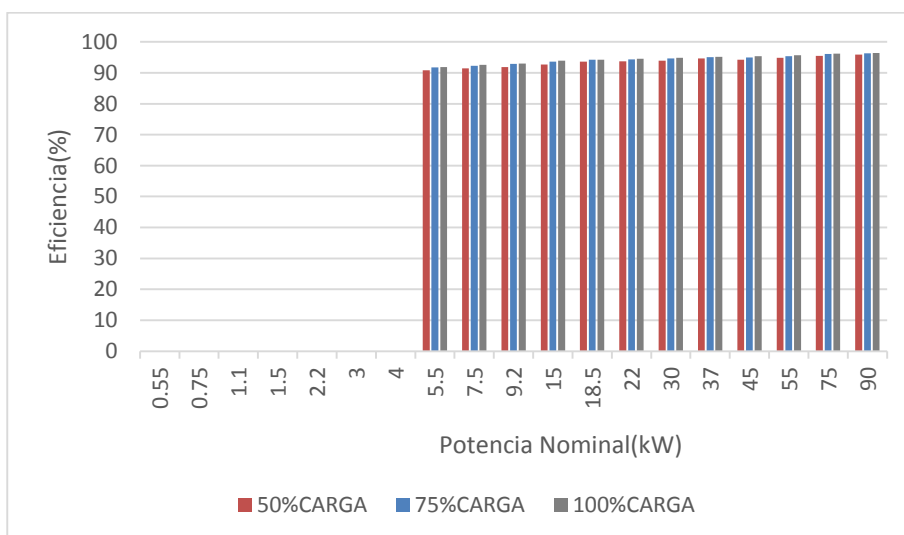


Figura 7. Comparación de la eficiencia de motores para distintos factores de carga IE4

Como se pueden observar en las Figura 4, Figura 5, Figura 6 y Figura 7, el comportamiento es muy similar independientemente de la clase de eficiencia, sin embargo, observamos como dependiendo del factor de carga, hay más diferencias en los motores de peor rendimiento (IE1), como se comentó anteriormente. Además, se visualiza cómo a medida que la potencia del motor es mayor, la diferencia es menor, hasta convertirse en una diferencia mínima. Cabe destacar cómo en muchos casos, un motor sobredimensionado (potencia de carga relativa o factor de carga, FC=75%) tiene un rendimiento mayor al del motor a plena carga.

Siguiendo con el estudio de las gráficas, en la Figura 8 se puede contemplar como al aumentar la potencia nominal del motor, así como, aumentar la clase de eficiencia, es decir, elegir un motor más eficiente el deslizamiento es menor. De forma similar, se puede observar cómo al igual que aumenta la velocidad nominal del motor, aumenta el momento de inercia, como se hace notar en la Figura 9.

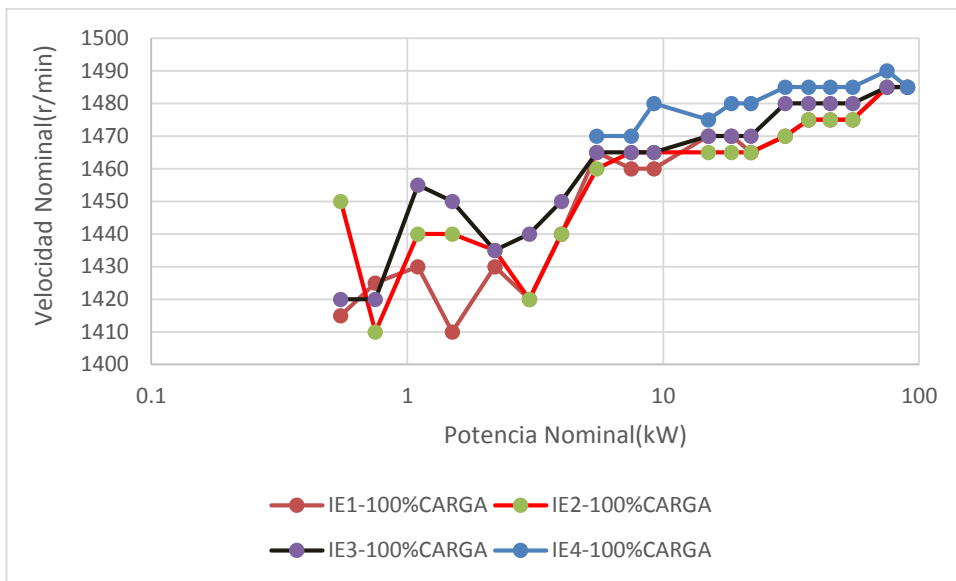


Figura 8. Deslizamiento de motores a plena carga.

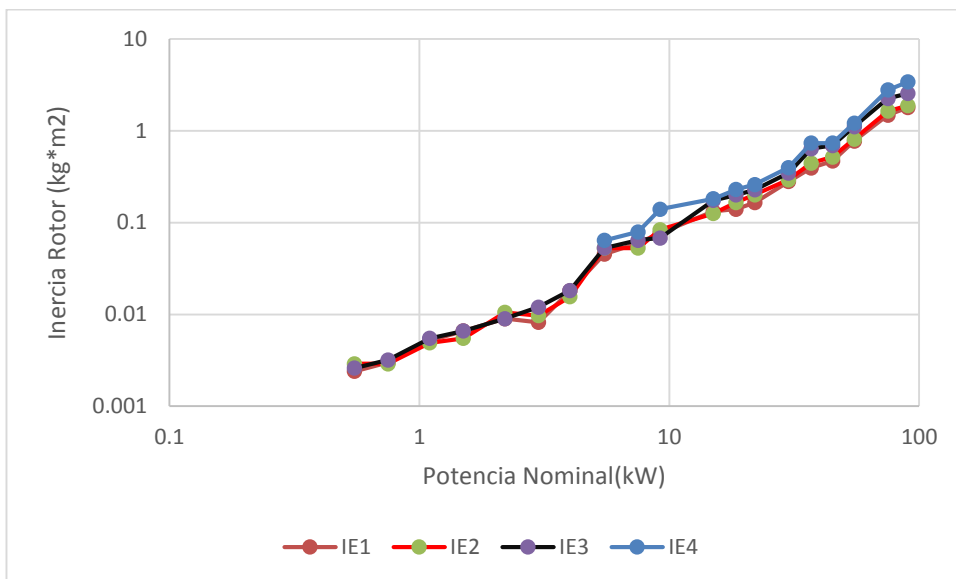


Figura 9. Momento de inercia de motores con distintas clases de eficiencia

## 1.6 CATÁLOGO

Debido al conocimiento ya adquirido gracias a los puntos anteriores, es hora de empezar a analizar más a fondo el objeto de estudio del proyecto.

A la hora de decidir un motor se tiene en cuenta criterios técnicos, en los que se incluye dominio de catálogos, y por supuesto, criterios económicos. Desde el punto de vista técnico, debe conocerse todo tipo de variables tales como el ciclo temporal de carga mecánica que debe accionarse, potencia, velocidad, frecuencia y tensión entre otras. Desde el punto de vista de rentabilidad

económica, obviamente se opta por el motor de menor coste de adquisición, instalación y puesta en servicio que cumpla unos requisitos mínimos, para ver esto, en este proyecto se va a utilizar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de retorno simple o *pay-back* (PB).

El VAN, no es más que valor actual neto de una inversión. En este proyecto, se planteará del punto de vista, en el cual todas las variables son negativas, por lo tanto, sirve para saber cual es la inversión que menos vale.

Como se ha anotado anteriormente, para realizar estos análisis se requiere de mínimo un catálogo de motores, como el que se muestra en la Figura 10. [5]

Potencia		Carcasa	Full Load Torque (kgm)	Corriente con rotor trabado I <sub>v</sub> /In	Par con rotor trabado T <sub>v</sub> /T <sub>n</sub>	Break-down Torque T <sub>b</sub> /T <sub>n</sub>	Momento de Inercia J (kgm <sup>2</sup> )	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Paso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400V						Corriente nominal In (A)	
kW	HP							% de la potencia nominal				RPM							
								Rendimiento					Factor de potencia						
		50	75	100	50	75	100												
M Poles																			
0,12	0,16	63	0,087	3,5	1,8	2,0	0,0003	38	84	5,2	44	1350	46,0	53,0	55,0	0,51	0,64	0,75	0,420
0,18	0,25	63	0,128	3,8	1,9	1,9	0,0006	16	35	6,2	44	1370	51,0	55,0	57,0	0,52	0,65	0,75	0,610
0,25	0,33	71	0,178	3,7	1,8	1,9	0,0006	28	62	5,5	43	1370	53,0	58,0	61,5	0,50	0,62	0,71	0,826
0,37	0,5	71	0,258	3,6	2	2	0,0007	28	62	7,0	43	1395	58,0	62,0	66,0	0,50	0,64	0,73	1,11
0,55	0,75	80	0,379	4,9	2	2,4	0,0024	8	18	9,5	44	1415	65,0	70,0	71,0	0,57	0,72	0,81	1,38
0,75	1	80	0,513	4,9	2,1	2,3	0,0030	7	15	10,5	44	1425	70,0	72,0	72,3	0,58	0,72	0,81	1,85
1,1	1,5	90S	0,749	5,8	1,8	2,4	0,0052	7	15	14,5	49	1430	72,5	75,5	75,5	0,60	0,74	0,82	2,57
1,5	2	90L	1,04	5,5	1,9	2,2	0,0066	8	18	17,0	49	1410	74,5	77,5	77,5	0,58	0,73	0,82	3,41
2,2	3	100L	1,50	5,6	2,4	2,6	0,0090	9	20	23,0	53	1430	79,0	80,0	80,0	0,60	0,74	0,82	4,84
3	4	100L	2,06	6,5	3,1	3,2	0,0082	8	18	30,0	53	1420	79,0	81,5	81,5	0,52	0,66	0,75	7,08
4	5,5	112M	2,71	6,2	2,1	2,5	0,0180	9	20	33,0	56	1440	82,5	83,5	83,5	0,61	0,73	0,80	8,64
5,5	7,5	132S	3,66	7,5	2,1	2,5	0,0453	7	15	47,0	60	1465	84,0	85,5	85,5	0,63	0,77	0,84	11,1
7,5	10	132M	5,00	6,4	2	2,5	0,0601	8	18	64,5	60	1460	85,5	87,0	87,0	0,63	0,75	0,82	15,2
9,2	12,5	160M	6,14	6,0	2	2,4	0,0767	9	20	93,0	61	1460	86,8	87,5	87,4	0,64	0,76	0,82	18,5
11	15	160M	7,34	6,0	2,1	2,5	0,0906	9	20	96,0	61	1460	87,0	88,0	88,0	0,64	0,76	0,82	22,0
15	20	160L	9,94	7,1	2,6	3,1	0,1325	8	18	121	61	1470	89,0	89,7	89,3	0,66	0,76	0,83	29,2
18,5	25	180M	12,3	7,5	2,7	3,1	0,1398	12	26	152	61	1470	88,0	89,5	90,2	0,65	0,75	0,82	36,1
22	30	180L	14,6	6,6	2,4	2,9	0,1653	10	22	164	61	1465	90,0	90,8	90,7	0,66	0,77	0,84	41,7
30	40	200L	19,9	6,6	2,3	2,6	0,2802	13	29	212	65	1470	91,3	91,7	91,5	0,68	0,78	0,84	56,3
37	50	225S/M	24,4	6,7	2,3	2,7	0,3944	10	22	342	66	1475	92,0	92,4	92,2	0,71	0,81	0,85	68,1
45	60	225S/M	29,7	7,5	2,5	2,7	0,4684	10	22	363	66	1475	92,2	92,2	92,2	0,72	0,82	0,86	81,6
55	75	250S/M	36,3	6,7	2,4	2,6	0,7731	12	26	431	66	1475	92,9	93,2	93,1	0,73	0,82	0,85	100
75	100	280S/M	49,2	6,6	2	2,6	1,48	22	48	639	69	1485	93,0	93,5	93,5	0,73	0,81	0,85	136
90	125	280S/M	59,0	6,8	2,1	2,5	1,79	20	44	673	69	1485	93,2	93,8	93,8	0,75	0,83	0,85	163
110	150	315S/M	71,9	6,4	2	2,4	2,55	26	57	887	71	1490	93,6	94,3	94,1	0,75	0,83	0,86	196
132	180	315S/M	86,3	6,9	2,3	2,4	3,11	22	48	953	71	1490	93,9	94,5	94,3	0,74	0,83	0,86	235
132	180	315S/M	86,3	6,9	2,3	2,4	3,11	22	48	953	71	1490	93,9	94,5	94,3	0,74	0,83	0,86	235
150	200	315S/M	98,1	7,0	2,5	2,8	3,34	18	40	1012	71	1490	94,0	94,5	94,5	0,74	0,82	0,86	266
160	220	315S/M	105	7,3	2,4	2,5	3,54	18	40	1012	71	1490	94,1	94,6	94,5	0,73	0,82	0,86	284
185	250	315S/M	121	6,9	2,4	2,3	3,98	17	37	1071	71	1490	94,3	94,7	94,6	0,74	0,82	0,86	328
200	270	315L	131	6,9	2,4	2,3	4,41	16	35	1216	74	1490	94,4	94,8	94,7	0,76	0,84	0,85	359
220	300	315L	144	7,7	2,6	2,4	4,85	14	31	1330	74	1490	94,5	94,9	94,8	0,74	0,83	0,86	389
250	340	315L	163	7,8	2,7	2,5	5,40	12	26	1399	74	1490	94,6	94,9	94,8	0,75	0,83	0,86	443
260	350	315L	170	7,8	2,7	2,5	5,40	12	26	1399	74	1490	94,6	94,9	94,8	0,75	0,83	0,86	460
280	380	315L	183	7,9	2,7	2,5	6,16	12	26	1496	74	1490	94,6	95,0	94,9	0,74	0,82	0,86	495
300	400	355M/L	196	7,2	2,2	2,4	8,59	18	40	1560	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,74	0,82	0,85	537
315	430	355M/L	206	7,2	2,4	2,4	8,95	14	31	1670	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,74	0,82	0,86	557
330	450	355M/L	216	6,8	2,2	2,4	9,84	17	37	1769	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,75	0,83	0,86	584
355	480	355M/L	232	6,9	2,4	2,3	10,7	15	33	1888	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,75	0,83	0,86	628
370	500	355M/L	242	7,3	2,6	2,4	11,7	11	24	1971	76	1490	94,9	95,1	94,9	0,75	0,83	0,86	654
400	550	355M/L	261	7,3	2,6	2,4	11,7	11	24	1971	76	1490	94,7	95,1	94,9	0,74	0,82	0,86	707

Figura 10. Ejemplo de un catálogo de un fabricante internacional de motores

De los datos del catálogo puede extraerse mucha información, como son la potencia, tensión intensidad, rendimiento y factor de potencia nominales del motor, pero también los valores de rendimiento y factor de potencia a media carga,  $\frac{3}{4}$  y plena carga, y otros como la intensidad relativa de arranque, momento de inercia, la masa, el nivel del ruido, etc. Muchas de esas variables ayudarán a la hora de la elección.

El estudio que se presenta en este proyecto, se van a dividir en tres partes:

- La primera parte, llamada Casos Prácticos, consiste en estudiar si sería rentable económicamente utilizar un motor de la misma clase de eficiencia pero sobredimensionado. Para realizar este estudio se van a utilizar 6 perfiles de carga a carga escalonada en uno o varios escalones dependiendo del caso.
- La segunda parte, llamada análisis de sensibilidad, consistirá en realizar un análisis exhaustivo de posibles cambios en distintas variables elegidas.

- Y la tercera parte, consistirá en la realización de un estudio, en el cual un motor con baja eficiencia ya amortizado se sustituye con un motor de mayor eficiencia y sobredimensionado. Para este estudio se va a utilizar un perfil de carga con carga variable en el tiempo.

### 1.6.1 Primera parte. Teoría Casos Prácticos

Como se comentó anteriormente, la potencia eléctrica de un motor no se transforma completamente en potencia mecánica debido a unas pérdidas en forma de calor, esto hace que un motor no tenga rendimiento 100%. El rendimiento del motor no es más, que la potencia útil entre la potencia total, lo que es lo mismo a la potencia mecánica entre la potencia eléctrica absorbida.

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elect}} ; P_{elect} = \frac{P_{mec}}{\eta}$$

$$P_{\text{p\u00e9rdidas}} = P_{elect} - P_{mec};$$

$$P_{\text{p\u00e9rdidas}} = \frac{P_{mec}}{\eta} - P_{mec}$$

Teniendo en cuenta que del cat\u00e1logo se obtienen la  $P_{elect}$  y el  $\eta$ , se puede obtener la potencia mec\u00e1nica y as\u00ed las p\u00e9rdidas para factores de carga a media, tres cuarto y plena carga.

Sin embargo, normalmente, y m\u00e1s cuando se sobredimensiona un motor, con tener esos factores de carga no es suficiente. Para paliar ese problema se ha tenido que realizar una ecuaci\u00f3n para obtener las p\u00e9rdidas cuando el factor de carga es diferente a los tres anteriormente mencionados.

La forma de esa ecuaci\u00f3n es la siguiente:

$$P_p = A * x^2 + B * x + C$$

Teniendo en cuenta que el t\u00e9rmino  $B * x$  es muy peque\u00f1o, se ha optado por simplificar la ecuaci\u00f3n, la cual queda de la siguiente manera:

$$P_p = A * x^2 + C$$

Siendo:

$P_p$ : Potencia p\u00e9rdida

A y C: constantes de la ecuaci\u00f3n.

X : factor de carga.

Por lo tanto, teniendo tres rendimientos y tres factores de carga, tenemos tres ecuaciones con dos inc\u00f3gnitas (A y C)

La resoluci\u00f3n de estas ecuaciones se ha realizado mediante el sistema de c\u00f3mputo num\u00e9rico MATLAB, utilizando el m\u00e9todo de los m\u00ednimos cuadrados.

Para visualizarlo de forma sencilla, esas tres ecuaciones de forma matricial quedar\u00edan de la siguiente manera:

$$D^T D x = D^T b$$

$$\begin{bmatrix} FC_{0.5}^2 & 1 \\ FC_{0.75}^2 & 1 \\ FC_1^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pp_{0.5} \\ Pp_{0.75} \\ Pp_1 \end{bmatrix}$$

Pues de esa forma y con la ayuda de MATLAB, como anteriormente fue comentado, se obtienen las constantes A y C para cada motor, y por lo tanto, ya se obtienen las pérdidas para todos los factores de carga FC (potencia relativa) que se necesiten. Y mediante la ecuación anteriormente comentada se obtienen los rendimientos.

$$E_M(P(t)) = \int_0^T P(t)dt = T \frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt$$

$$E_M(P(t)) = PT$$

Una vez obtenidos, las pérdidas se puede calcular la potencia mecánica de los casos prácticos objeto de estudio, mediante las siguientes ecuaciones. Destacar, que como se comentó anteriormente, para la primera parte se han estudiado seis perfiles de carga a carga escalonada, por lo tanto, la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$E_M(P(t)) = PT$$

Siendo  $E_M$  la energía mecánica útil anual (kWh)

T el tiempo de funcionamiento anual (h)

P la potencia (kW)

Tras el cálculo de la energía mecánica útil anual se calcula el coste de la energía, simplemente multiplicando por su precio. Sin embargo, también hay que tener en cuenta la energía pérdida, calculada de la siguiente forma.

$$E_p = \text{Pérdidas} * T$$

$$C_e = (E_M + E_p) * p_e$$

Donde  $C_e$  es el coste anual de la energía (€)

$p_e$  el precio de la energía ( $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ )

$E_p$  la energía pérdida (kWh)

Tras esto, se puede calcular la variable de rentabilidad de esta primera parte, la cual es el VAN.

$$VAN(Ci) = -Ci - \sum_{n=1}^N Ce * \frac{(1 + \Delta Ce)^n}{(1 + d)^n} = -Ci - \sum_{n=1}^N Ce * \frac{1}{(1 + d_{eq})^n}$$

$$VAN(Ci) = -Ci - Ce * k_{act}$$

Siendo

N el número de años de la inversión.

Ci la inversión

$\Delta Ce$  incremento del coste de la energía

$d$  la tasa de interés.

$d_{eq}$  la tasa de descuento equivalente.

$$K_{ACT} \text{ es } \sum_{n=1}^N \frac{1}{(1+d_{eq})^n}$$

Para facilitar los cálculos se obtiene mediante la siguiente ecuación una tasa de interés equivalente, que hace que se simplifique en gran forma, la ecuación del VAN, y posteriormente siguiendo y apostando por la facilidad obtenemos la  $k_{act}$

$$\frac{1}{1+d_{eq}} = \frac{1+\Delta Ce}{1+d} \rightarrow d_{eq} = \frac{d-\Delta Ce}{1+\Delta Ce}$$

$$k_{act} = \frac{(1+d_{eq})^N - 1}{d_{eq} * (1+d_{eq})^N}$$

$$\eta = \frac{E_M}{(E_M + E_P)} = \frac{P_M}{P_{elect}}$$

Ese es el procedimiento de cálculo seguido cuando el perfil de carga es constante en el tiempo. Cuando el ciclo de funcionamiento incluye varios niveles de carga, el procedimiento es bastante similar, habiendo algunas pequeñas diferencias.

En primer lugar, se calcula la potencia eficaz.

La potencia eficaz sirve para saber la potencia máxima que puede tener nuestro motor sin sufrir un calentamiento excesivo. En el anterior caso, no se estudió, ya que al ser un perfil constante, la potencia eficaz coincide con la potencia mecánica.

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{\sum P_u^2 * t_m}{T}}$$

Luego, el procedimiento de cálculo sigue el mismo curso que el caso expuesto, añadiendo términos, ya que ahora habrá dos rendimientos, uno por escalón, lo que quiere decir que la potencia eléctrica será diferente para cada escalón.

Una vez conocida las potencias eléctricas y los tiempos (duraciones) de cada escalón, la potencia eléctrica total absorbida será,

$$P_{elect} = P_{elect1} * t_{m1} + P_{elect2} * t_{m2} = (P_{mec1} + P_{P1}) * t_{m1} + (P_{mec2} + P_{P2}) * t_{m2}$$

Siendo

$P_p$  las pérdidas cuadráticas,  $P_{elect}$  potencia eléctrica total

$T_m$  el tiempo del escalón

Subíndices 1 y 2, el escalón primero y segundo, respectivamente.

Una vez calculada  $P_{elect}$ , el procedimiento de cálculo sigue siendo el mismo hasta llegar a la energía mecánica y a la energía pérdida, donde ocurre algo parecido a la potencia eléctrica.

$$E_M(P(t)) = P_1 * T_1 + P_2 * T_2$$

$$E_{perd} = Pérdidas_1 * T_1 + Pérdidas_2 * T_2$$

### 1.6.2 Segunda parte. Análisis de sensibilidad

Esta segunda parte en relación a fórmulas seguidas es igual que la anterior. En ella, simplemente cambian algunos valores de variables. Estas variables son modificadas para realizar varios análisis de sensibilidad. Como se comentó anteriormente, la incertidumbre suele ser crucial para la realización de proyectos. En esa incertidumbre está la posibilidad de variaciones en sus variables que hacen que el proyecto no sea como se había planteado. Para evitar esto e intentar dar luz, se van a realizar los siguientes análisis de sensibilidad:

- Variación del precio de la energía.
  - Aumento del precio de la electricidad a 0.15€/kWh
  - Disminución del precio de la electricidad a 0.05€/kWh
- Disminución del número de horas de funcionamiento del motor
  - 2.000h
  - 5.000h
- Aumento de la tasa de interés al 8%
- Aumento del precio del motor un 40%
- Disminución del precio del motor un 40%

### 1.6.3 Tercera parte. Curva ordenada de carga

Tal y como se comentó anteriormente, la tercera parte del proyecto se ha realizado mediante una curva de carga de un motor real (variable en el tiempo), cómo se puede observar en la Figura 11.

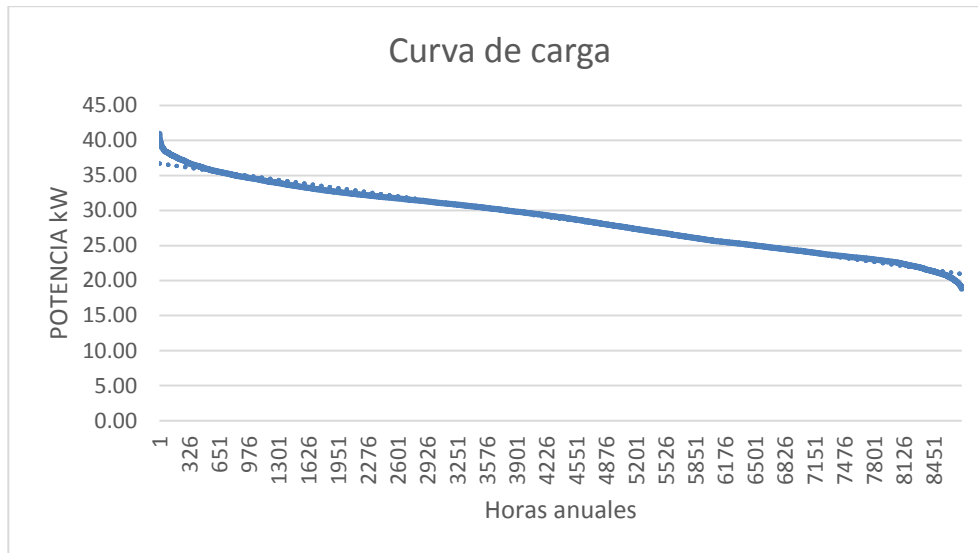


Figura 11. Curva de carga de un motor real.

Para simplificar los cálculos de esa curva, se ha realizado aproximaciones lineales. Para intentar disminuir el error lo mínimo posible de una aproximación a una recta, se ha dividido la curva en cuatro partes.

$$y = -0.0029 * x + 37.791 \text{ para } 0 \leq x < 2.000$$

$$y = -0.0015 * x + 32.68 \text{ para } 2.000 \leq x < 5.000$$

$$y = -0.0017 * x + 27.616 \text{ para } 5.000 \leq x < 7.500$$

$$y = -0.0029 * x + 23.886 \text{ para } 7.500 \leq x < 8.760$$

Tras esa división se ha conseguido obtener las ecuaciones correspondientes a la curva, las cuales tienen la forma de la ecuación superior. Una vez realizado todo eso, el procedimiento seguido es muy similar al apartado 2. CASOS PRÁCTICOS. Sin embargo, en este caso hay que añadir dos índices de rentabilidad que no aparecieron antes como son el caso de la TIR y el PB.

La TIR o tasa interna de retorno, es el interés o rentabilidad que ofrece una inversión.

Es un indicador muy útil para el empresario porque a un simple golpe de vista puede valorar si la inversión es rentable o no.

La TIR suele compararse con la  $d_{eq}$ . Si la TIR es mayor que ésta la inversión es rentable, en caso contrario la inversión no lo sería. La TIR se calcula igualando el VAN a 0 como se puede observar en las siguientes ecuaciones.

$$TIR \rightarrow VAN = 0$$



$$VAN(Ci) = 0 = +Ci + \frac{\Delta Ce * [(1 + TIR)^N - 1]}{TIR * (1 + TIR)^N}$$

El otro indicador usado será el PB, o *pay back*, es el tiempo en el cual la inversión es recuperada. Existen dos tipos de PB dependiendo si tiene en cuenta el valor del dinero. En nuestro caso, usaremos el que si lo tiene en cuenta debido a que es más real. Se calcula de forma similar a la TIR, igualando el VAN a 0

$$PB \rightarrow VAN = 0$$

$$VAN(Ci) = 0 = +Ci + \frac{\Delta Ce * [(1 + deq)^{PB} - 1]}{deq * (1 + deq)^{PB}}$$

Una vez introducidos los indicadores utilizados se pretende explicar como se han usado.

En primer lugar, los datos de entrada son los siguientes:

Inicialmente una empresa tiene un motor con eficiencia IE1 y 30kW de potencia nominal, ya amortizado. El resto de variables de las que depende el problema se han utilizado las mismas que las del artículo empleado. Además, se ha supuesto cambiar a un motor con clase de eficiencia IE3 o IE4 con la potencia actual y sobredimensionada.

Para ello y no repetir el procedimiento seguido en los casos prácticos, se ha procedido a calcular diferencia de energía de ambos motores para así calcular el ahorro energético.

$$\Delta E = E_0 - E_f$$

$$\Delta Ce = \Delta E * p_e$$

Una vez obtenidos, y teniendo en cuenta que el motor IE1 ya lo tiene la empresa, se ha procedido a añadir la inversión del motor nuevo, y se ha supuesto que el otro motor se vende por un 5% de su valor.

A partir de la inversión y del precio de la energía se obtiene el VAN como se comentó anteriormente y posteriormente se calcula la TIR, de la forma anteriormente descrita.

$$TIR \rightarrow VAN = 0$$

$$VAN(Ci) = 0 = +Ci + \frac{\Delta Ce * [(1 + TIR)^N - 1]}{TIR * (1 + TIR)^N}$$

Siendo:

N número de años

Ci inversión

$\Delta Ce$  la diferencia del coste de energía entre ambos motores

Tras la TIR, sacamos el siguiente indicador estudiado PB, se calcula de forma similar.

$$PB \rightarrow VAN = 0$$

$$VAN(Ci) = 0 = +Ci + \frac{\Delta Ce * [(1 + deq)^{PB} - 1]}{deq * (1 + deq)^{PB}}$$

De la siguiente formula se obtiene el PAY BACK.

Ya conocidos los tres indicadores mencionados, se puede analizar si es rentable o no, el cambio a un motor de mayor eficiencia cuando el motor actual de una empresa está amortizado.

# 2 CASOS PRÁCTICOS

Tras la explicación teórica detallada del apartado anterior, y siguiendo cada uno de esos pasos, se pretende aplicar los conocimientos planteados a los casos prácticos y para así poder analizar el comportamiento del sobredimensionamiento de los motores.

Los casos prácticos no son más que 6 perfiles de carga, tomados de [Technical and economic considerations on induction motor oversizing.], que puede tener un motor durante su vida útil. Cabe destacar que son perfiles de carga a carga escalonados, constantes en cada intervalo de tiempo.

Una vez descrito el funcionamiento seguido, en el apartado anterior, se introduce los catálogos usados para la elaboración de los casos prácticos.

Tabla 2. Catálogo de un motor de eficiencia IE1. Fabricante WEG.

Potencia		Carcasa	Full Load Torque (kgfm)	Corriente con rotor trabado I <sub>v</sub> /I <sub>n</sub>	Par con rotor trabado T <sub>v</sub> /T <sub>n</sub>	Break-down Torque T <sub>b</sub> /T <sub>n</sub>	Momento de Inercia J (kgm <sup>2</sup> )	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400V						Corriente nominal I <sub>n</sub> (A)	
kW	HP							% de la potencia nominal				RPM	Rendimiento			Factor de potencia			
								Caliente	Frio				50	75	100	50	75	100	
N Poles																			
0,12	0,16	63	0,087	3,5	1,8	2,0	0,0003	38	84	5,2	44	1350	46,0	53,0	55,0	0,51	0,64	0,75	0,420
0,18	0,25	63	0,128	3,8	1,9	1,9	0,0006	16	35	6,2	44	1370	51,0	55,0	57,0	0,52	0,65	0,75	0,610
0,25	0,33	71	0,178	3,7	1,8	1,9	0,0006	28	62	5,5	43	1370	53,0	58,0	61,5	0,50	0,62	0,71	0,826
0,37	0,5	71	0,258	3,6	2	2	0,0007	28	62	7,0	43	1395	58,0	62,0	66,0	0,50	0,64	0,73	1,11
0,55	0,75	80	0,379	4,9	2	2,4	0,0024	8	18	9,5	44	1415	65,0	70,0	71,0	0,57	0,72	0,81	1,38
0,75	1	80	0,513	4,9	2,1	2,3	0,0030	7	15	10,5	44	1425	70,0	72,0	72,3	0,58	0,72	0,81	1,85
1,1	1,5	90S	0,749	5,8	1,8	2,4	0,0052	7	15	14,5	49	1430	72,5	75,5	75,5	0,60	0,74	0,82	2,57
1,5	2	90L	1,04	5,5	1,9	2,2	0,0066	8	18	17,0	49	1410	74,5	77,5	77,5	0,58	0,73	0,82	3,41
2,2	3	100L	1,50	5,6	2,4	2,6	0,0090	9	20	23,0	53	1430	79,0	80,0	80,0	0,60	0,74	0,82	4,84
3	4	100L	2,06	6,5	3,1	3,2	0,0082	8	18	30,0	53	1420	79,0	81,5	81,5	0,52	0,66	0,75	7,08
4	5,5	112M	2,71	6,2	2,1	2,5	0,0180	9	20	33,0	56	1440	82,5	83,5	83,5	0,61	0,73	0,80	8,64
5,5	7,5	132S	3,66	7,5	2,1	2,5	0,0453	7	15	47,0	60	1465	84,0	85,5	85,5	0,63	0,77	0,84	11,1
7,5	10	132M	5,00	6,4	2	2,5	0,0601	8	18	64,5	60	1460	85,5	87,0	87,0	0,63	0,75	0,82	15,2
9,2	12,5	160M	6,14	6,0	2	2,4	0,0767	9	20	83,0	61	1460	86,8	87,5	87,4	0,64	0,76	0,82	18,5
11	15	160M	7,34	6,0	2,1	2,5	0,0906	9	20	96,0	61	1460	87,0	88,0	88,0	0,64	0,76	0,82	22,0
15	20	160L	9,94	7,1	2,6	3,1	0,1325	8	18	121	61	1470	89,0	89,7	89,3	0,66	0,76	0,83	29,2
18,5	25	180M	12,3	7,5	2,7	3,1	0,1398	12	26	152	61	1470	88,0	89,5	90,2	0,65	0,75	0,82	36,1
22	30	180L	14,6	6,6	2,4	2,9	0,1653	10	22	164	61	1465	90,0	90,8	90,7	0,66	0,77	0,84	41,7
30	40	200L	19,9	6,6	2,3	2,6	0,2802	13	29	212	65	1470	91,3	91,7	91,5	0,68	0,78	0,84	56,3
37	50	225S/M	24,4	6,7	2,3	2,7	0,3944	10	22	342	66	1475	92,0	92,4	92,2	0,71	0,81	0,85	68,1
45	60	225S/M	29,7	7,5	2,5	2,7	0,4684	10	22	363	66	1475	92,2	92,2	92,6	0,72	0,82	0,86	81,6
55	75	250S/M	36,3	6,7	2,4	2,6	0,7731	12	26	431	66	1475	92,9	93,2	93,1	0,73	0,82	0,85	100
75	100	280S/M	49,2	6,6	2	2,6	1,48	22	48	639	69	1495	93,0	93,5	93,5	0,73	0,81	0,85	136
90	125	280S/M	59,0	6,8	2,1	2,5	1,79	20	44	673	69	1495	93,2	93,9	93,8	0,75	0,83	0,85	163
110	150	315S/M	71,9	6,4	2	2,4	2,55	26	57	897	71	1490	93,6	94,3	94,1	0,75	0,83	0,86	196
132	180	315S/M	86,3	6,9	2,3	2,4	3,11	22	48	953	71	1490	93,9	94,5	94,3	0,74	0,83	0,86	235
132	180	315S/M	86,3	6,9	2,3	2,4	3,11	22	48	953	71	1490	93,9	94,5	94,3	0,74	0,83	0,86	235
150	200	315S/M	98,1	7,0	2,5	2,8	3,34	18	40	1012	71	1490	94,0	94,5	94,5	0,74	0,82	0,86	266
160	220	315S/M	105	7,3	2,4	2,5	3,54	18	40	1012	71	1490	94,1	94,6	94,5	0,73	0,82	0,86	284
185	250	315S/M	121	6,9	2,4	2,3	3,98	17	37	1071	71	1490	94,3	94,7	94,6	0,74	0,82	0,86	328
200	270	315L	131	6,9	2,4	2,3	4,41	16	35	1216	74	1490	94,4	94,8	94,7	0,76	0,84	0,85	359
220	300	315L	144	7,7	2,6	2,4	4,85	14	31	1330	74	1490	94,5	94,9	94,8	0,74	0,83	0,86	389
250	340	315L	163	7,8	2,7	2,5	5,40	12	26	1399	74	1490	94,6	94,9	94,8	0,75	0,83	0,86	443
260	350	315L	170	7,8	2,7	2,5	5,40	12	26	1399	74	1490	94,6	94,9	94,8	0,75	0,83	0,86	460
280	380	315L	183	7,9	2,7	2,5	6,16	12	26	1496	74	1490	94,6	95,0	94,9	0,74	0,82	0,86	495
300	400	355M/L	196	7,2	2,2	2,4	8,59	18	40	1560	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,74	0,82	0,85	537
315	430	355M/L	206	7,2	2,4	2,4	8,95	14	31	1670	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,74	0,82	0,86	557
330	450	355M/L	216	6,8	2,2	2,4	9,84	17	37	1769	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,75	0,83	0,86	584
355	480	355M/L	232	6,9	2,4	2,3	10,7	15	33	1888	76	1490	94,6	95,0	94,9	0,75	0,83	0,86	628
370	500	355M/L	242	7,3	2,6	2,4	11,7	11	24	1971	76	1490	94,9	95,1	94,9	0,75	0,83	0,86	654
400	550	355M/L	261	7,3	2,6	2,4	11,7	11	24	1971	76	1490	94,7	95,1	94,9	0,74	0,82	0,86	707

Tabla 3. Catálogo de un motor de eficiencia IE2. Fabricante WEG.

Potencia		Carcasa	Full Load Torque (kgm)	Corriente con rotor trabado I/ In	Par con rotor trabado TVTn	Break-down Torque Tb/Tn	Momento de inercia J (kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400 V								
								Caliente	Frio			% de la potencia nominal						Corriente nominal In (A)		
												Rendimiento			Factor de potencia					
KW	HP											RPM	50	75	100	50	75	100		
<b>M Polos</b>																				
0,12	0,16	63	0,085	3,9	1,8	2,0	0,0004	51	112	7,0	44	1380	55,0	58,0	59,1	0,54	0,67	0,77	0,381	
0,18	0,25	63	0,125	4,1	2	2	0,0006	40	88	7,6	44	1400	53,0	59,0	64,7	0,48	0,61	0,70	0,574	
0,25	0,33	71	0,174	4,5	2	2,2	0,0007	68	150	10,2	43	1400	59,0	65,0	68,5	0,49	0,62	0,71	0,742	
0,37	0,5	71	0,261	4,3	2	2	0,0008	48	106	10,8	43	1380	63,0	68,0	72,7	0,50	0,62	0,72	1,02	
0,55	0,75	80	0,369	6,0	2,3	3,2	0,0029	18	40	15,0	44	1450	72,0	73,8	77,1	0,55	0,68	0,75	1,37	
0,75	1	80	0,518	6,0	2,6	2,6	0,0029	15	33	15,0	44	1410	79,0	79,5	79,6	0,63	0,76	0,81	1,68	
1,1	1,5	90S	0,744	6,5	2,1	2,6	0,0049	14	31	20,8	49	1440	81,0	81,8	81,8	0,62	0,75	0,81	2,40	
1,5	2	90L	1,01	6,3	2	2,8	0,0055	10	22	23,0	49	1440	81,5	83,0	83,0	0,57	0,71	0,80	3,26	
2,2	3	100L	1,49	7,0	3,1	3,2	0,0105	11	24	35,5	53	1435	83,0	84,5	84,5	0,60	0,73	0,81	4,64	
3	4	100L	2,06	6,5	3,2	3,3	0,0097	14	31	34,0	53	1420	85,0	85,6	85,6	0,63	0,75	0,82	6,17	
4	5,5	112M	2,71	6,6	2	2,6	0,0156	13	29	43,0	56	1440	86,0	86,7	86,7	0,62	0,74	0,80	8,32	
5,5	7,5	132S	3,67	7,3	1,9	3	0,0528	8	18	67,0	60	1460	86,5	87,3	87,7	0,68	0,80	0,86	10,5	
7,5	10	132M	4,99	7,8	2,1	3	0,0528	8	18	68,0	60	1465	88,7	89,0	89,0	0,68	0,79	0,84	14,5	
9,2	12,5	160M	6,12	6,0	2	2,6	0,0838	13	29	96,0	61	1465	88,5	89,5	89,3	0,66	0,77	0,83	17,9	
11	15	160M	7,29	6,4	2,3	2,8	0,1048	10	22	105	61	1470	89,0	90,2	90,2	0,65	0,76	0,83	21,2	
15	20	160L	9,97	6,2	2,3	2,8	0,1255	10	22	125	61	1465	90,6	91,0	91,0	0,66	0,76	0,83	28,7	
18,5	25	180M	12,3	6,6	2,4	2,8	0,1657	14	31	164	61	1465	91,5	91,8	91,6	0,68	0,78	0,83	35,1	
22	30	180L	14,6	6,8	2,6	2,9	0,2006	15	33	186	61	1465	92,2	92,5	92,3	0,70	0,80	0,85	40,5	
30	40	200L	19,9	6,3	2,2	2,6	0,2929	16	35	222	65	1470	92,6	93,0	92,8	0,64	0,75	0,81	57,6	
37	50	225S/M	24,4	6,6	2,2	2,7	0,4438	12	26	342	66	1475	93,0	93,2	93,2	0,74	0,83	0,86	66,6	
45	60	225S/M	29,7	6,8	2,4	2,7	0,5177	10	22	363	66	1475	93,2	93,7	93,6	0,72	0,81	0,84	82,6	
55	75	250S/M	36,3	6,4	2,2	2,7	0,8118	14	31	444	66	1475	93,6	93,9	94,0	0,75	0,84	0,87	97,1	
75	100	280S/M	49,2	7,2	2	2,7	1,64	22	48	639	69	1485	93,8	94,4	94,4	0,74	0,83	0,86	133	
90	125	280S/M	59,0	7,2	2,1	2,7	1,88	20	44	673	69	1485	94,1	94,7	94,7	0,76	0,84	0,87	158	
110	150	315S/M	71,9	6,6	2,3	2,5	2,57	26	57	887	71	1490	94,3	95,0	95,0	0,74	0,83	0,86	194	
132	180	315S/M	86,3	6,6	2,1	2,4	3,12	22	48	953	71	1490	94,6	95,2	95,2	0,76	0,84	0,87	230	
132	180	315S/M	86,3	6,6	2,1	2,4	3,12	22	48	953	71	1490	94,6	95,2	95,2	0,76	0,84	0,87	230	
150	200	315S/M	98,1	6,2	2,2	2,4	3,34	30	66	983	71	1490	95,0	95,4	95,4	0,77	0,84	0,87	261	
160	220	315S/M	105	6,6	2,2	2,4	3,56	20	44	1012	71	1490	94,8	95,4	95,4	0,77	0,84	0,87	278	
185	250	315S/M	121	6,8	2,4	2,4	3,99	18	40	1114	71	1490	94,9	95,6	95,6	0,75	0,83	0,86	325	
200	270	315L	131	7,0	2,4	2,6	4,43	17	37	1216	74	1490	95,0	95,6	95,6	0,77	0,84	0,86	351	
220	300	315L	144	7,0	2,6	2,4	4,89	14	31	1333	74	1490	95,2	95,7	95,7	0,76	0,84	0,87	381	
250	340	315L	163	7,0	2,6	2,4	5,44	13	29	1399	74	1490	95,3	95,7	95,7	0,77	0,85	0,88	428	
260	350	355M/L	170	6,8	2,1	2,4	7,73	18	40	1470	76	1490	95,4	95,8	95,8	0,73	0,82	0,85	461	
280	380	315L	183	7,2	2,6	2,4	6,20	12	26	1496	74	1490	95,4	95,8	95,8	0,76	0,84	0,87	485	
300	400	355M/L	196	7,2	2,2	2,4	8,59	18	40	1510	76	1490	95,5	95,8	95,8	0,74	0,82	0,85	532	
315	430	355M/L	206	7,2	2,5	2,8	8,95	14	31	1643	76	1490	95,5	95,8	95,8	0,72	0,81	0,84	565	
330	450	355M/L	216	6,8	2,2	2,4	9,84	17	37	1769	76	1490	95,5	95,8	95,8	0,73	0,81	0,84	592	
355	480	355M/L <sup>1</sup>	232	6,9	2,4	2,3	10,7	15	33	1752	76	1490	95,5	95,9	95,8	0,75	0,83	0,86	622	
370	500	355M/L <sup>1</sup>	242	7,0	2,4	2,4	11,6	15	33	1971	76	1490	95,5	95,9	95,8	0,75	0,83	0,86	648	
400	550	355M/L <sup>1</sup>	261	7,8	2,6	2,4	11,6	11	24	1888	76	1490	95,5	95,9	95,8	0,74	0,82	0,86	701	
450	610	355A/B <sup>1</sup>	294	7,4	2,5	2,8	13,2	20	44	2089	76	1490	94,5	95,0	95,5	0,69	0,80	0,84	810	
500	680	355A/B <sup>1</sup>	327	7,3	2,4	2,7	14,6	17	37	2246	76	1490	94,5	95,0	95,5	0,72	0,81	0,85	889	

Tabla 4. Catálogo de un motor de eficiencia IE3. Fabricante WEG.

Potencia KW HP	Carcasa	Full Load Torque (kgfm)	Corriente con rotor trabado I <sub>in</sub>	Par con rotor trabado T <sub>v</sub> /T <sub>n</sub>	Break-down Torque T <sub>b</sub> /T <sub>n</sub>	Momento de inercia J (kgm <sup>2</sup> )	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400V						Corriente nominal I <sub>n</sub> (A)		
							Caliente	Frio			RPM	% de la potencia nominal			Factor de potencia				
												50	75	100	50	75		100	
0,12	63	0,085	4,4	2,1	2,3	0,0004	30	66	7,3	44	1370	57,0	63,0	64,8	0,52	0,62	0,73	0,366	
0,18	63	0,128	4,7	2,1	2,4	0,0006	30	66	7,6	44	1370	65,0	67,0	69,9	0,53	0,63	0,72	0,516	
0,25	71	0,175	4,8	2,3	2,3	0,0007	30	66	10,7	43	1390	69,0	72,0	73,5	0,52	0,65	0,72	0,682	
0,37	71	0,260	4,8	2,8	2,9	0,0008	30	66	9,5	43	1385	73,0	75,0	77,3	0,50	0,62	0,70	0,987	
0,55	80	0,377	6,6	2,8	3	0,0026	20	44	16,2	44	1420	77,0	79,0	80,8	0,51	0,74	0,80	1,23	
0,75	80	0,514	6,7	3	3,3	0,0032	18	40	16,2	44	1420	80,0	82,0	82,5	0,59	0,72	0,81	1,62	
1,1	90S	0,736	7,6	2,5	3,3	0,0055	15	33	22,0	49	1455	83,0	84,5	84,8	0,59	0,72	0,80	2,34	
1,5	2	90L	1,01	7,4	2,6	3,4	0,0066	13	29	23,0	49	1450	84,0	86,0	86,0	0,58	0,72	0,80	3,15
2,2	3	100L	1,49	7,4	3,2	3,5	0,0090	18	40	31,5	53	1435	86,5	87,0	87,0	0,60	0,73	0,80	4,56
3	4	L100L	2,03	7,8	3,5	3,7	0,0120	15	33	37,5	53	1440	87,0	88,0	88,0	0,60	0,73	0,80	6,15
4	5,5	L12M	2,69	7,0	2,3	3,1	0,0182	15	33	50,0	56	1450	88,7	89,1	89,1	0,60	0,72	0,79	8,20
5,5	7,5	L32S	3,66	8,5	2,4	3,4	0,0528	15	33	69,0	56	1465	90,0	90,7	90,7	0,67	0,79	0,85	10,3
7,5	10	L32M	4,99	8,5	2,5	3,4	0,0642	13	29	78,0	56	1465	91,0	91,5	91,5	0,68	0,79	0,84	13,9
9,2	12,5	L32M/L	6,12	8,6	2,8	3,5	0,0681	10	22	82,0	56	1465	90,3	91,0	91,0	0,64	0,76	0,82	17,4
11	15	L60M	7,29	7,0	2,5	3	0,1397	17	37	123	61	1470	91,0	91,8	92,0	0,65	0,76	0,83	20,7
15	20	L60L	9,94	7,3	2,7	3,2	0,1743	10	22	145	61	1470	91,8	92,5	93,0	0,65	0,76	0,82	28,4
18,5	25	L80M	12,3	7,3	2,7	3	0,2001	20	44	180	61	1470	92,2	92,9	93,3	0,64	0,76	0,82	34,9
22	30	L80L	14,6	7,3	2,8	3,3	0,2272	18	40	198	61	1470	92,4	93,0	93,6	0,66	0,77	0,83	40,9
30	40	L200L	19,7	8,0	2,7	3	0,3469	16	35	243	63	1480	93,0	94,0	94,2	0,64	0,75	0,82	56,1
37	50	L225M	24,4	8,3	2,8	3	0,6388	14	31	392	63	1490	94,0	94,5	94,6	0,68	0,79	0,84	67,2
45	60	L225M	29,6	7,9	2,8	3,2	0,6903	13	29	420	63	1480	94,2	94,8	94,8	0,70	0,80	0,85	70,4
55	75	L250S/M	36,2	7,9	2,8	3,3	1,11	14	31	507	64	1480	94,6	95,0	95,3	0,71	0,81	0,86	96,9
75	100	L280S/M	49,2	7,5	2,8	2,25	2,26	57	729	69	1485	94,7	95,2	95,6	0,75	0,83	0,87	130	
90	125	L280S/M	59,0	7,4	2,3	2,8	2,55	25	55	777	69	1485	95,0	95,5	95,8	0,74	0,82	0,85	159
110	150	L315S/M	71,9	7,5	2,6	2,7	3,55	30	66	1010	71	1490	95,4	95,9	96,3	0,74	0,83	0,86	192
132	180	L315S/M	86,3	8,1	2,9	3	4,22	26	57	1095	71	1490	95,5	96,0	96,2	0,75	0,83	0,86	230
132	180	L315S/M	86,3	7,6	2,9	3	4,22	26	57	953	71	1490	95,5	96,0	96,4	0,75	0,83	0,86	230
150	200	L315S/M	98,1	7,8	2,7	2,9	3,77	27	59	1180	71	1490	95,4	95,8	95,9	0,71	0,81	0,85	266
160	220	L315S/M	105	7,6	2,6	2,6	4,65	22	48	1152	71	1490	95,7	96,2	96,5	0,75	0,83	0,87	275
185	250	L315S/M	121	7,6	2,9	2,5	4,97	18	40	1222	71	1490	95,8	96,3	96,5	0,74	0,83	0,87	318
200	270	L355M/L	131	7,6	2,5	2,8	7,01	22	48	1495	74	1490	95,9	96,5	96,7	0,72	0,81	0,85	351
220	300	L355M/L	144	7,4	2,4	2,5	7,52	20	44	1554	74	1490	96,0	96,6	96,8	0,72	0,80	0,85	386
250	340	L355M/L	163	7,3	2,3	2,4	8,59	16	35	1621	74	1490	95,8	96,0	96,3	0,73	0,82	0,85	441
260	350	L355M/L	170	7,3	2,3	2,4	8,59	16	35	1621	74	1490	96,2	96,6	96,9	0,73	0,82	0,85	456
280	380	L355M/L	183	7,3	2,3	2,4	9,66	20	44	1695	74	1490	96,3	96,7	96,9	0,74	0,83	0,86	485
315	430	L355M/L	206	7,8	2,9	3	10,7	22	48	1772	74	1490	96,4	96,7	96,9	0,71	0,81	0,85	552
355	480	L355M/L <sup>1</sup>	232	7,2	2,4	2,5	11,6	15	33	1878	74	1490	95,9	96,5	96,5	0,74	0,83	0,86	617

Tabla 5. Catálogo de un motor de eficiencia IE4. Fabricante WEG

N Polos		Carcasa	Full Load Torque (kgfm)	Corriente con rotor trabado I <sub>in</sub>	Par con rotor trabado T <sub>v</sub> /T <sub>n</sub>	Break-down Torque T <sub>b</sub> /T <sub>n</sub>	Momento de inercia J (kgm <sup>2</sup> )	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400V						Corriente nominal I <sub>n</sub> (A)	
50	75							100	50			75	100						
5,5	7,5	L132S	3,64	8,8	2,9	3,5	0,0640	16	35	78,0	56	1470	90,8	91,8	91,9	0,63	0,75	0,82	10,5
7,5	10	L132M/L	4,97	9,3	3,2	3,6	0,0791	14	31	84,0	56	1470	91,4	92,3	92,6	0,62	0,74	0,81	14,4
9,2	12,5	L160M	6,05	8,6	3	3,3	0,1398	16	35	115	61	1480	91,9	92,9	93,0	0,61	0,74	0,81	17,6
11	15	L160M	7,26	8,2	3	3,5	0,1537	14	31	125	61	1475	92,0	93,0	93,3	0,61	0,73	0,81	21,0
15	20	L160L	9,91	7,2	3	3,2	0,1813	28	62	150	61	1475	92,7	93,6	93,9	0,63	0,75	0,81	28,5
18,5	25	L180M	12,2	8,2	3	3,4	0,2291	16	35	185	61	1480	93,6	94,2	94,2	0,64	0,76	0,83	34,2
22	30	L180L	14,5	8,7	3,3	3,8	0,2594	14	31	200	61	1480	93,7	94,3	94,5	0,63	0,75	0,82	41,0
30	40	L200L	19,7	7,4	2,8	3,2	0,3979	18	40	284	63	1485	93,9	94,7	94,9	0,60	0,73	0,81	56,3
37	50	L225S/M	24,3	7,9	2,8	3,2	0,7346	21	46	430	63	1485	94,6	95,1	95,2	0,67	0,78	0,84	66,8
45	60	L225S/M	29,5	8,3	2,9	3,3	0,7346	15	33	440	63	1485	94,2	95,0	95,4	0,62	0,74	0,82	83,0
55	75	L250S/M	36,1	8,3	3	3,4	1,21	17	37	531	64	1485	94,9	95,4	95,7	0,66	0,78	0,83	100
75	100	L280S/M	49,0	7,9	2,9	2,9	2,78	40	88	830	69	1490	95,5	96,1	96,2	0,72	0,81	0,85	132
90	125	L280S/M	59,0	7,9	3	2,9	3,40	40	88	895	69	1485	95,9	96,3	96,4	0,73	0,82	0,86	157
110	150	L315S/M	71,9	7,4	2,7	2,7	4,42	54	119	1150	71	1490	95,8	96,4	96,8	0,73	0,82	0,86	191
132	175	L315S/M	86,3	7,5	2,8	2,7	5,29	50	110	1332	71	1490	96,1	96,7	96,9	0,73	0,82	0,86	229
150	200	L315L	98,1	7,7	3	2,6	5,73	40	88	1430	72	1490	96,3	96,8	96,9	0,74	0,83	0,86	260
160	220	L315L	105	7,7	3	2,6	5,73	40	88	1430	72	1490	96,3	96,8	96,9	0,74	0,83	0,86	277
185	250	L315L	121	7,7	3	2,6	6,17	32	70	1480	72	1490	96,4	96,8	96,9	0,74	0,83	0,86	320
200	270	L315L	131	7,9	3	2,7	6,51	31	68	1527	72	1490	96,4	96,9	97,0	0,74	0,83	0,86	346
220	300	L355M/L	144	7,9	2,6	2,8	8,95	36	79	1670	74	1490	95,9	96,6	96,9	0,72	0,81	0,85	386
250	340	L355M/L	163	8,2	2,7	2,8	10,0	33	73	1730	74	1490	96,1	96,7	97,0	0,72	0,81	0,85	438
260	350	L355M/L	170	8,2	2,7	2,8	10,0	33	73	1730	74	1490	96,1	96,7	97,0	0,72	0,81	0,85	455
280	380	L355M/L																	

factor de carga es la unidad.

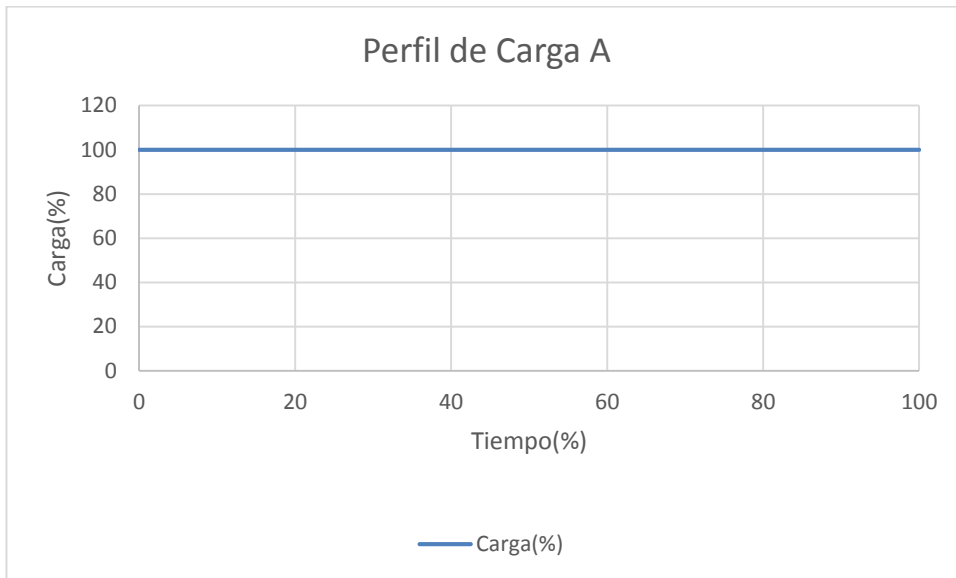


Figura 12. Ciclo de carga constante. Con FC unidad.

Ciclo 2. Funcionamiento en escalón. Tiene dos escalones de carga constante (Figura 13), cuyos FC son 30% de carga durante el 35% del tiempo, y 90% de carga el tiempo restante (65%)

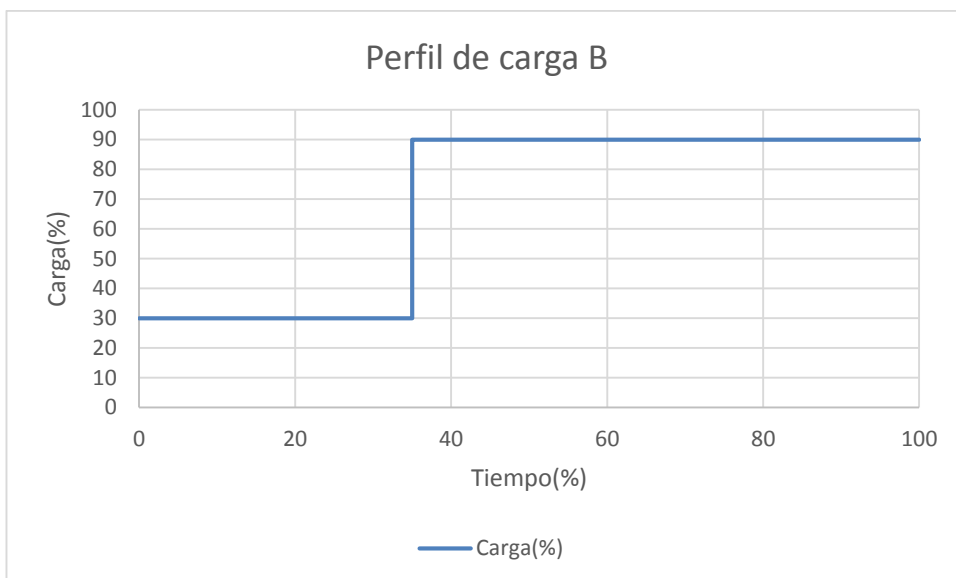


Figura 13. Ciclo de carga constante B. Con un escalón.

Ciclo 3. Funcionamiento en escalón. Tiene dos escalones de carga constante, cuyos FC son 30% de carga durante el 65% del tiempo, y 90% de carga el tiempo restante (35%)

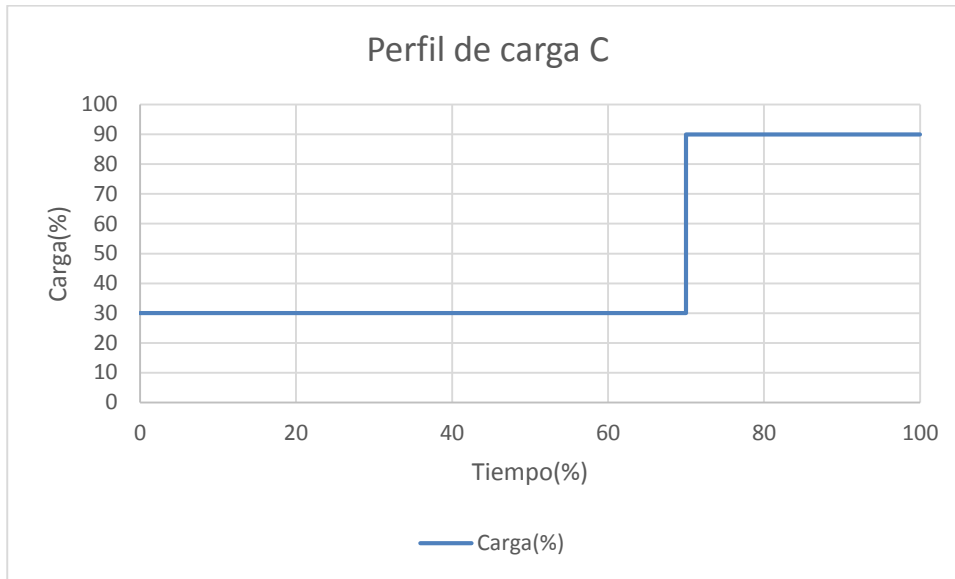


Figura 14. Ciclo de carga constante C. Con un escalón.

Ciclo 4. Funcionamiento en escalón. Tiene tres escalones de carga constante, cuyos FC es 30%, 60% y 90%, estando un tercio de tiempo cada uno.

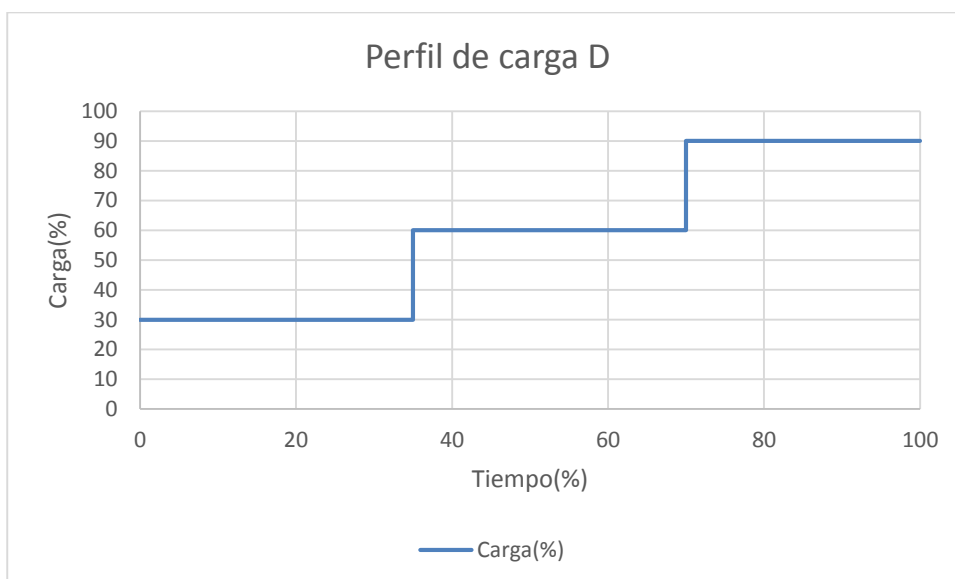


Figura 15. Ciclo de carga constante D. Con un escalón.

Ciclo 5. Funcionamiento en escalón. Tiene dos escalones de carga constante, cuyos FC son 60% de carga durante el 65% del tiempo, y 90% de carga el tiempo restante (35%)

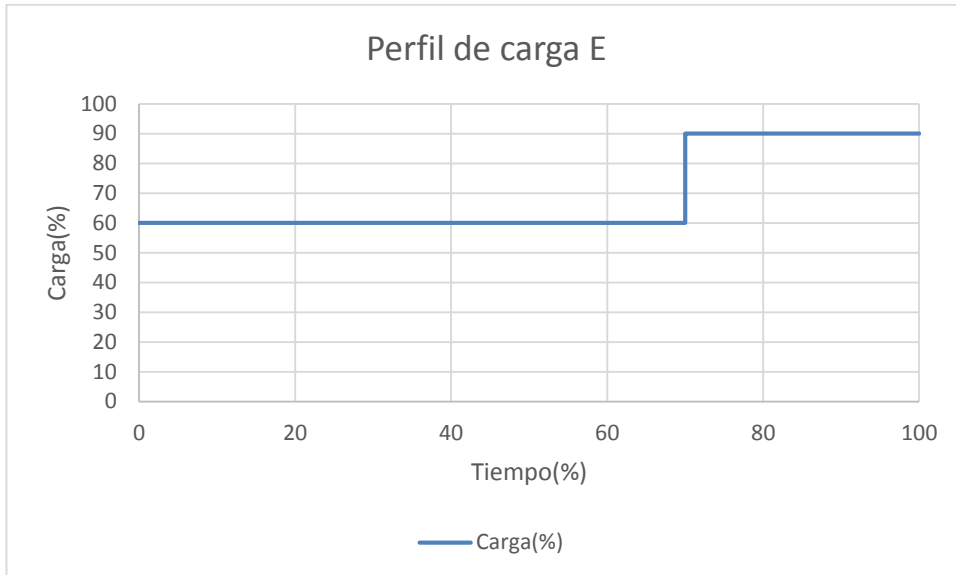


Figura 16. Ciclo de carga constante E. Con un escalón.

Ciclo 6. Funcionamiento en escalón. Tiene dos escalones de carga constante, cuyos FC son 60% de carga durante el 35% del tiempo, y 90% de carga el tiempo restante (65%)

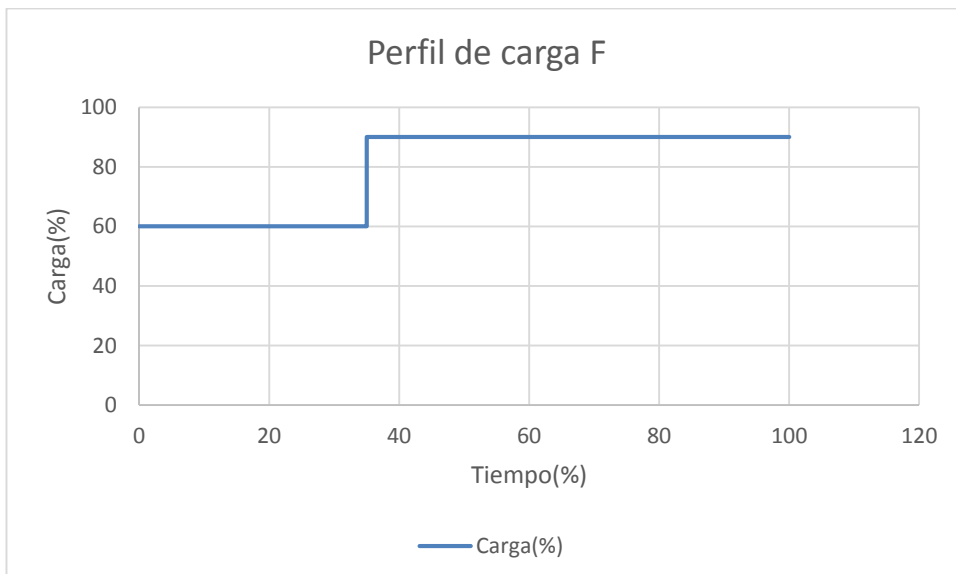


Figura 17. Ciclo de carga constante F. Con un escalón.



Los datos tomados para la realización de los cálculos son:

Para la tasa de descuento anual (d) y para el precio de la energía, se han utilizado los mismos datos que los facilitados por el artículo *“Technical and economic considerations on induction motor oversizing”* [2], 4% y 0.1 €/kWh respectivamente.

Para la tasa de crecimiento anual de la energía ( $\Delta p_e$ ), se ha utilizado según EUROSTAT, 2.91%, porcentaje el cual se ha tenido en cuenta que en la página EUROSTAT [6]

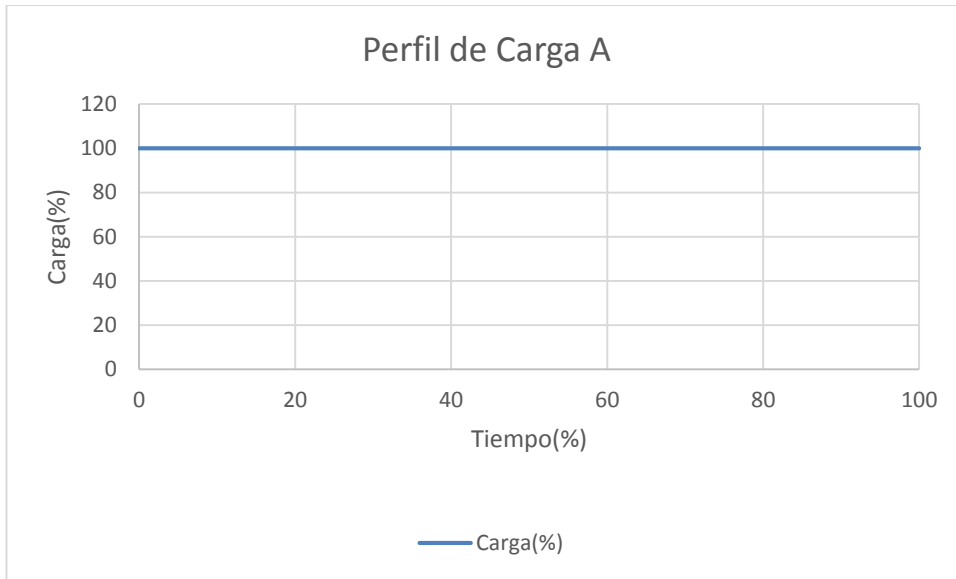
El tiempo anual se ha tomado también el del artículo, 8000h.

Para dar claridad a las variables seleccionadas, se ha obtenido por realizar la tabla 6, y así poder visualizar mejor las variables.

Tabla 6. Datos tomados para la realización de los cálculos

TASA DESCUENTO (%)	PRECIO ELECT(€/kWh)	Incr. Precio (%)	Núm. HORAS (h)
4	0.1	2.91	8000

## 2.1 CASO 1. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW y FC unidad.



En el primer caso, se realizarán todos los cálculos para que se vea de forma clara el procedimiento seguido. Estos cálculos se han realizado para todo un rango de potencias con la ayuda del programa de cálculo EXCEL, pero priorizando en la claridad y en la facilidad de entendimiento se expondrá un caso ejemplo, en el cual se ha utilizado una potencia mecánica de carga de 30kW.

Para esa potencia, del catálogo obtenemos los rendimientos, como datos de entrada.

En primer lugar, se calculará para motores IE1. Teniendo en cuenta la potencia nominal utilizada, así como la clase de eficiencia, sacamos directamente del catálogo los rendimientos como se puede observar en la Tabla 2.

Potencia Nominal	$\eta_{50\%}$	$\eta_{75\%}$	$\eta_{100\%}$
30kW	91.3%	91.7%	91.5%

Tabla 7. Caso ejemplo de rendimientos en catálogo

Debido a que el factor de carga es la unidad, se utiliza el rendimiento a plena carga.

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elect}} ; P_{elect} = \frac{P_{mec}}{\eta} = \frac{30kW}{0.915} = 32.79kW$$

$$Pérdidas = P_{elect} - P_{mec} = 32.79kW - 30kW = 2.79kW$$

Como se comentó en la introducción con la ayuda de MATLAB se han obtenido las constantes A y C del modelo de pérdidas de cada motor. En este caso ejemplo, las constantes son las siguientes para cada clase de eficiencia del motor.

Tabla 8. Constantes de regresión del modelo de pérdidas de un motor de 30kW

CONSTANTES	A (kW)	C (kW)
IE1	1,8045	0,9941
IE2	1,5017	0,8330
IE3	0,9562	0,8930
IE4	0,8479	0,7694

Una vez obtenida, se puede calcular la energía eléctrica total consumida del motor objeto de estudio.

$$E_M(P(t)) = \int_0^T P(t)dt = T \frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt$$

Teniendo en cuenta que la carga es constante.

$$E_M(P(t)) = P * T = 32.79kW * 8000h = 262.389kWh$$

$$E_p = P_p * T = 2.787kW * 8.000h = 22.389kWh$$

Siendo  $C_e = 0.1$  EUR/kWh. También es conocida la inversión del motor IE1 de 30 kW. La cual es 1.631€, según el catálogo anterior.

$$p_e = (E_M + E_p) * C_e = (262.389kWh + 22.389kWh) * \frac{0.1\text{€}}{kWh} = 28.477,5\text{€}$$

Una vez conocido, la energía y su coste, se pretende calcular el Valor Actual Neto (VAN). El VAN es uno de los indicadores de la rentabilidad económica de la inversión, y por lo tanto, del proyecto.

$$VAN(Ci) = -Ci - \sum_{n=1}^N Ce * \frac{(1 + \Delta Ce)^n}{(1 + d)^n} = -Ci - \sum_{n=1}^N Ce * \frac{1}{(1 + d_{eq})^n}$$

$$\frac{1}{1 + d_{eq}} = \frac{1 + \Delta Ce}{1 + d} \rightarrow d_{eq} = \frac{d - \Delta Ce}{1 + \Delta Ce} = \frac{(0.04 - 0.0291)}{(1 + 0.0291)} = 0.01059$$

$$k_{act} = \frac{(1 + d_{eq})^N - 1}{d_{eq} * (1 + d_{eq})^N} = \frac{(1 + 0.0297)^{12} - 1}{0.0297 * (1 + 0.0297)^{12}} = 11.21311$$

$$VAN(Ci) = Ci + Ce * k_{act} = 1.631 + 28.477,5 * 11.21311 = 320.956 \text{ €}$$

Cabe destacar, que el VAN está en valor absoluto. Se ha optado por esa forma para mejorar la visualización de las gráficas.

Para concluir se calcula el rendimiento energético.

$$\eta = \frac{E_M}{(E_M + E_{perd})} = \frac{262.389kWh}{262.389kWh + 22.389kWh} = 0.915$$

De esta forma, se han realizado los cálculos para conseguir el VAN de los demás motores con más potencia.

El motor con la potencia más rentable será el que tenga menor VAN. Como se comentó anteriormente para facilitar la comprensión se ha optado por poner todos los diferentes valores en tablas y así poder analizar cuál de ellos es más rentable desde el punto de vista económico.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.631,25 €	262.389	320.955,56 €	91,5%
37	2.379,99 €	259.585	315.415,68 €	92,5%
45	2.726,66 €	259.439	315.436,06 €	92,5%
55	3.339,53 €	258.625	314.223,45 €	92,8%
75	4.750,83 €	260.578	320.014,04 €	92,1%
90	4.963,89 €	262.536	324.617,35 €	91,4%

Tabla 9. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.991,23 €	258.678	312.993,80 €	92,8%
37	2.667,40 €	257.049	310.017,37 €	93,4%
45	3.059,62 €	256.195	308.494,15 €	93,7%
55	3.714,97 €	256.232	309.230,94 €	93,7%
75	5.322,93 €	258.059	314.937,33 €	93,0%
90	5.548,46 €	259.142	317.591,22 €	92,6%

Tabla 10. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga A.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.257,25 €	254.794	304.548,29 €	94,2%
37	3.277,38 €	253.533	302.740,96 €	94,7%
45	3.855,26 €	253.368	302.949,22 €	94,7%
55	4.635,58 €	253.518	304.066,12 €	94,7%
75	6.701,58 €	256.045	311.799,95 €	93,7%
90	7.033,62 €	256.948	314.157,17 €	93,4%

Tabla 11. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.589,71 €	252.938	300.720,24 €	94,9%
37	3.824,86 €	252.063	299.991,88 €	95,2%
45	4.351,82 €	252.891	302.375,11 €	94,9%
55	5.368,98 €	252.621	302.788,38 €	95,0%
75	7.788,80 €	253.044	306.156,80 €	94,8%
90	8.099,39 €	253.491	307.468,65 €	94,7%

Tabla 12. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga A

Una vez recogidos todos los valores en tablas, se introducen gráficas que ayudan de forma visual a ver el comportamiento a medida que aumenta la potencia mecánica del motor, o mejor dicho, el sobredimensionamiento del motor. Sin embargo, ya se puede observar en las tablas 9, 10, 11 y 12 cómo cuando se trabaja a plena carga el sobredimensionamiento es siempre rentable. Aumentando esa rentabilidad en los motores con menor eficiencia.

Cabe volver a recordar que el VAN está en valor absoluto para mejorar visualización.

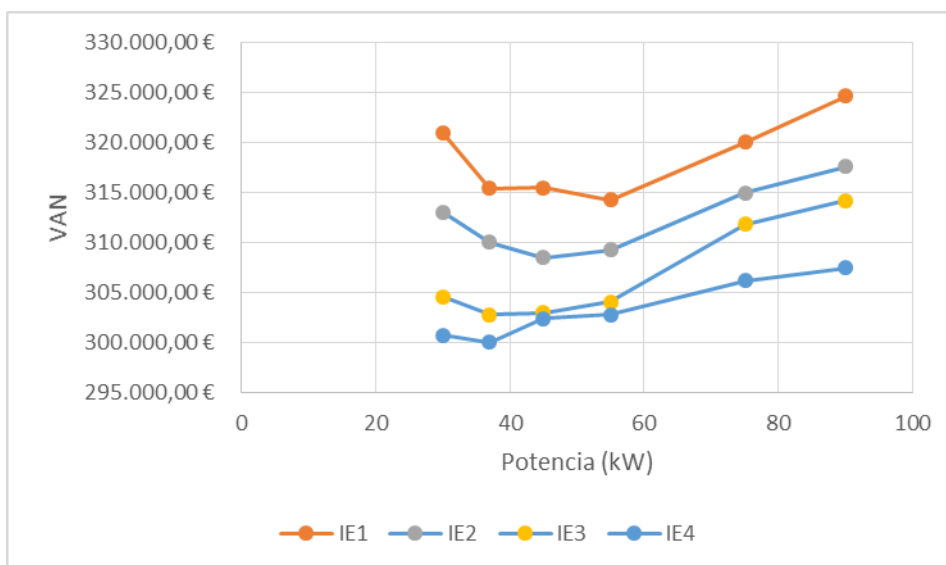
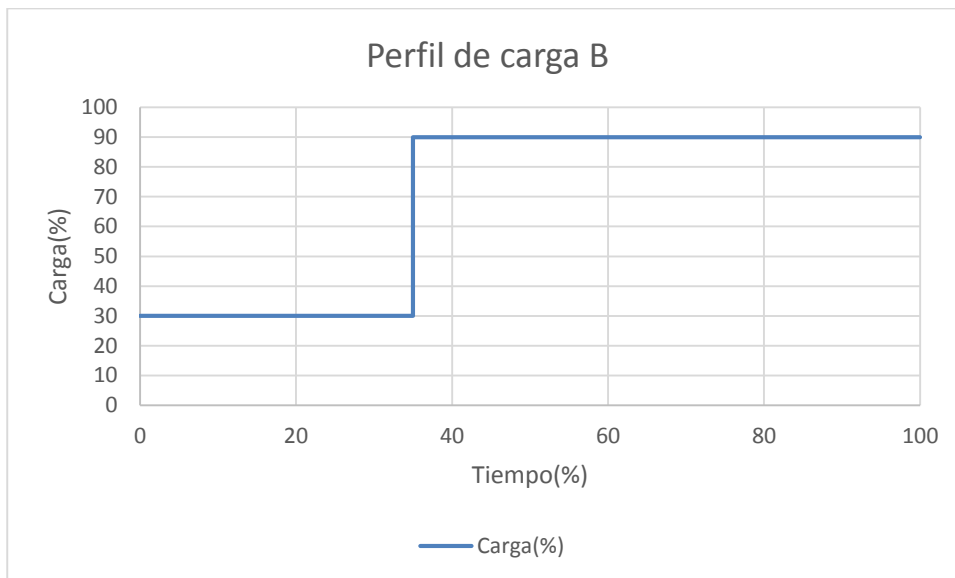


Figura 18. Comparación rentabilidad motores. Perfil de carga A

Como se puede observar en las figura 18. *Comparación rentabilidad motores. Perfil de carga A* a medida que se aumenta de clase de eficiencia con perfil de carga unidad, el sobredimensionamiento es menos rentable. Se observa como el el motor de eficiencia IE1 el mínimo lo tiene con bastante sobredimensionamiento, sin embargo a medida que nos vamos acercando a los motores con mayor eficiencia ese sobredimensionamiento va desapareciendo. No obstante, para el perfil de carga con carga al 100% durante toda su vida, es rentable económicamente sobredimensionar.

## 2.2 CASO 2. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.

Tras el caso A, se va a analizar el caso B.



Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.631,25 €	181.608	223.220,69 €	91,2%
37	2.379,99 €	180.484	221.447,76 €	91,8%
45	2.726,66 €	181.549	224.182,34 €	91,2%
55	3.339,53 €	181.595	224.900,43 €	91,2%
75	4.750,83 €	184.382	232.560,52 €	89,8%
90	4.963,89 €	186.743	238.068,62 €	88,7%

Tabla 13. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga B.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.991,23 €	178.968	217.659,73 €	92,5%
37	2.667,40 €	178.625	217.567,30 €	92,7%
45	3.059,62 €	178.795	218.340,32 €	92,6%
55	3.714,97 €	179.562	220.716,38 €	92,2%
75	5.322,93 €	182.176	228.186,07 €	90,9%
90	5.548,46 €	183.583	231.566,71 €	90,2%

Tabla 14. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga B.



Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.257,25 €	177.012	213.540,19 €	93,6%
37	3.277,38 €	176.252	212.855,71 €	94,0%
45	3.855,26 €	176.702	214.442,21 €	93,7%
55	4.635,58 €	177.536	217.091,48 €	93,3%
75	6.701,58 €	180.639	226.117,77 €	91,7%
90	7.033,62 €	181.728	228.891,47 €	91,1%

Tabla 15. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga B.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.589,71 €	175.540	210.570,95 €	94,3%
37	3.824,86 €	175.165	210.964,21 €	94,5%
45	4.351,82 €	176.860	215.293,72 €	93,6%
55	5.368,98 €	176.843	216.272,87 €	93,6%
75	7.788,80 €	177.744	220.711,24 €	93,2%
90	8.099,39 €	178.342	222.364,01 €	92,9%

Tabla 16. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga B.

En este caso, y gracias a las tablas 13-16. *Comparación rentabilidad motores IEX. Perfil de carga B* se puede observar cómo es demasiado diferente al caso A.

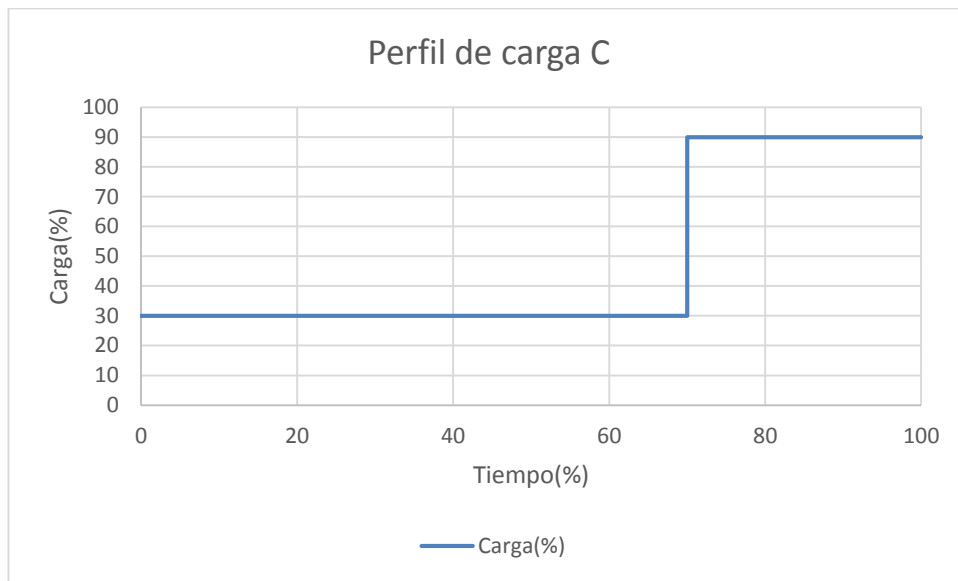
Esta pequeña diferencia se debe mayormente a que el FC en este caso no es la unidad, sino que tenemos factores de carga de 0.3 y 0.9, lo que conlleva a que el motor trabaje una parte de su tiempo a baja carga, y por consiguiente que a medida que se sobredimensione ese factor de carga

cada vez es menor.

Sin embargo, a excepción del motor IE4, para todos los demás motores es rentable el sobredimensionamiento. Un sobredimensionamiento pequeño, pero al fin y al cabo, sobredimensionamiento.

### 2.3 CASO 3. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.

Tras el caso B, se pretende analizar el perfil de carga C.



Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.631,25 €	135.290	167.787,26 €	91,3%
37	2.379,99 €	134.987	167.855,20 €	91,5%
45	2.726,66 €	136.643	171.916,18 €	90,6%
55	3.339,53 €	137.110	173.577,76 €	90,3%
75	4.750,83 €	140.304	182.151,47 €	88,7%
90	4.963,89 €	142.862	188.101,72 €	87,5%

Tabla 17. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga C.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.991,23 €	133.173	163.399,54 €	92,5%
37	2.667,40 €	133.459	164.716,49 €	92,3%
45	3.059,62 €	134.129	166.611,64 €	92,0%
55	3.714,97 €	135.253	169.788,80 €	91,3%
75	5.322,93 €	138.251	178.120,19 €	89,7%
90	5.548,46 €	139.817	181.855,99 €	88,9%

Tabla 18. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga C.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.257,25 €	131.706	160.374,52 €	93,4%
37	3.277,38 €	131.645	161.258,30 €	93,4%
45	3.855,26 €	132.395	163.518,32 €	93,0%
55	4.635,58 €	133.562	166.916,45 €	92,3%
75	6.701,58 €	136.947	176.574,33 €	90,4%
90	7.033,62 €	138.127	179.551,57 €	89,8%

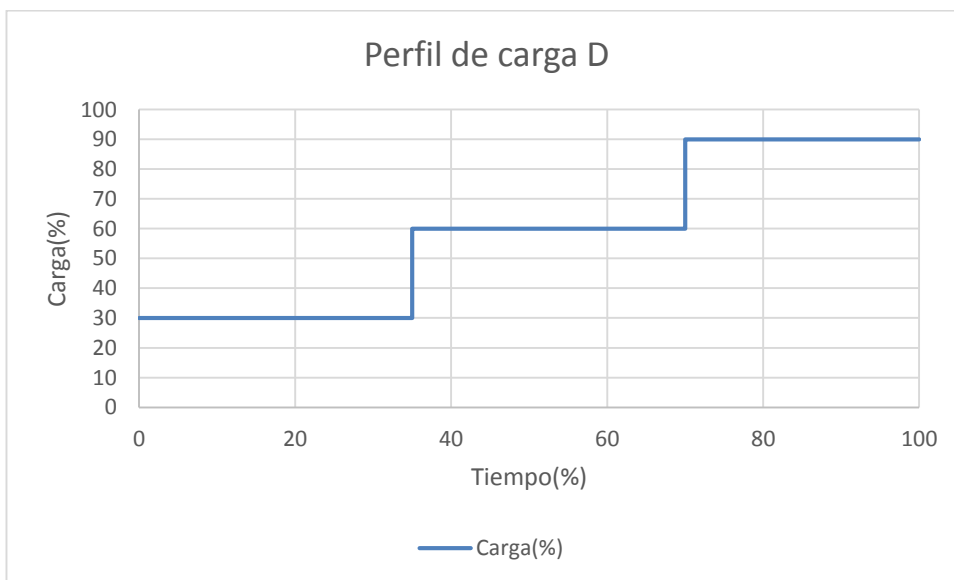
Tabla 19. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga C.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.589,71 €	130.875	158.844,49 €	93,9%
37	3.824,86 €	130.744	159.785,89 €	94,0%
45	4.351,82 €	132.864	165.066,51 €	92,7%
55	5.368,98 €	132.970	166.322,20 €	92,6%
75	7.788,80 €	134.103	171.283,45 €	92,0%
90	8.099,39 €	134.776	173.102,82 €	91,6%

Tabla 20. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga C.

## 2.4 CASO 4. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.

Tras el caso C, se pretende analizar el perfil de carga D.



Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.631,25 €	158.059	196.815,13 €	90,8%
37	2.379,99 €	157.448	195.617,47 €	91,4%
45	2.726,66 €	158.882	198.766,55 €	90,9%
55	3.339,53 €	159.192	199.779,48 €	90,9%
75	4.750,83 €	162.233	207.725,08 €	89,6%
90	4.963,89 €	164.718	213.371,34 €	88,6%

Tabla 21. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga D.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.991,23 €	155.746	191.620,81 €	92,1%
37	2.667,40 €	155.796	191.968,80 €	92,3%
45	3.059,62 €	156.279	193.092,49 €	92,2%
55	3.714,97 €	157.269	195.718,89 €	91,8%
75	5.322,93 €	160.123	203.457,86 €	90,6%
90	5.548,46 €	161.629	206.949,50 €	90,0%

Tabla 22. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga D.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.257,25 €	153.995	187.428,22 €	93,3%
37	3.277,38 €	153.773	187.648,90 €	93,5%
45	3.855,26 €	154.410	189.445,88 €	93,3%
55	4.635,58 €	155.452	192.329,17 €	92,9%
75	6.701,58 €	158.732	201.552,83 €	91,3%
90	7.033,62 €	159.877	204.390,13 €	90,8%

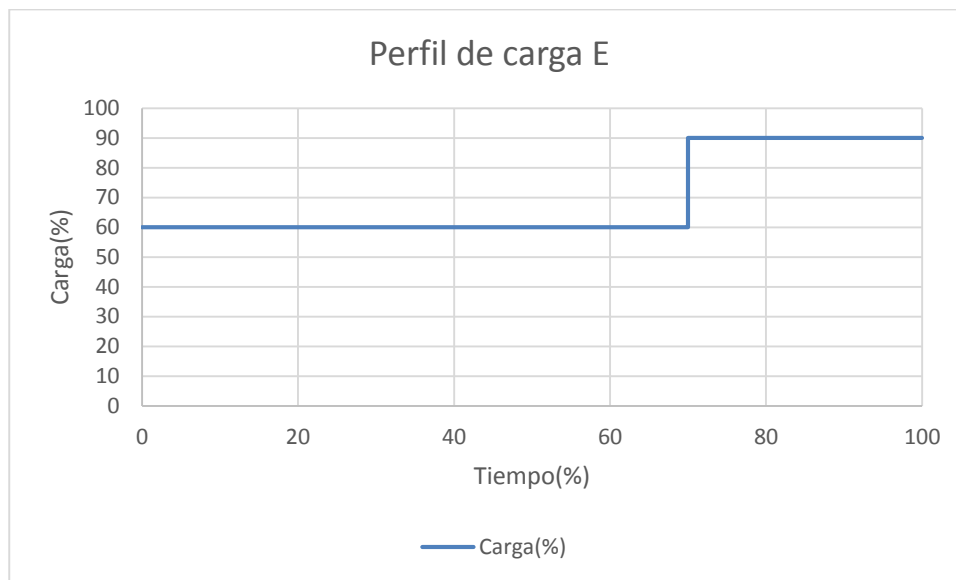
Tabla 23. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga D.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.589,71 €	153.024	185.323,81 €	93,9%
37	3.824,86 €	152.802	185.888,37 €	94,1%
45	4.351,82 €	154.762	190.515,10 €	93,2%
55	5.368,98 €	154.823	191.580,67 €	93,2%
75	7.788,80 €	155.868	196.182,44 €	92,8%
90	8.099,39 €	156.513	197.887,27 €	92,5%

Tabla 24. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga D.

## 2.5 CASO 5. Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.

Tras el caso D, se pretende analizar el perfil de carga E.



Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.631,25 €	180.699	221.181,13 €	92,3%
37	2.379,99 €	179.814	219.945,12 €	92,7%
45	2.726,66 €	181.051	223.066,56 €	92,1%
55	3.339,53 €	181.221	224.059,83 €	92,1%
75	4.750,83 €	184.126	231.986,40 €	90,9%
90	4.963,89 €	186.544	237.623,46 €	89,9%

Tabla 25. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga E.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.991,23 €	178.211	215.962,36 €	93,4%
37	2.667,40 €	178.052	216.281,00 €	93,5%
45	3.059,62 €	178.367	217.381,30 €	93,3%
55	3.714,97 €	179.239	219.991,02 €	92,9%
75	5.322,93 €	181.965	227.712,04 €	91,7%
90	5.548,46 €	183.418	231.196,27 €	91,1%

Tabla 26. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga E

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.257,25 €	176.207	211.734,39 €	94,3%
37	3.277,38 €	175.842	211.934,98 €	94,5%
45	3.855,26 €	176.379	213.717,93 €	94,2%
55	4.635,58 €	177.310	216.585,62 €	93,8%
75	6.701,58 €	180.496	225.796,11 €	92,4%
90	7.033,62 €	181.611	228.629,18 €	91,9%

Tabla 27. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga E.

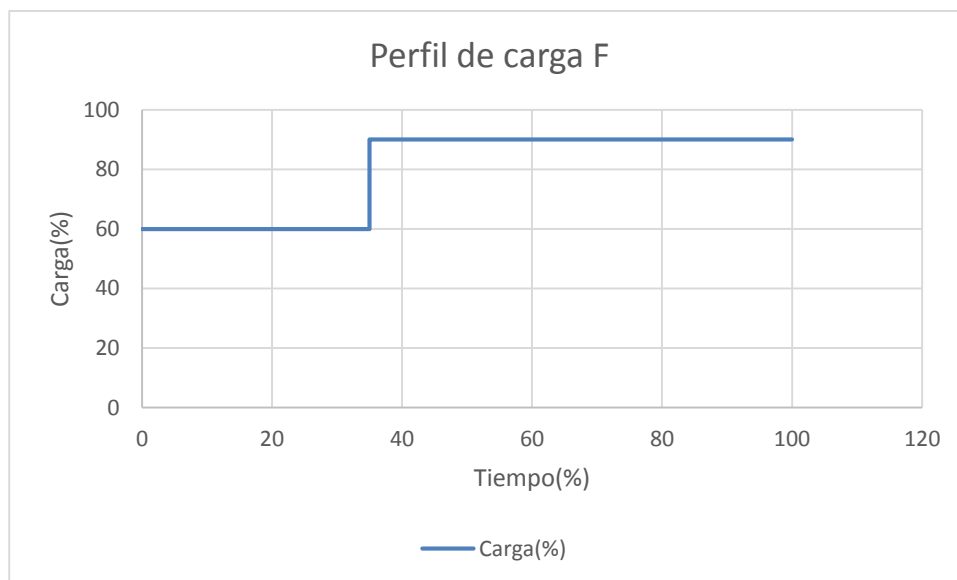


Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.589,71 €	176.207	209.612,58 €	94,8%
37	3.824,86 €	174.809	210.165,72 €	95,0%
45	4.351,82 €	176.628	214.772,63 €	94,1%
55	5.368,98 €	176.647	215.832,44 €	94,1%
75	7.788,80 €	177.615	220.423,32 €	93,7%
90	8.099,39 €	178.235	222.124,68 €	93,4%

Tabla 28. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga E.

## 2.6 CASO 6 Perfil de carga constante de potencia nominal 30 kW.

Tras el caso E, se pretende analizar el perfil de carga F.



Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.631,25 €	208.172	254.537,08 €	92,3%
37	2.379,99 €	206.689	251.958,77 €	92,9%
45	2.726,66 €	207.495	254.113,05 €	92,6%
55	3.339,53 €	207.358	254.418,35 €	92,6%
75	4.750,83 €	209.966	261.678,74 €	91,6%
90	4.963,89 €	212.241	266.993,40 €	90,8%

Tabla 29. Comparación rentabilidad motores IE1. Perfil de carga F.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	1.991,23 €	205.303	248.462,82 €	93,4%
37	2.667,40 €	204.686	247.753,79 €	93,6%
45	3.059,62 €	204.637	248.035,87 €	93,7%
55	3.714,97 €	205.248	250.061,45 €	93,4%
75	5.322,93 €	207.693	257.154,15 €	92,5%
90	5.548,46 €	209.031	260.379,41 €	92,0%

Tabla 30. Comparación rentabilidad motores IE2. Perfil de carga F.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.257,25 €	202.747	242.996,53 €	94,4%
37	3.277,38 €	202.068	242.493,84 €	94,7%
45	3.855,26 €	202.387	243.785,67 €	94,6%
55	4.635,58 €	203.074	246.107,32 €	94,3%
75	6.701,58 €	206.054	254.857,27 €	93,1%
90	7.033,62 €	207.103	257.541,93 €	92,7%

Tabla 31. Comparación rentabilidad motores IE3. Perfil de carga F.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión (€)	E. Consum ANUAL (kWh)	VAN (€)	Rendimiento Global (%)
30	2.589,71 €	201.381	240.265,53 €	95,0%
37	3.824,86 €	200.899	240.418,99 €	95,2%
45	4.351,82 €	202.409	244.332,38 €	94,6%
55	5.368,98 €	202.338	245.190,54 €	94,6%
75	7.788,80 €	203.136	249.400,16 €	94,3%
90	8.099,39 €	203.702	250.980,04 €	94,0%

Tabla 32. Comparación rentabilidad motores IE4. Perfil de carga F.

Una vez estudiados todos los casos a carga constante, sacamos las siguientes conclusiones.

A medida que aumenta la eficiencia, y por consiguiente, la clase de eficiencia del motor, el sobredimensionamiento es menos rentable. Además, se observa claramente cómo a medida que el FC disminuye, la rentabilidad del sobredimensionamiento baja, ya que al sobredimensionarlo el FC también bajaría y directamente proporcional lo haría el rendimiento.

Sin embargo, en motores con mayor clase de eficiencia (IE3 o IE4) la curva de rendimiento tiene un carácter más plano, lo que hace que el rendimiento a bajas cargas no penalice excesivamente, sin embargo, el aumento de la inversión hace que el proyecto no sea rentable.

## 3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una vez analizado los perfiles de carga. Surge la siguiente pregunta, ¿qué pasaría si cambia el valor de algunas de las variables elegidas? A la hora de afrontar un proyecto, la incertidumbre suele ser algo crucial. Para evitar eso, y además, para dar luz al proyecto, se han estudiado diferentes tipos de análisis de sensibilidad para ver el comportamiento seguido.

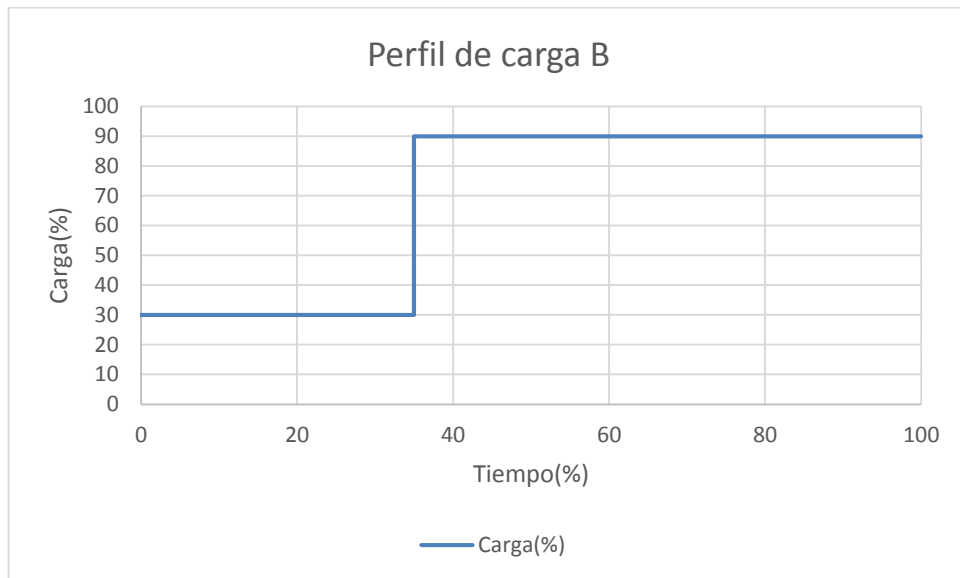
Los análisis de sensibilidad, ya comentados, que se han estudiado, son los siguientes:

- a) Variación del precio de la energía
  - a. Aumento del precio de la energía a 0.15€/kWh
  - b. Disminución del precio de la energía a 0.05€/kWh
  
- b) Disminución del número de horas de funcionamiento del motor
  - a. 2.000h
  - b. 5.000h
  
- c) Aumento de la tasa de rentabilidad al 8%
- d) Aumento del precio del motor un 40%
- e) Disminución del precio del motor un 40%

Para intentar evitar alargar de forma no estudiantil el proyecto, se han utilizado para los estudios los perfiles de carga A y B, ya que con ellos se puede observar perfectamente el comportamiento de los motores con los diferentes perfiles de carga.

### 3.1 Análisis sensibilidad Perfil de Carga B

Como ya se presentó anteriormente, el perfil de carga B, no es más que un perfil de carga constante en el que hay un escalón, con factor de carga 30 y 90% respectivamente.



### 3.1.1 Variación del precio de la energía eléctrica

Cada vez la importancia de la electricidad es mayor en la sociedad. Actualmente, se está produciendo una transición energética, con la implementación cada día de más energías limpias, de origen renovable, y lo que conlleva a la supresión de energías fósiles. Esto provoca una gran incertidumbre, la cual puede provocar aumento de precio. Pero sin mirar al futuro, durante finales de 2018 el mercado OMIE ha tenido unos precios máximos que no se producían desde 2013. Esto provoca que el dato del artículo [2], el cual fue publicado con anterioridad a esa fecha, no se cumpla. En resumen, la energía eléctrica es una energía que actualmente se considera muy cara.

Debido a esas ideas, así como para que el proyecto sea menos abstracto, se ha decidido realizar este análisis de sensibilidad.

Destacar, que el número 1 corresponde al análisis inicial, y el número 2 a los datos obtenidos tras el análisis de sensibilidad.

#### 3.1.1.1 Aumento del precio de la energía eléctrica

En él, el precio ha variado de 0,10(€/kWh) a 0,15(€/kWh)

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	19.761,64 €	29.642,46 €	223.220,69 €	334.015,41 €
37	19.536,76 €	29.305,14 €	221.447,76 €	330.981,65 €
45	19.749,71 €	29.624,57 €	224.182,34 €	334.910,19 €
55	19.759,10 €	29.638,65 €	224.900,43 €	335.680,88 €
75	20.316,37 €	30.474,56 €	232.560,52 €	346.465,37 €
90	20.788,59 €	31.182,89 €	238.068,62 €	354.620,98 €

Tabla 33. Aumento del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	19.233,61 €	28.850,41 €	217.659,73 €	325.493,98 €
37	19.165,06 €	28.747,59 €	217.567,30 €	325.017,25 €
45	19.199,02 €	28.798,53 €	218.340,32 €	325.980,66 €
55	19.352,48 €	29.028,71 €	220.716,38 €	329.217,08 €
75	19.875,23 €	29.812,85 €	228.186,07 €	339.617,64 €
90	20.156,61 €	30.234,92 €	231.566,71 €	344.575,84 €

Tabla 34. Aumento del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	18.788,65 €	28.182,98 €	212.936,43 €	318.276,03 €
37	18.690,48 €	28.035,71 €	212.855,71 €	317.644,88 €
45	18.780,43 €	28.170,64 €	214.442,21 €	319.735,69 €
55	18.947,10 €	28.420,65 €	217.091,48 €	323.319,44 €
75	19.567,83 €	29.351,74 €	226.117,77 €	335.825,86 €
90	19.785,58 €	29.678,37 €	228.891,47 €	339.820,39 €

Tabla 35. Aumento del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	18.548,05 €	27.822,07 €	210.570,95 €	314.561,56 €
37	18.472,97 €	27.709,45 €	210.964,21 €	314.533,89 €
45	18.812,08 €	28.218,12 €	215.293,72 €	320.764,67 €
55	18.808,69 €	28.213,04 €	216.272,87 €	321.724,81 €
75	18.988,71 €	28.483,06 €	220.711,24 €	327.172,46 €
90	19.108,41 €	28.662,61 €	222.364,01 €	329.496,32 €

Tabla 36. Aumento del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga B

Se observa como la variable del precio de la energía, es una variable muy importante a la hora de observar los valores económicos de los que habla el proyecto y además, se observa como al aumentar dicha variable, el sobredimensionamiento es más rentable, ya que la eficiencia energética prima. Se observa en comparación con el caso inicial como para los motores IE1, IE2 e IE3 el sobredimensionamiento sigue siendo rentable y además, a diferencia del caso inicial, está vez el motor IE4 también convendría sobredimensionarlo.

Este efecto influye más en los motores pequeños que en los grandes, ya que los motores pequeños son motores con menos rendimiento, por lo tanto, tienen más pérdidas. Los motores más grandes, aunque consuman más, el efecto del aumento del precio tienen una influencia menor, ya que las curvas son más planas.

### 3.1.1.2 Disminución del precio de la energía eléctrica

Ahora se va a estudiar el caso contrario. El caso en el que la energía eléctrica baje a 0.05€/kWh.

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	19.761,64 €	9.880,82 €	223.220,69 €	112.425,97 €
37	19.536,76 €	9.768,38 €	221.447,76 €	111.913,88 €
45	19.749,71 €	9.874,86 €	224.182,34 €	113.454,50 €
55	19.759,10 €	9.879,55 €	224.900,43 €	114.119,98 €
75	20.316,37 €	10.158,19 €	232.560,52 €	118.655,68 €
90	20.788,59 €	10.394,30 €	238.068,62 €	121.516,25 €

Tabla 37. Disminución del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	19.233,61 €	9.616,80 €	217.659,73 €	109.825,48 €
37	19.165,06 €	9.582,53 €	217.567,30 €	110.117,35 €
45	19.199,02 €	9.599,51 €	218.340,32 €	110.699,97 €
55	19.352,48 €	9.676,24 €	220.716,38 €	112.215,67 €
75	19.875,23 €	9.937,62 €	228.186,07 €	116.754,50 €
90	20.156,61 €	10.078,31 €	231.566,71 €	118.557,59 €

Tabla 38. Disminución del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga B



Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	18.788,65 €	9.394,33 €	212.936,43 €	107.596,84 €
37	18.690,48 €	9.345,24 €	212.855,71 €	108.066,55 €
45	18.780,43 €	9.390,21 €	214.442,21 €	109.148,73 €
55	18.947,10 €	9.473,55 €	217.091,48 €	110.863,53 €
75	19.567,83 €	9.783,91 €	226.117,77 €	116.409,67 €
90	19.785,58 €	9.892,79 €	228.891,47 €	117.962,55 €

Tabla 39. Disminución del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	18.548,05 €	9.274,02 €	210.570,95 €	106.580,33 €
37	18.472,97 €	9.236,48 €	210.964,21 €	107.394,53 €
45	18.812,08 €	9.406,04 €	215.293,72 €	109.822,77 €
55	18.808,69 €	9.404,35 €	216.272,87 €	110.820,92 €
75	18.988,71 €	9.494,35 €	220.711,24 €	114.250,02 €
90	19.108,41 €	9.554,20 €	222.364,01 €	115.231,70 €

Tabla 40. Disminución del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga B

En las tablas 37, 38, 39 y 40 se puede observar cómo al bajar el precio de la energía, hace que la inversión tenga mucho más peso y la eficiencia energética menos debido a su precio. Por lo tanto, en este caso se observa como el sobredimensionamiento ha excepción del motor IE1 no es rentable.

### 3.1.2 Disminución del número de horas de funcionamiento del motor

Otra variable que merece la pena analizar es el número de horas del funcionamiento de los motores. Aunque suene de perogrullo, en una industria hay veces que no se sabe cuando va a funcionar, ya que depende en gran medida de la demanda que tenga esa empresa.

Por eso, es necesario realizar este análisis.

Teniendo en cuenta que en el artículo inicial el número de horas de funcionamiento de los motores es 8000h, lo cual corresponde 91.3% del tiempo. Lo que significa que durante más del 90% de las horas del año, el motor está funcionando. Para analizar la otra parte, se ha utilizado como variable 2.000h anuales, lo que corresponde al 22.8% de las horas anuales y 5.000h anuales.

#### 3.1.2.1 2.000h de funcionamiento del motor

En primer lugar, se va a estudiar el caso más desfavorable para la industria. Reducir sus horas de funcionamiento a 2.000h.

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	181.608	45.402	223.220,69 €	57.028,61 €
37	180.484	45.121	221.447,76 €	57.146,93 €
45	181.549	45.387	224.182,34 €	58.090,58 €
55	181.595	45.399	224.900,43 €	58.729,75 €
75	184.382	46.095	232.560,52 €	61.703,25 €
90	186.743	46.686	238.068,62 €	63.240,07 €

Tabla 41. Disminución a 2.000h del motor IE1 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	178.968	44.742	217.659,73 €	55.908,35 €
37	178.625	44.656	217.567,30 €	56.392,38 €
45	178.795	44.699	218.340,32 €	56.879,79 €
55	179.562	44.891	220.716,38 €	57.965,32 €
75	182.176	45.544	228.186,07 €	61.038,71 €
90	183.583	45.896	231.566,71 €	62.053,02 €

Tabla 42. Disminución a 2.000h del motor IE2 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	176.743	44.186	212.936,43 €	54.927,04 €
37	176.252	44.063	212.855,71 €	55.671,96 €
45	176.702	44.176	214.442,21 €	56.502,00 €
55	177.536	44.384	217.091,48 €	57.749,56 €
75	180.639	45.160	226.117,77 €	61.555,62 €
90	181.728	45.432	228.891,47 €	62.498,09 €

Tabla 43. Disminución a 2.000h del motor IE3 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	175.540	43.885	210.570,95 €	54.585,02 €
37	175.165	43.791	210.964,21 €	55.609,70 €
45	176.860	44.215	215.293,72 €	57.087,30 €
55	176.843	44.211	216.272,87 €	58.094,95 €
75	177.744	44.436	220.711,24 €	61.019,41 €
90	178.342	44.586	222.364,01 €	61.665,55 €

Tabla 44. Disminución a 2.000h del motor IE4 con perfil de carga B

Tras los datos obtenidos, se observa cómo la variable del número de horas del funcionamiento de los motores es crucial. Ya que si un motor trabaja menos tiempo, produce menos energía, por lo tanto, la energía tiene menos peso en el proyecto.

### 3.1.2.2 5.000h de funcionamiento del motor

En segundo lugar, se va a estudiar el caso menos malo para la industria. Reducir sus horas de funcionamiento a 5.000h.

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	181.608	113.505	223.220,69 €	140.124,65 €
37	180.484	112.802	221.447,76 €	139.297,35 €
45	181.549	113.468	224.182,34 €	141.136,46 €
55	181.595	113.497	224.900,43 €	141.815,09 €
75	184.382	115.239	232.560,52 €	147.131,89 €
90	186.743	116.714	238.068,62 €	150.654,34 €

Tabla 45. Disminución a 5.000h del motor IE1 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	178.968	111.855	217.659,73 €	136.784,04 €
37	178.625	111.641	217.567,30 €	136.979,84 €
45	178.795	111.747	218.340,32 €	137.610,05 €
55	179.562	112.226	220.716,38 €	139.340,85 €
75	182.176	113.860	228.186,07 €	144.612,39 €
90	183.583	114.739	231.566,71 €	146.809,87 €

Tabla 46. Disminución a 5.000h del motor IE2 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	176.743	110.465	212.936,43 €	133.931,74 €
37	176.252	110.158	212.855,71 €	134.263,84 €
45	176.702	110.439	214.442,21 €	135.472,10 €
55	177.536	110.960	217.091,48 €	137.420,52 €
75	180.639	112.899	226.117,77 €	143.836,69 €
90	181.728	113.580	228.891,47 €	145.694,78 €

Tabla 47. Disminución a 5.000h del motor IE3 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	175.540	109.713	210.570,95 €	132.577,98 €
37	175.165	109.478	210.964,21 €	133.286,95 €
45	176.860	110.538	215.293,72 €	136.190,51 €
55	176.843	110.527	216.272,87 €	137.183,91 €
75	177.744	111.090	220.711,24 €	140.865,32 €
90	178.342	111.464	222.364,01 €	142.014,78 €

Tabla 48. Disminución a 5.000h del motor IE4 con perfil de carga B

Al igual que en el caso anterior de 2.000h mientras menos trabaje el motor menos energía consumo, por lo tanto, la energía tiene menos peso.

### 3.1.3 Aumento de la tasa de descuento

Según numerosas páginas web la tasa de interés o tipo de interés, en economía, es la cantidad que se abona en una unidad de tiempo por cada unidad de capital invertido. Es decir, el valor que hay que pagar por el dinero. Debido a la liquidez de la empresa y a cómo se encuentre el mercado este interés puede variar a en gran medida. Para ello, se va a estimar un tipo de interés del 8%, en lugar del 4% que utilizaba el artículo.

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	223.220,69 €	177.317,64 €
37	11,21311	8,89027	221.447,76 €	176.067,08 €
45	11,21311	8,89027	224.182,34 €	178.306,99 €
55	11,21311	8,89027	224.900,43 €	179.003,28 €
75	11,21311	8,89027	232.560,52 €	185.368,92 €
90	11,21311	8,89027	238.068,62 €	189.780,13 €

Tabla 49. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE1 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	217.659,73 €	172.983,22 €
37	11,21311	8,89027	217.567,30 €	173.050,01 €
45	11,21311	8,89027	218.340,32 €	173.744,14 €
55	11,21311	8,89027	220.716,38 €	175.763,75 €
75	11,21311	8,89027	228.186,07 €	182.019,16 €
90	11,21311	8,89027	231.566,71 €	184.746,21 €

Tabla 50. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE2 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	212.936,43 €	169.293,47 €
37	11,21311	8,89027	212.855,71 €	169.440,80 €
45	11,21311	8,89027	214.442,21 €	170.818,36 €
55	11,21311	8,89027	217.091,48 €	173.080,47 €
75	11,21311	8,89027	226.117,77 €	180.664,91 €
90	11,21311	8,89027	228.891,47 €	182.932,81 €

Tabla 51. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE3 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	210.570,95 €	167.486,88 €
37	11,21311	8,89027	210.964,21 €	168.054,54 €
45	11,21311	8,89027	215.293,72 €	171.596,34 €
55	11,21311	8,89027	216.272,87 €	172.583,36 €
75	11,21311	8,89027	220.711,24 €	176.603,58 €
90	11,21311	8,89027	222.364,01 €	177.978,32 €

Tabla 52. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE4 con perfil de carga B

Se observa cómo al igual que el precio de la energía la tasa de interés es muy importante para saber los números en los que se mueve el proyecto. Además, se observa como a medida que aumenta la inversión coge más peso y hace que el sobredimensionamiento sea menos rentable económicamente hablando.



### 3.1.4 Aumento del coste de adquisición del motor

La inversión es un aspecto, a priori, muy importante, ya que en muchos casos puede ser el motivo, por el cual no se realiza un cambio de motor.

Para estudiar esto, y para analizar el Mercado, la curva de oferta y demanda, se va a estudiar un incremento del 40% del coste del motor para ver si sería rentable el sobredimensionamiento.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.631,25 €	2.283,76 €	223.220,69 €	223.873,19 €
37	2.379,99 €	3.331,98 €	221.447,76 €	222.399,76 €
45	2.726,66 €	3.817,32 €	224.182,34 €	225.273,01 €
55	3.339,53 €	4.675,34 €	224.900,43 €	226.236,24 €
75	4.750,83 €	6.651,16 €	232.560,52 €	234.460,85 €
90	4.963,89 €	6.949,44 €	238.068,62 €	240.054,17 €

Tabla 53. Aumento del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.991,23 €	2.787,72 €	217.659,73 €	218.456,22 €
37	2.667,40 €	3.734,36 €	217.567,30 €	218.634,26 €
45	3.059,62 €	4.283,47 €	218.340,32 €	219.564,16 €
55	3.714,97 €	5.200,95 €	220.716,38 €	222.202,36 €
75	5.322,93 €	7.452,10 €	228.186,07 €	230.315,24 €
90	5.548,46 €	7.767,84 €	231.566,71 €	233.786,10 €

Tabla 54. Aumento del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.257,25 €	3.160,14 €	212.936,43 €	213.839,33 €
37	3.277,38 €	4.588,33 €	212.855,71 €	214.166,66 €
45	3.855,26 €	5.397,36 €	214.442,21 €	215.984,31 €
55	4.635,58 €	6.489,81 €	217.091,48 €	218.945,72 €
75	6.701,58 €	9.382,21 €	226.117,77 €	228.798,40 €
90	7.033,62 €	9.847,07 €	228.891,47 €	231.704,92 €

Tabla 55. Aumento del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.589,71 €	3.625,59 €	210.570,95 €	211.606,83 €
37	3.824,86 €	5.354,80 €	210.964,21 €	212.494,16 €
45	4.351,82 €	6.092,55 €	215.293,72 €	217.034,45 €
55	5.368,98 €	7.516,57 €	216.272,87 €	218.420,46 €
75	7.788,80 €	10.904,32 €	220.711,24 €	223.826,76 €
90	8.099,39 €	11.339,15 €	222.364,01 €	225.603,77 €

Tabla 56. Aumento del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga B

El aumento del precio del motor es crucial, sin embargo, debido a los perfiles de carga considerados no se aprecia y no tiene por tanto, la importancia que debería. No obstante, se puede observar como a medida que aumenta la inversión, el sobredimensionamiento es menos rentable.

### 3.1.5 Disminución del coste de adquisición del motor

La enorme variación que puede sufrir el coste de los equipos hace que sea imprescindible su análisis. Por ello, en este análisis se va a analizar una disminución de la inversión del motor en un 40%.

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.631,25 €	1.165,18 €	223.220,69 €	222.754,62 €
37	2.379,99 €	1.699,99 €	221.447,76 €	220.767,77 €
45	2.726,66 €	1.947,61 €	224.182,34 €	223.403,30 €
55	3.339,53 €	2.385,38 €	224.900,43 €	223.946,28 €
75	4.750,83 €	3.393,45 €	232.560,52 €	231.203,14 €
90	4.963,89 €	3.545,63 €	238.068,62 €	236.650,36 €

Tabla 57. Disminución del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.991,23 €	1.422,30 €	217.659,73 €	217.090,81 €
37	2.667,40 €	1.905,29 €	217.567,30 €	216.805,19 €
45	3.059,62 €	2.185,44 €	218.340,32 €	217.466,14 €
55	3.714,97 €	2.653,55 €	220.716,38 €	219.654,96 €
75	5.322,93 €	3.802,09 €	228.186,07 €	226.665,23 €
90	5.548,46 €	3.963,19 €	231.566,71 €	229.981,44 €

Tabla 58. Disminución del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.257,25 €	1.612,32 €	212.936,43 €	212.291,51 €
37	3.277,38 €	2.340,98 €	212.855,71 €	211.919,32 €
45	3.855,26 €	2.753,76 €	214.442,21 €	213.340,71 €
55	4.635,58 €	3.311,13 €	217.091,48 €	215.767,03 €
75	6.701,58 €	4.786,84 €	226.117,77 €	224.203,03 €
90	7.033,62 €	5.024,02 €	228.891,47 €	226.881,86 €

Tabla 59. Disminución del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga B

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.589,71 €	1.849,79 €	210.570,95 €	209.831,03 €
37	3.824,86 €	2.732,04 €	210.964,21 €	209.871,40 €
45	4.351,82 €	3.108,44 €	215.293,72 €	214.050,34 €
55	5.368,98 €	3.834,99 €	216.272,87 €	214.738,87 €
75	7.788,80 €	5.563,43 €	220.711,24 €	218.485,87 €
90	8.099,39 €	5.785,28 €	222.364,01 €	220.049,90 €

Tabla 60. Disminución del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga B

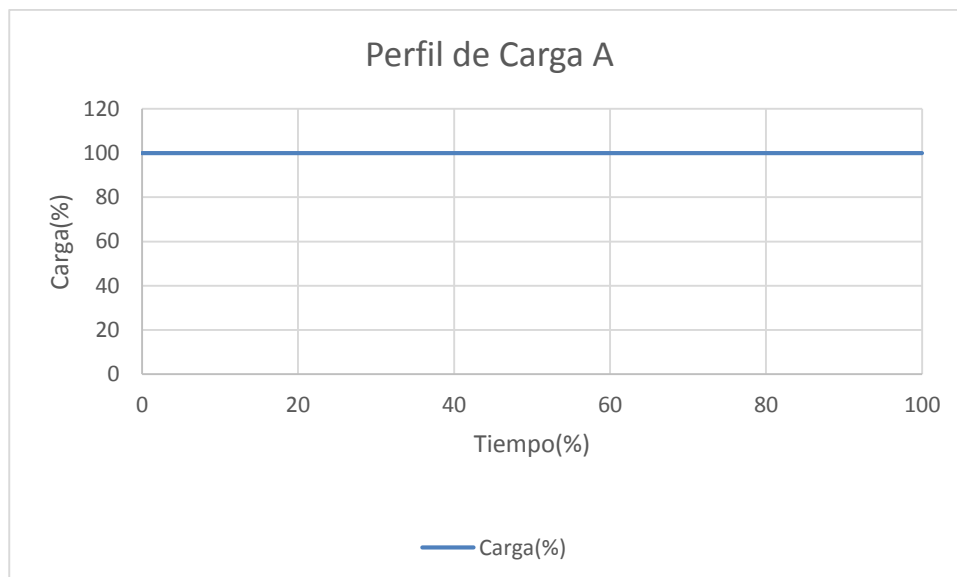
Algo similar ocurre al caso anterior, se observa como al disminuir la inversión del motor, hace que el precio de los motores pierda importancia y gane importancia la energía. De ahí, que al disminuir la inversión, los motores más eficientes cobren protagonismo.

Tras el estudio de los diferentes casos para el perfil de carga B, se observa como el protagonismo que adquiere la variación de las variables no es demasiado grande, debido a que se está tratando un perfil de carga bajo.

Sin embargo, para paliar esta situación y para intentar comprender y analizar el funcionamiento con perfiles de carga altos, se va a realizar los mismos análisis con el perfil de carga A.

### 3.2 Análisis sensibilidad Perfil de Carga A

Tras los análisis de sensibilidad del perfil B, perfil que tendría un motor, el cual una parte importante de su vida trabaja al 30% de la carga, se pretende estudiar el perfil de carga A. Se ha decidido estudiar otro perfil debido a que hay muchas diferencias entre uno y otro. El perfil de carga A cómo se comentó anteriormente es un perfil de carga constante con FC unidad durante toda su vida útil.



Dicho esto, se estudiarán los mismos casos que en el perfil de carga anterior y una vez sacado los datos se hará un breve análisis.

#### 3.2.1 Variación del precio de la energía eléctrica

Al igual que el caso anterior, se va a estudiar dos opciones. Aumento y disminución del precio de la energía eléctrica

##### 3.2.1.1 Aumento del precio de la energía eléctrica

Como ya se comentó, el precio de la electricidad para el análisis es 0.15€/kWh

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	28.477,77 €	42.716,65 €	320.955,56 €	480.617,71 €
37	27.916,94 €	41.875,41 €	315.415,68 €	471.933,53 €
45	27.887,84 €	41.831,76 €	315.436,06 €	471.790,76 €
55	27.725,04 €	41.587,57 €	314.223,45 €	469.665,42 €
75	28.115,59 €	42.173,39 €	320.014,04 €	477.645,64 €
90	28.507,12 €	42.760,69 €	324.617,35 €	484.444,08 €

Tabla 61. Aumento del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	27.735,63 €	41.603,44 €	312.993,80 €	468.495,09 €
37	27.409,88 €	41.114,82 €	310.017,37 €	463.692,35 €
45	27.239,06 €	40.858,59 €	308.494,15 €	461.211,42 €
55	27.246,32 €	40.869,48 €	309.230,94 €	461.988,93 €
75	27.611,83 €	41.417,74 €	314.937,33 €	469.744,54 €
90	27.828,39 €	41.742,59 €	317.591,22 €	473.612,60 €

Tabla 62. Aumento del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	26.980,75 €	40.471,13 €	304.795,34 €	456.064,39 €
37	26.706,56 €	40.059,84 €	302.740,96 €	452.472,75 €
45	26.673,60 €	40.010,40 €	302.949,22 €	452.496,20 €
55	26.703,62 €	40.055,42 €	304.066,12 €	453.781,39 €
75	27.209,08 €	40.813,62 €	311.799,95 €	464.349,14 €
90	27.389,69 €	41.084,53 €	314.157,17 €	467.718,94 €

Tabla 63. Aumento del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	26.587,68 €	39.881,52 €	300.720,24 €	449.785,51 €
37	26.412,57 €	39.618,86 €	299.991,88 €	448.075,39 €
45	26.578,12 €	39.867,17 €	302.375,11 €	451.386,75 €
55	26.524,26 €	39.786,39 €	302.788,38 €	451.498,09 €
75	26.608,86 €	39.913,29 €	306.156,80 €	455.340,80 €
90	26.698,15 €	40.047,23 €	307.468,65 €	457.153,28 €

Tabla 64. Aumento del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga A

Como ya se comentó en el caso anterior, el aumento del precio de la electricidad hace que la eficiencia energética tome más protagonismo si cabe. Esto hace que el sobredimensionamiento sea rentable.

### 3.2.1.2 Disminución del precio de la energía eléctrica

Para el siguiente caso, también es igual al caso anterior, el precio para el nuevo análisis es

0.05€/kWh.

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	28.477,77 €	14.238,88 €	320.955,56 €	161.293,41 €
37	27.916,94 €	13.958,47 €	315.415,68 €	158.897,83 €
45	27.887,84 €	13.943,92 €	315.436,06 €	159.081,36 €
55	27.725,04 €	13.862,52 €	314.223,45 €	158.781,49 €
75	28.115,59 €	14.057,80 €	320.014,04 €	162.382,43 €
90	28.507,12 €	14.253,56 €	324.617,35 €	164.790,62 €

Tabla 65. Disminución del precio de la electricidad en motores IE1 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	27.735,63 €	13.867,81 €	312.993,80 €	157.492,51 €
37	27.409,88 €	13.704,94 €	310.017,37 €	156.342,38 €
45	27.239,06 €	13.619,53 €	308.494,15 €	155.776,89 €
55	27.246,32 €	13.623,16 €	309.230,94 €	156.472,95 €
75	27.611,83 €	13.805,91 €	314.937,33 €	160.130,13 €
90	27.828,39 €	13.914,20 €	317.591,22 €	161.569,84 €

Tabla 66. Disminución del precio de la electricidad en motores IE2 con perfil de carga A



Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	26.980,75 €	13.490,38 €	304.795,34 €	153.526,29 €
37	26.706,56 €	13.353,28 €	302.740,96 €	153.009,17 €
45	26.673,60 €	13.336,80 €	302.949,22 €	153.402,24 €
55	26.703,62 €	13.351,81 €	304.066,12 €	154.350,85 €
75	27.209,08 €	13.604,54 €	311.799,95 €	159.250,76 €
90	27.389,69 €	13.694,84 €	314.157,17 €	160.595,40 €

Tabla 67. Disminución del precio de la electricidad en motores IE3 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Ce1 (€)	Ce2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	26.587,68 €	13.293,84 €	300.720,24 €	151.654,97 €
37	26.412,57 €	13.206,29 €	299.991,88 €	151.908,37 €
45	26.578,12 €	13.289,06 €	302.375,11 €	153.363,46 €
55	26.524,26 €	13.262,13 €	302.788,38 €	154.078,68 €
75	26.608,86 €	13.304,43 €	306.156,80 €	156.972,80 €
90	26.698,15 €	13.349,08 €	307.468,65 €	157.784,02 €

Tabla 68. Disminución del precio de la electricidad en motores IE4 con perfil de carga A

En el caso anterior se comentaba como la disminución del precio hacia que el sobredimensionamiento fuese para cada clase de eficiencia menos rentable. Sin embargo, en este caso, aunque el comportamiento sea similar, al tener FC unidad hace que se utilice mucha energía, por lo tanto, aunque el sobredimensionamiento baje con respecto al caso base, sigue siendo rentable a excepción del motor de máxima eficiencia.

### 3.2.2 Disminución del número de horas de funcionamiento del motor

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	181.608	65.597	320.955,56 €	100.290,97 €
37	180.484	64.896	315.415,68 €	97.109,32 €
45	181.549	64.860	315.436,06 €	97.252,06 €
55	181.595	64.656	314.223,45 €	96.724,01 €
75	184.382	65.144	320.014,04 €	100.872,36 €
90	186.743	65.634	324.617,35 €	103.829,33 €

Tabla 69. Disminución del número de horas del motor IE1 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	178.968	64.670	312.993,80 €	95.449,86 €
37	178.625	64.262	310.017,37 €	93.843,16 €
45	178.795	64.049	308.494,15 €	93.038,23 €
55	179.562	64.058	309.230,94 €	93.744,48 €
75	182.176	64.515	314.937,33 €	97.913,96 €
90	183.583	64.785	317.591,22 €	99.657,21 €

Tabla 70. Disminución del número de horas del motor IE2 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	177.012	63.726	304.795,34 €	90.425,58 €
37	176.252	63.383	302.740,96 €	89.524,14 €
45	176.702	63.342	302.949,22 €	89.871,01 €
55	177.536	63.380	304.066,12 €	90.861,70 €
75	180.639	64.011	311.799,95 €	96.470,09 €
90	181.728	64.237	314.157,17 €	98.067,87 €

Tabla 71. Disminución del número de horas del motor IE3 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	E. Consum ANUAL1 (kWh)	E. Consum ANUAL2 (kWh)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	175.540	63.235	300.720,24 €	73.495,35 €
37	175.165	63.016	299.991,88 €	74.485,06 €
45	176.860	63.223	302.375,11 €	75.244,06 €
55	176.843	63.155	302.788,38 €	76.185,73 €
75	177.744	63.261	306.156,80 €	78.724,12 €
90	178.342	63.373	307.468,65 €	79.159,88 €

Tabla 72. Disminución del número de horas del motor IE4 con perfil de carga A

Para el perfil de carga A, se ha estudiado solo una disminución a 2.000h, ya que 5.000h presentan el mismo comportamiento.

Se observa la importancia del número de horas de funcionamiento del motor, ya que baja mucho la energía. Al bajar esa energía hace que el sobredimensionamiento pierda rentabilidad. No obstante, al tratarse del perfil de carga unidad, el sobredimensionamiento sigue siendo rentable en todos los motores a excepción del IE4

### 3.2.3 Aumento de la tasa de descuento

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	320.955,56 €	254.806,37 €
37	11,21311	8,89027	315.415,68 €	250.569,20 €
45	11,21311	8,89027	315.436,06 €	250.657,17 €
55	11,21311	8,89027	314.223,45 €	249.822,72 €
75	11,21311	8,89027	320.014,04 €	254.706,12 €
90	11,21311	8,89027	324.617,35 €	258.399,97 €

Tabla 73. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE1 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	312.993,80 €	248.568,49 €
37	11,21311	8,89027	310.017,37 €	246.348,70 €
45	11,21311	8,89027	308.494,15 €	245.222,28 €
55	11,21311	8,89027	309.230,94 €	245.942,20 €
75	11,21311	8,89027	314.937,33 €	250.799,58 €
90	11,21311	8,89027	317.591,22 €	252.950,43 €

Tabla 74. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE2 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	304.795,34 €	242.123,47 €
37	11,21311	8,89027	302.740,96 €	240.705,99 €
45	11,21311	8,89027	302.949,22 €	240.990,82 €
55	11,21311	8,89027	304.066,12 €	242.038,00 €
75	11,21311	8,89027	311.799,95 €	248.597,72 €
90	11,21311	8,89027	314.157,17 €	250.535,41 €

Tabla 75. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE3 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Kact1	Kact2	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	11,21311	8,89027	300.720,24 €	238.961,42 €
37	11,21311	8,89027	299.991,88 €	238.639,81 €
45	11,21311	8,89027	302.375,11 €	240.638,50 €
55	11,21311	8,89027	302.788,38 €	241.176,88 €
75	11,21311	8,89027	306.156,80 €	244.348,78 €
90	11,21311	8,89027	307.468,65 €	245.453,22 €

Tabla 76. Aumento de la tasa de interés de la inversión para el motor IE4 con perfil de carga A

Como en el perfil de carga B, la tasa de interés no es una variable determinante en el sobredimensionamiento de motores.

### 3.2.4 Aumento del coste de adquisición del motor

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.631,25 €	2.283,76 €	320.955,56 €	321.608,06 €
37	2.379,99 €	3.331,98 €	315.415,68 €	316.367,68 €
45	2.726,66 €	3.817,32 €	315.436,06 €	316.526,72 €
55	3.339,53 €	4.675,34 €	314.223,45 €	315.559,27 €
75	4.750,83 €	6.651,16 €	320.014,04 €	321.914,37 €
90	4.963,89 €	6.949,44 €	324.617,35 €	326.602,90 €

Tabla 77. Aumento del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.991,23 €	2.787,72 €	312.993,80 €	313.790,29 €
37	2.667,40 €	3.734,36 €	310.017,37 €	311.084,33 €
45	3.059,62 €	4.283,47 €	308.494,15 €	309.718,00 €
55	3.714,97 €	5.200,95 €	309.230,94 €	310.716,93 €
75	5.322,93 €	7.452,10 €	314.937,33 €	317.066,50 €
90	5.548,46 €	7.767,84 €	317.591,22 €	319.810,61 €

Tabla 78. Aumento del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.257,25 €	3.160,14 €	304.795,34 €	305.698,24 €
37	3.277,38 €	4.588,33 €	302.740,96 €	304.051,91 €
45	3.855,26 €	5.397,36 €	302.949,22 €	304.491,33 €
55	4.635,58 €	6.489,81 €	304.066,12 €	305.920,36 €
75	6.701,58 €	9.382,21 €	311.799,95 €	314.480,58 €
90	7.033,62 €	9.847,07 €	314.157,17 €	316.970,62 €

Tabla 79. Aumento del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.589,71 €	3.625,59 €	300.720,24 €	301.756,12 €
37	3.824,86 €	5.354,80 €	299.991,88 €	301.521,82 €
45	4.351,82 €	6.092,55 €	302.375,11 €	304.115,84 €
55	5.368,98 €	7.516,57 €	302.788,38 €	304.935,98 €
75	7.788,80 €	10.904,32 €	306.156,80 €	309.272,32 €
90	8.099,39 €	11.339,15 €	307.468,65 €	310.708,41 €

Tabla 80. Aumento del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga A

Como en el caso anterior, la variación del coste de adquisición de los equipos no conlleva grandes diferencias. Eso es debido a que los motores objeto de estudios son motores pequeños, por lo tanto, el coste de inversión no es tan grande. Esta variable sería mucho más influyente en motores de grandes dimensiones.

### 3.2.5 Disminución del coste de adquisición del motor

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.631,25 €	1.165,18 €	320.955,56 €	320.489,49 €
37	2.379,99 €	1.699,99 €	315.415,68 €	314.735,68 €
45	2.726,66 €	1.947,61 €	315.436,06 €	314.657,01 €
55	3.339,53 €	2.385,38 €	314.223,45 €	313.269,30 €
75	4.750,83 €	3.393,45 €	320.014,04 €	318.656,66 €
90	4.963,89 €	3.545,63 €	324.617,35 €	323.199,09 €

Tabla 81. Disminución del precio de inversión del motor IE1 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	1.991,23 €	1.422,30 €	312.993,80 €	312.424,88 €
37	2.667,40 €	1.905,29 €	310.017,37 €	309.255,25 €
45	3.059,62 €	2.185,44 €	308.494,15 €	307.619,98 €
55	3.714,97 €	2.653,55 €	309.230,94 €	308.169,52 €
75	5.322,93 €	3.802,09 €	314.937,33 €	313.416,50 €
90	5.548,46 €	3.963,19 €	317.591,22 €	316.005,95 €

Tabla 82. Disminución del precio de inversión del motor IE2 con perfil de carga A



Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.257,25 €	1.612,32 €	304.795,34 €	304.150,41 €
37	3.277,38 €	2.340,98 €	302.740,96 €	301.804,57 €
45	3.855,26 €	2.753,76 €	302.949,22 €	301.847,72 €
55	4.635,58 €	3.311,13 €	304.066,12 €	302.741,67 €
75	6.701,58 €	4.786,84 €	311.799,95 €	309.885,22 €
90	7.033,62 €	5.024,02 €	314.157,17 €	312.147,56 €

Tabla 83. Disminución del precio de inversión del motor IE3 con perfil de carga A

Potencia Mecánica (kW)	Inversión1 (€)	Inversión2 (€)	VAN1 (€)	VAN2 (€)
30	2.589,71 €	1.849,79 €	300.720,24 €	299.980,33 €
37	3.824,86 €	2.732,04 €	299.991,88 €	298.899,07 €
45	4.351,82 €	3.108,44 €	302.375,11 €	301.131,73 €
55	5.368,98 €	3.834,99 €	302.788,38 €	301.254,39 €
75	7.788,80 €	5.563,43 €	306.156,80 €	303.931,43 €
90	8.099,39 €	5.785,28 €	307.468,65 €	305.154,54 €

Tabla 84. Disminución del precio de inversión del motor IE4 con perfil de carga A

Algo similar al punto 3.2.4 sucede. Al tratarse de motores “pequeños” el coste de adquisición no suele ser tan importante.

# 4 CAMBIO DE MOTOR

Como se introdujo anteriormente, el caso cuatro consiste en la sustitución de un motor de eficiencia IE1 por otros más eficientes. En este caso, se va a estudiar la sustitución a motores IE3 e IE4 con el mismo rango de potencia que el actual y con sobredimensionamiento.

En primer lugar, para recordar los datos de partida, el enunciado sería el siguiente:

Una empresa tiene un motor IE1 de 30 kW, ya amortizado y con valor residual del 5% de su valor de compra. El perfil de carga utilizado será el perfil de carga variable, ya expuesto en el apartado 1.6.3. *Tercera parte* y las variables usadas serán las del artículo a excepción del número de horas que serán 8.760h.

La Figura 19 muestra la curva de carga ordenada del motor que puede obtenerse del sistema de monitorización y control (*Supervisory Control And Data Acquisition - SCADA*) de la planta. En este caso la curva está conforme al consumo anual.

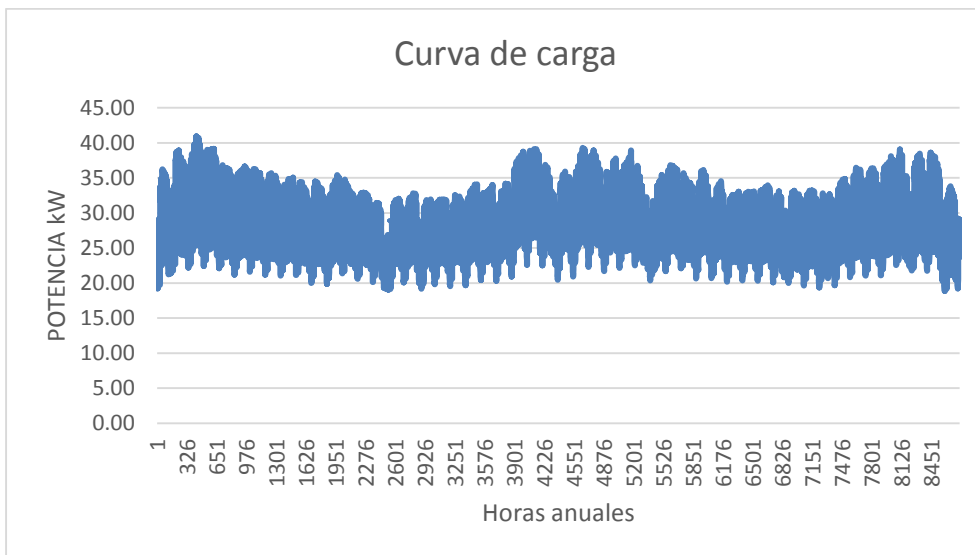


Figura 19. Evolución temporal de la carga de un motor

Sin embargo, para los análisis la curva hay que ordenarla por máximos de potencia. Por lo tanto, la curva quedaría como la Figura 20.

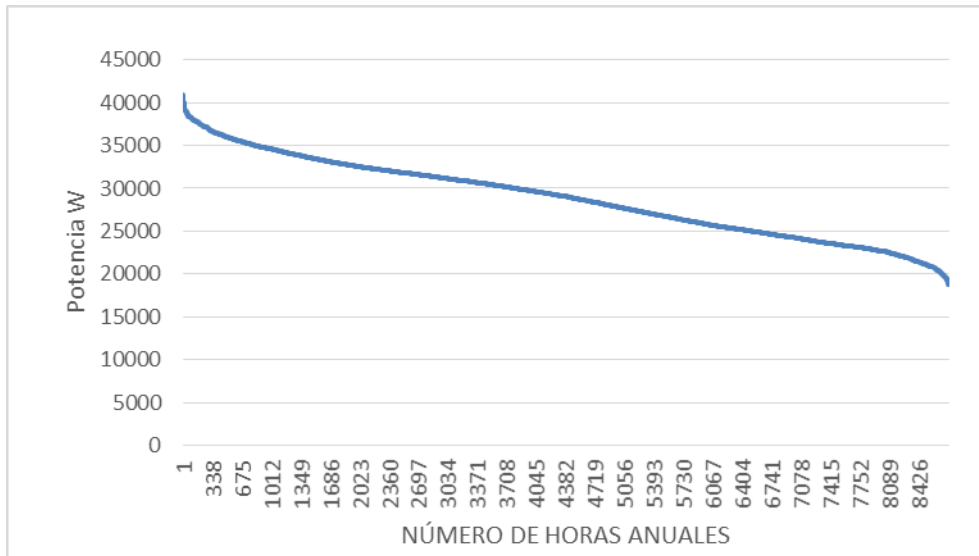


Figura 20. Curva ordenada de un motor real.

Tras ese primer paso, habría que buscar una línea de tendencia para la curva de carga ordenada.

La ecuación para la aproximación por recta sería la siguiente:

$$y = -0.0029 * x + 37.791 \text{ para } 0 \leq x < 2.000$$

$$y = -0.0015 * x + 32.68 \text{ para } 2.000 \leq x < 5.000$$

$$y = -0.0017 * x + 27.616 \text{ para } 5.000 \leq x < 7.500$$

$$y = -0.0029 * x + 23.886 \text{ para } 7.500 \leq x < 8.760$$

Estas ecuaciones tienen un valor R<sup>2</sup> muy cercano a 1, lo que significa que son una buena aproximación.

Con ellas, se puede sacar al ser una recta, de una forma muy sencilla el valor medio en esos periodos, los cuales quedarían de la siguiente forma:

	1	2	3	4
POTENCIA(kW)	34,891	30,429	25,491	22,059
TIEMPO(h)	2000	3000	2500	1260
FACTOR CARGA	1,16	1,01	0,85	0,74

Tabla 85. Datos de la curva de carga variable en tiempo con un motor de 30kW

Como se puede observar, este motor está un poco cargado, ya que una parte de su ciclo de vida tiene una potencia por encima de los 30kW.

Siguiendo con el análisis habría que calcular la energía y el coste de energía de esta que tendría ese motor durante los 12 años de su vida útil.

Al igual que en los casos anteriores, teniendo rendimientos y potencias mecánicas, se obtienen las potencias eléctricas, y con ellas se puede calcular la energía multiplicando con el número de horas para, posteriormente multiplicar por el precio de ella y sacar su coste.

Para el caso del motor IE1 de 30kW y con esos factores de carga, la energía anual consumida sería:

$$E = P_{elect1} * NH_1 + P_{elect2} * NH_2 + P_{elect3} * NH_3 + P_{elect4} * NH_4$$

Sustituyendo quedaría:

$$E_{IE1} = 276.237kWh$$

$$C_{e_{IE1}} = E_{IE1} * p_e = 27.624€$$

Ya se tiene el caso actual, ahora se estudiarán los casos con motores más eficientes.

#### 4.1 MOTOR IE3 NO SOBREDIMENSIONADO

Una vez analizado y sacados los valores del caso base, se pretende realizar los análisis de los supuestos cambios y así poder analizarlos. En primer lugar, se obtiene la energía anual consumida, teniendo en cuenta pérdidas.

$$E_{IE3} = 268.329kWh.$$

Por lo tanto,  $\Delta E = E_{IE1} - E_{IE3} = 276.237kWh - 268.329kWh = 7.908kWh \text{ anuales}$

$$\Delta c_e = \Delta E * p_e = 7.809kWh * 0.1 \frac{€}{kWh} = 780,9€$$

La inversión de este nuevo motor sería 2.257,25€.

Con esos datos, ya se puede calcular el VAN

$$VAN(Ci) = +Ci + Vr + \sum_{n=1}^N Ce * \frac{(1 + \Delta Ce)^n}{(1 + d)^n} = +Ci + Vr + \sum_{n=1}^N Ce * \frac{1}{(1 + d_{eq})^n}$$

$$VAN(Ci) = +Ci + \Delta Ce * k_{act}$$

$$VAN = -2.257,25 + 81,56 + 780,9 * 11.21311 = 6.691,48€$$

Se puede observar cómo el VAN>0, eso significa que la inversión es rentable.

Ahora se pretende analizar los otros dos indicadores anteriormente mencionados, como son TIR y PB.

$$VAN(Ci) = 0 = -2.257,25 + 81,56 + \frac{780,9 * [(1 + TIR)^{12} - 1]}{TIR * (1 + TIR)^{12}}$$

TIR=35.9%

TIR>>>deq. Por lo tanto, la inversión es rentable.

Para finalizar, se va a estudiar cual sería el PB, o tasa de retorno. Para ello, se introduce la ecuación y con la calculadora al igual que la TIR se calcula.

$$VAN(Ci) = 0 = -2.257,25 + 81,56 + \frac{780,9 * [(1 + 0.01059)^{PB} - 1]}{0.01059 * (1 + 0.01059)^{PB}}$$

PB=2.84 años. Es decir, algo antes del tercer año ha recuperado la inversión.

## 4.2 MOTOR IE3 SOBREDIMENSIONADO 37kW

$\Delta E$ (kWh)	INVERSIÓN (€)	VAN(€)	TIR (%)	PB (años)
9.220	3.277,38	7.061,28	27.2%	3.55 años

Tabla 86. Datos MOTOR IE3 de 37kW

## 4.3 MOTOR IE4 NO SOBREDIMENSIONADO

$\Delta E$ (kWh)	INVERSIÓN (€)	VAN(€)	TIR (%)	PB (años)
9.887	2.589,71	8.496,79	38.6%	2,59 años

Tabla 87. Datos MOTOR IE4 de 30kW

$\Delta E$ (kWh)	INVERSIÓN (€)	VAN(€)	TIR (%)	PB (años)
10.777	3.824,86	8.260,21	27.18%	3,56 años

Tabla 88. Datos MOTOR IE4 de 37kW

La conclusión que se puede sacar de aquí, es que es rentable económicamente hablando que un motor se cambie por un motor de mayor eficiencia, sin embargo, en cuanto al sobredimensionamiento de motores eficientes, se observa como TIR y PB hacen que sea menos rentable, ya que el ahorro de energía no es suficiente para satisfacer el aumento de la inversión.

Una vez realizado dicho análisis, se va a analizar las diferencias entre esa aproximación con cuatro rectas, y utilizando

# CONCLUSIONES

En general, el sobredimensionamiento de motores suena a pérdida de dinero, ya que los costes de inversión son más grandes. Sin embargo, tras el análisis de los puntos considerados en este proyecto, se llega a las siguientes conclusiones:

Los motores con baja eficiencia, son motores en los que las curvas de rendimientos no son planas. Esto produce que haya mucha variación de rendimientos (pérdidas) entre diferentes niveles o factores de carga, lo que hace que dependiendo de la carga en la cual trabaje el motor sea rentable o no el sobredimensionamiento. Como se observó en el Apartado “1.5. *Variación del rendimiento nominal con la potencia del motor*”, en los motores con mayor potencia, en la mayoría de los casos, el motor llegaba al máximo de su rendimiento al 75% de su carga. Pero claro, también hay que tener en cuenta la mayor inversión del motor. Tras observar las curvas de carga, se observa cómo la principal variable de la que depende el sobredimensionamiento es la energía consumida (aquí intervienen las pérdidas), y de ella el número de horas de funcionamiento del motor. Así que, en conclusión a medida que aumenta el número de horas de funcionamiento de un motor, aumenta la rentabilidad de producir un sobredimensionamiento del motor.

Para motores de alta eficiencia, como IE3 o IE4, pasa algo diferente en relación a las curvas de rendimiento. En ellos, las curvas de rendimiento son muy planas, por lo tanto, tiene un rendimiento más o menos constante dependiendo del FC. Sin embargo, dependiendo del factor de carga en el que trabaje el motor hace que el sobredimensionamiento sea rentable o no. Siendo rentable para casos con grandes FC y no rentables para los otros casos.

Por lo tanto, tras este primero análisis, dependiendo de la clase de eficiencia y del perfil de carga del motor, se puede considerar rentable el sobredimensionamiento o no.

Por otra parte, la potencia nominal del motor dentro de una misma clase de eficiencia depende de su tamaño. Para motores más pequeños el rendimiento suele ser menos plano que para el caso de motores grandes. Eso hace que haya más diferencia de rendimiento entre un motor bajo y su siguiente que entre el motor grande y el siguiente sobredimensionado

En la última parte de este proyecto se exponía la posibilidad de cambiar un motor de baja eficiencia, ya amortizado, por otro de mayor eficiencia. Tras los análisis, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

Tras el perfil de carga del motor real, se observaba cómo siempre era rentable el cambio de un motor cuando el perfil de carga era como el estudiado, ya que el número de horas eran las máximas posibles. Sin embargo, tras los análisis se observó algo que merece la pena destacar. El sobredimensionamiento de esos motores hacía que la TIR bajará y el PB subiera, eso significa que resultan menos rentables.

Como se comentó anteriormente los motores de alta eficiencia (IE3 o IE4) tienen una curva de carga muy plana, eso significa que a igual potencia mecánica, la potencia eléctrica es igual o parecida para diferentes rangos de potencia. No obstante, tal y como se ha analizado dependiendo del FC en el que trabaje el motor el sobredimensionamiento es rentable o no.

Todas estas conclusiones obtenidas son desde el punto de vista económico. Obviamente si estudiamos otros factores, ya sean temperatura de operación, vida útil del equipo en definitiva, podría tener sus propias conclusiones, no muy lejos de las económicas, pero no iguales.

## REFERENCIAS

---

- [1] A. A. Maarten van Werkhoven, *Accelerating the Global Adoption of ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC MOTORS AND MOTOR SYSTEMS*.
- [2] F. J. T. E. F.-. M. C.-. G.-. A. T. d. Almeida, «Technical and economic considerations on induction motor oversizing,» 2015.
- [3] *UNE-EN 60034-1:2011, Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento.*, 2011.
- [4] U. I. 6.-2.-1. R. e. m. -. P. 2.-1. m. f. d. l. a. e. f. t. (. m. f. t. vehicles).
- [5] 2. a. A. T. d. A. Fernando J. T. E. Ferreira1, «Induction Motor Oversizing – Are There Any Benefits?».
- [6] WEG, *Technical catalogue IEC MARKET W50 Three Phase Electric Motors*.
- [7] EUROSTAT, «Electricity prices for non household consumers - bi-annual data,» 2017.

