

Marc Martín Toledano

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO DE DOS MOTORES DE
INDUCCIÓN ACOPLADOS EN EL MISMO EJE MECÁNICO**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Dirigido por el Dr. Luis Guasch Pesquer y el Dr. David García Elvira

Grado de Ingeniería Eléctrica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2024

Índice

1	Memoria	4
1.1	Objeto.....	4
1.2	Alcance	4
1.3	Antecedentes	4
1.3.1	Máquina de inducción	5
1.3.1.1	Aspectos constructivos	5
1.3.1.2	Principio de funcionamiento.....	7
1.3.1.3	Circuito equivalente y modelo matemático de la MdI	7
1.3.1.4	Balance de potencias	9
1.3.1.5	Característica mecánica del motor.....	10
1.3.2	Máquina de corriente continua como generador	12
1.3.2.1	Aspectos constructivos	12
1.3.2.2	Principio de funcionamiento.....	12
1.3.2.3	Generador de C.C	13
1.4	Normas y referencias	14
1.4.1	Disposiciones legales y normativa aplicable	14
1.4.2	Programas de cálculo	14
1.4.3	Plan de gestión de la calidad aplicado durante la redacción del proyecto.....	14
1.4.4	Bibliografía.....	14
1.4.5	Otras referencias	14
1.5	Definiciones y abreviaturas.....	14
1.6	Requisitos de diseño	15
1.6.1	Máquinas de inducción disponibles en el laboratorio	15
1.6.2	Máquina de corriente continua disponible en el laboratorio	17
1.6.3	Cargas resistivas disponibles en el laboratorio.....	18
1.6.4	Conexión a la red.....	19
1.6.5	Instrumento de medida disponible en el laboratorio	19
1.7	Análisis de soluciones.....	19
1.7.1	Motores de pequeña potencia	19
1.7.1.1	Estimación de parámetros.....	19
1.7.1.2	Pérdidas magnéticas y mecánicas.....	23
1.7.1.3	Análisis del rendimiento.....	27
1.7.2	Motores de media potencia.....	30
1.7.2.1	Justificación de los motores seleccionados	30
1.7.2.2	Estimación de parámetros mediante catálogo	31
1.7.2.3	Análisis del rendimiento	34

1.8	Resultados finales	37
1.8.1	Motores de pequeña potencia	37
1.8.1.1	Estimación de parámetros mediante ensayos experimentales	37
1.8.1.2	Estimación de parámetros mediante catálogo	42
1.8.1.3	Rendimiento de los motores	44
1.8.2	Motores de media potencia.....	49
1.8.2.1	Estimación de parámetros mediante catálogo	49
1.8.2.2	Estimación de las pérdidas magnéticas	49
1.8.2.3	Estimación de las pérdidas mecánicas.....	51
1.8.2.4	Rendimiento de los motores	51
1.8.3	Conclusiones.....	54
1.9	Planificación	55
1.10	Orden de prioridad de los documentos	55
2	Anexos.....	55
2.1	Motores de pequeña potencia	55
2.1.1	Estimación de parámetros mediante ensayos experimentales	55
2.1.1.1	Motor 4 kW	55
2.1.1.2	Motor 1,5 kW	57
2.1.2	Estimación de parámetros mediante catálogo	59
2.1.2.1	Motor 4 kW	59
2.1.2.2	Motor 1,5 kW	60
2.1.3	Ensayo en carga.....	60
2.1.3.1	Motor 4 kW	60
2.1.3.2	Motor 1,5 kW	62
2.1.4	Rendimiento de los motores	63
2.1.4.1	Motor 4 kW	63
2.1.4.2	Motor 1,5 kW	64
2.2	Motores de media potencia	65
2.2.1	Estimación de parámetros mediante catálogo	65
2.2.2	Rendimiento de los motores	65
2.2.2.1	Motor 45 kW	65
2.2.2.2	Motor 11 kW	66
2.2.2.3	Motor 7,5 kW	66
2.3	Catálogo de los motores utilizados	67

1 Memoria

1.1 Objeto

El presente TFG tiene como objetivo el análisis práctico del rendimiento de dos motores de inducción de pequeña potencia acoplados en el mismo eje mecánico, disponibles en el laboratorio de la URV. El estudio se realiza a partir de tres métodos diferentes: en base a ensayos experimentales (vacío, cortocircuito y carga), estimación de parámetros mediante el catálogo del fabricante y cálculo del rendimiento analítico en función de únicamente los ensayos de vacío y cortocircuito.

Por otro lado, se estudiará de manera teórica el rendimiento de otros motores de media potencia del mismo fabricante con la finalidad de valorar la utilidad de la aplicación en potencias superiores.

1.2 Alcance

El alcance del presente TFG se divide en función de los motores estudiados:

Motores de pequeña potencia

- Obtención de parámetros a partir de los ensayos de vacío y cortocircuito, además de las pérdidas magnéticas y mecánicas.
- Estimación de parámetros mediante el catálogo del fabricante y determinación del conjunto de parámetros más adecuado.
- Dimensionamiento de las cargas para el ensayo en carga.
- Diseño del ensayo en carga para la posterior representación de la curva de rendimiento.
- Análisis y determinación del error del rendimiento cometido en los diferentes métodos.

Motores de media potencia

- Selección de los motores de media potencia.
- Estimación de parámetros mediante el catálogo del fabricante y determinación del conjunto de parámetros más adecuado.
- Estimación de pérdidas mecánicas y magnéticas a partir de la extrapolación de pérdidas de los motores ensayados experimentalmente.
- Análisis del rendimiento y valoración del acoplamiento de los motores.

1.3 Antecedentes

Si se analiza la curva de eficiencia de un motor de inducción respecto a una carga mecánica se puede apreciar una caída considerable del rendimiento cuando la potencia que desarrolla dicho motor es inferior a la mitad de la nominal [1].

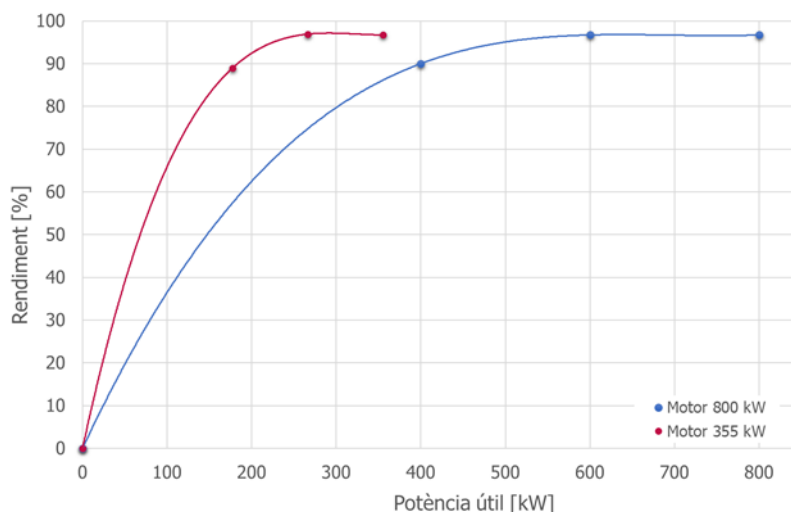


Figura 1. Comparación del rendimiento de motores de 355 y 800 kW

Como se puede observar en la figura superior, para una carga de 200 kW el motor de 800 kW presenta un bajo rendimiento, cerca del 60 %, mientras que, para el mismo valor de carga, el motor de 355 kW desarrolla un alto rendimiento, en torno al 90 %. Por consiguiente, la adición de un segundo motor de menor potencia para que trabaje cuando el valor de la carga provoque una baja eficiencia del motor principal, produciría un aumento de rendimiento del conjunto, y por tanto un mayor ahorro energético.

En esta aplicación, se alterna el accionamiento de una carga de elevada potencia con el de otra de potencia reducida en diferentes periodos de tiempo mediante un sistema de conmutación automatizado.

1.3.1 Máquina de inducción

1.3.1.1 Aspectos constructivos

La máquina de inducción comparte la misma estructura básica que cualquier otra máquina rotativa; consta de un estátor y de un rotor.

El estátor presenta una forma cilíndrica y está constituido por una agrupación de chapas ferromagnéticas con ranuras en la superficie interna. Dentro de las ranuras se encuentra un devanado trifásico distribuido, por el cual circula una corriente trifásica sinusoidal que conlleva a un flujo giratorio, es decir, un campo magnético. El estátor está protegido físicamente por una carcasa que lo rodea, que tiene integradas unas patas de fijación para que la máquina se pueda colocar sobre una superficie uniforme.

En los motores de mediana potencia o superior, se suele añadir un ventilador en el eje para realizar una refrigeración forzada y así poder evacuar parte del calor producido por las pérdidas en la conversión a energía mecánica. Frecuentemente la carcasa dispone de aletas que también permiten disipar dicho calor. En la siguiente figura se muestran los elementos físicos que componen la Mdi:

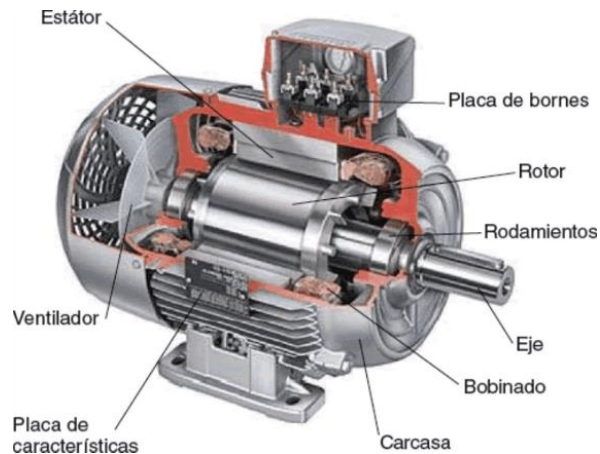


Figura 2. Estructura del motor de inducción

Respecto al devanado del estátor, este consta de tres fases separadas 120° (para que se formen dos pares de polos) entre cada una de ellas. Cada fase cuenta con dos terminales de acceso situados en la caja de bornes de conexión de la MdI y estos se pueden conectar en estrella o triángulo, dependiendo de la tensión a la que se desee alimentar la máquina. En la *Figura 3* se puede observar cómo están conectados internamente estos terminales:

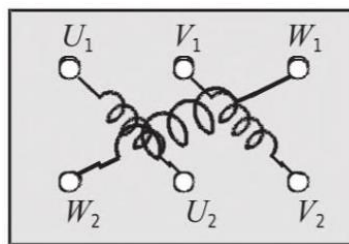


Figura 3. Conexión de los terminales en la caja de bornes

En cuanto al rotor, está compuesto por un apilamiento de chapas en forma de cilindro. En las ranuras de la circunferencia exterior se sitúa el devanado. Existen de dos tipos: rotor de jaula de ardilla o rotor devanado. En la siguiente figura se muestra el aspecto que tiene el rotor de jaula de ardilla:

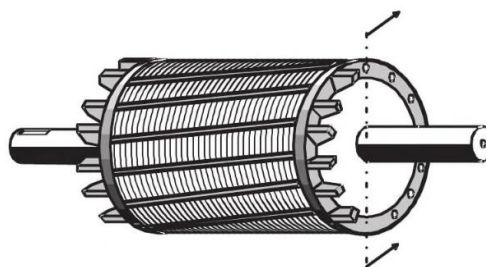


Figura 4. Rotor de jaula de ardilla

El de jaula de ardilla es el más utilizado y se diferencia por tener como conductores unas barras de aluminio o cobre, las cuales están cortocircuitadas mediante unos anillos en cada costado. Además, no permite una conexión eléctrica externa.

Por otro lado, el rotor devanado tiene un arrollamiento de cobre trifásico parecido al del estátor. A diferencia del de jaula de ardilla, este permite una conexión externa, ya sea para conectar unas resistencias adicionales para regular el arranque como motor o para intercalar un convertidor electrónico entre la red funcionando como aerogenerador.

1.3.1.2 Principio de funcionamiento

Puede funcionar como motor o generador, pero en la mayoría de las situaciones trabaja como motor. Como se ha mencionado anteriormente, la máquina está compuesta por un estátor cilíndrico que tiene unas ranuras en las que se aloja un devanado trifásico, en el cual las tres fases se encuentran desfasadas 120° entre sí.

Para alimentar la máquina se inyecta un sistema de tensiones trifásico y por tanto circulan corrientes trifásicas. Como resultado, aparece un campo magnético giratorio con una distribución sinusoidal en el entrehierro que gira a la velocidad de sincronismo siguiendo la relación:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Los conductores situados en la superficie del rotor se encuentran sometidos al campo magnético en movimiento y por tanto aparece una velocidad relativa y se induce una f.e.m a cada uno de los conductores. Esto lo que hace es que haya unas caídas de potencial diferentes entre los conductores y como están cortocircuitados formando un circuito cerrado, entonces circula una corriente. Debido a esta corriente aparece una fuerza tangencial, que desarrolla un par que hará que la máquina gire si el par empleado por el motor es mayor que el resistente. La velocidad del rotor irá creciendo, persiguiendo a la del campo magnético hasta que se encuentre a una ligeramente inferior a esta. En el caso supuesto de que el rotor llegase a alcanzar la velocidad síncrona, la diferencia de campo giratorio entre estátor y rotor sería nula. En consecuencia, desaparecería la f.e.m inducida que provocaba la rotación de la máquina.

Por lo tanto, en el caso de que la máquina funcione como motor, el rotor debe girar a una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo ($n_r < n_s$) y es debido a esto por lo que estas máquinas también son llamadas asíncronas.

La diferencia entre estas dos velocidades se denomina deslizamiento, que cumple la siguiente relación:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

1.3.1.3 Circuito equivalente y modelo matemático de la MdI

Para la modelización del motor de inducción se deben suponer una serie de hipótesis para simplificar el modelo. Se parte de que la máquina es completamente simétrica, es decir, el desfase entre las fases es 120° , todas las espiras son exactamente iguales, etc. La máquina se alimenta con un sistema de tensiones equilibrado, con la misma frecuencia, senoidales y con el mismo valor eficaz.

Para analizar la máquina se emplea un esquema monofásico basado en el modelo matemático del transformador, pero en vez de representar un devanado en el primario y en el secundario, se expresa en forma de estátor y rotor cortocircuitado respectivamente. La complicación reside en que, a diferencia de los transformadores, las frecuencias en el estátor y en el rotor no son iguales. Debido a esto, aprovechando que la frecuencia del estátor es igual a la del rotor cuando el motor está en reposo, se transforma el rotor en movimiento a reposo, donde la resistencia del rotor R_2 pasa a ser R_2/s . De esta forma se consigue que las frecuencias del estátor y rotor sean idénticas.

Hay dos formas de representar el circuito equivalente de la MdI, el modelo de 6 parámetros y el modelo de 4 parámetros. La diferencia entre los dos circuitos reside en el lugar en el que

se encuentra situado la rama en paralelo del circuito magnético. Siguiendo el mismo razonamiento que se utiliza con la representación del circuito equivalente de los transformadores, se puede realizar una simplificación desplazando la rama del circuito magnético a la entrada de la máquina, ya que la caída de tensión en R_1 y X_{d1} es de un valor muy bajo y se comete un error aceptable, que facilita los cálculos.

En la *Figura 5* se muestra el circuito equivalente de 6 parámetros y en la *Figura 6*, el circuito de 4 parámetros:

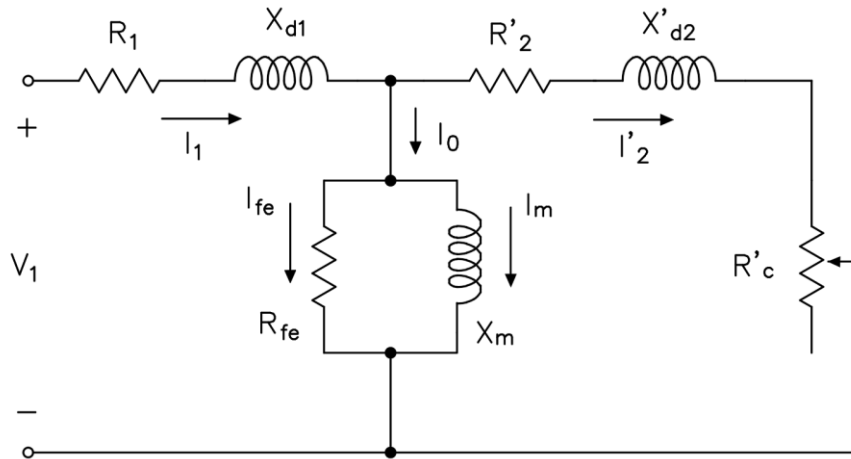


Figura 5. Circuito equivalente del motor de inducción de 6 parámetros

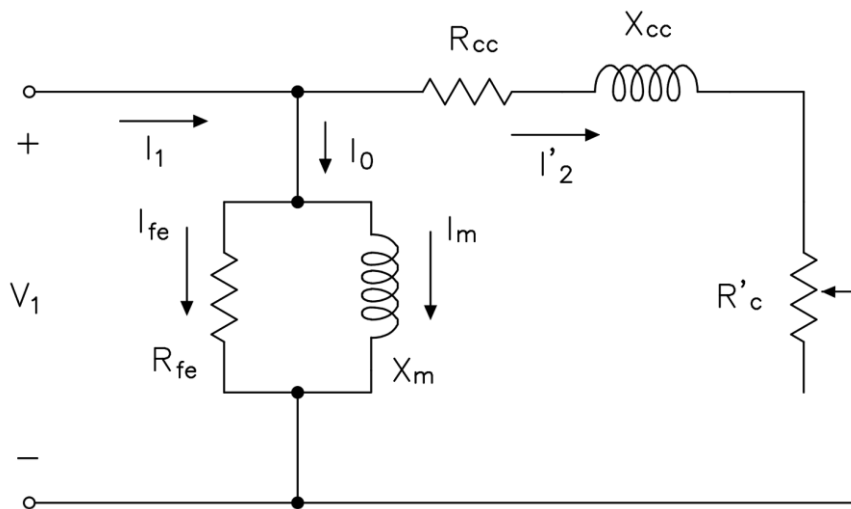


Figura 6. Circuito equivalente del motor de inducción de 4 parámetros

- Donde:
- $R_1 \equiv$ resistencia del devanado del estátor
 - $X_{d1} \equiv$ flujo de dispersión en el estátor
 - $R_{fe} \equiv$ resistencia del circuito magnético
 - $X_m \equiv$ reactancia magnetizante
 - $X'_{d2} \equiv$ flujo de dispersión en el rotor (referido al estátor)
 - $R'_2 \equiv$ resistencia del devanado del rotor (referida al estátor)
 - $R'_c \equiv$ resistencia de carga (referida al estátor)

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 \equiv \text{resistencia de cortocircuito}$$

$$X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2} \equiv \text{reactancia de cortocircuito}$$

En el devanado del rotor se encuentran dos resistencias R'_2 y R'_c , que si se suman se puede expresar de la siguiente forma:

$$R'_2 + R'_c = \frac{R'_2}{s} \quad (3)$$

1.3.1.4 Balance de potencias

En el proceso de conversión de energía eléctrica a mecánica, se producen una serie de pérdidas en los elementos que componen la máquina. A continuación, se describe el balance de potencias para el circuito equivalente de 6 parámetros:

En primer lugar, la potencia que absorbe el motor de la red viene definida por la tensión de fase V_1 , corriente de fase I_1 y el desfase entre las dos ϕ_1 :

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1 \quad (4)$$

En el estátor, parte de la potencia se disipa en la resistencia del devanado del estátor (R_1), de valor:

$$P_{cu,1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (5)$$

y en la resistencia del circuito magnético:

$$P_{fe} = 3 \cdot R_{fe} \cdot I_{fe}^2 \quad (6)$$

dando lugar a la potencia absorbida por el rotor, P_a :

$$P_a = P_1 - P_{cu,1} - P_{fe} \quad (7)$$

De la misma forma que sucede en el estátor, en el rotor también se disipa potencia en la resistencia de su respectivo devanado (R'_2), de magnitud:

$$P_{cu,2} = 3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2 \quad (8)$$

Si se descuentan estas últimas, se obtiene la potencia interna de la máquina, P_i :

$$P_i = P_a - P_{cu,2} \quad (9)$$

En los circuitos equivalentes vistos en el apartado anterior no se pueden cuantificar las pérdidas mecánicas (P_{fw}), es decir, se requiere de un ensayo para poder determinarlas.

Por último, restando las pérdidas mecánicas se obtiene la potencia mecánica útil (P_2 o P_{mec}) que desarrolla finalmente la máquina:

$$P_2 = P_i - P_{fw} \quad (10)$$

donde, la expresión (10) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$P_2 = P_1 - (P_{fe} + P_{cu,1} + P_{cu,2} + P_{fw}) \quad (11)$$

El rendimiento de una máquina viene definido por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fe} + P_{cu,1} + P_{cu,2} + P_{fw}} \quad (12)$$

1.3.1.5 Característica mecánica del motor

Como se ha comentado en el apartado 1.3.1.2, la corriente que circula por los conductores genera una fuerza tangencial, a la vez que un par definido por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{3 \cdot R'_2}{\omega_s \cdot s} \cdot I'_2{}^2 \quad (13)$$

A partir del circuito equivalente de 4 parámetros en la *Figura 6*, se puede deducir la siguiente expresión para la corriente:

$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + X_{cc}{}^2}} \quad (14)$$

donde $X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2}$

Finalmente, si se sustituye la ecuación anterior en la expresión (13), se obtiene el par en función de los parámetros del circuito equivalente, en cuya expresión el único factor que varía es el deslizamiento.

$$T = \frac{3 \cdot R'_2}{\omega_s \cdot s} \cdot \frac{V_1^2}{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + X_{cc}{}^2} \quad (15)$$

En función del valor que tome el deslizamiento, la máquina puede trabajar en tres modos de funcionamiento: freno, motor y generador.

El más utilizado y el que se emplea en este TFG es el comportamiento como motor, en el cual el deslizamiento se encuentra entre 0 y 1.

Los puntos de funcionamiento más representativos son los siguientes:

- Punto 0: corresponde al régimen de puesta en marcha, donde la velocidad es nula y el deslizamiento es igual a $s = 1$.
- Punto M: es el punto de funcionamiento de par máximo. En esta situación, $s = s_M$ y $T = T_M$
- Punto N: zona de funcionamiento nominal. Es el punto en la cual el motor está diseñado operar a plena carga y en el que normalmente trabaja. En este caso, la velocidad $n = n_N$ es próxima a la de sincronismo, $T = T_N$ y los deslizamientos en los cuales se suele producir están entre $0,005 < s_N < 0,1$.
- Punto S: punto de sincronismo. El par y el sincronismo que desarrolla el motor es nulo. En este punto, la velocidad de giro es la de sincronismo, situación a la cual no se puede alcanzar físicamente.

Se pueden destacar dos zonas de interés, zona estable e inestable.

Operar en la zona inestable implica un desaprovechamiento del motor, ya que se está trabajando a un rendimiento inferior al asignado. Por el contrario, en la zona estable el motor gira a una velocidad constante cercana a la de sincronismo, por lo que funciona un rendimiento próximo al nominal.

Cabe destacar que, si se opera por encima del punto de funcionamiento nominal, se estaría sobrecargando la máquina, por tanto, consume más corriente y se correría el riesgo de quemar el motor.

En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de la característica mecánica de un motor de inducción en función de la velocidad en el modo de funcionamiento de motor:

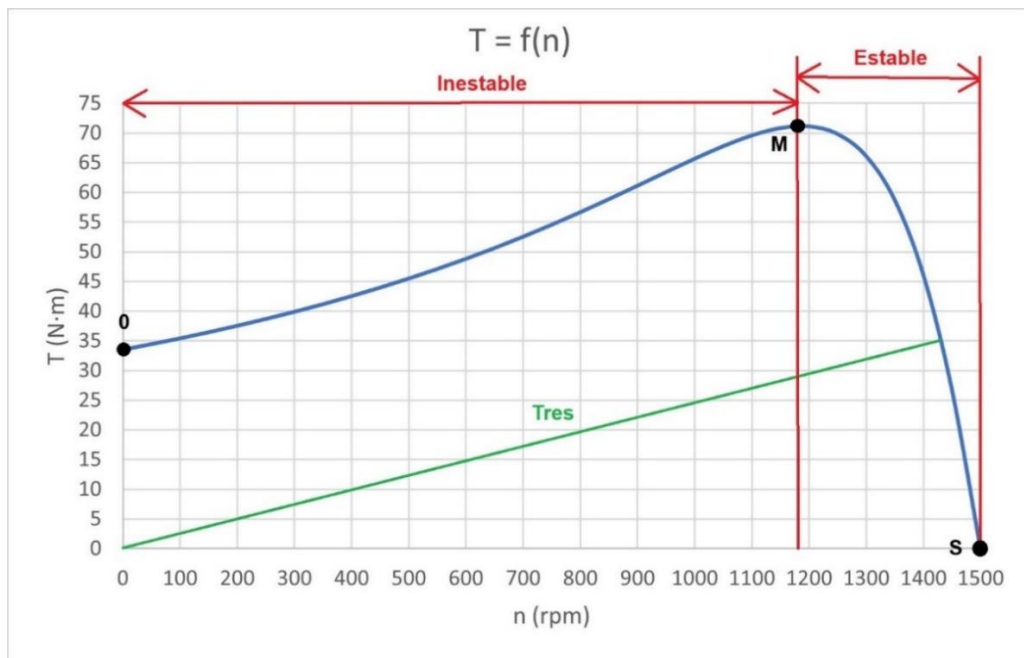


Figura 7. Ejemplo de la característica mecánica de un MdI

Si se observa la gráfica anterior, se puede ver un punto en el que el par desarrollado por el motor es el máximo, que corresponde al deslizamiento máximo s_M . Este se obtiene de derivar la expresión (15) respecto al deslizamiento e igualando a 0:

$$\frac{dT}{ds} = 0 \rightarrow s_M = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}} \quad (16)$$

Se puede calcular la velocidad máxima n_M mediante la relación:

$$n_M = (1 - s_M) \cdot n_s \quad (17)$$

Sustituyendo (16) en (15) se obtiene el par máximo del motor:

$$T_M = \frac{3 \cdot R'_2}{\omega_s \cdot s_M} \cdot \frac{V_1^2}{(R_1 + \frac{R'_2}{s_M})^2 + X_{cc}^2} \quad (18)$$

1.3.2 Máquina de corriente continua como generador

1.3.2.1 Aspectos constructivos

Así como la máquina de inducción, la máquina de corriente continua también está formada por un estátor y un rotor.

El estátor está constituido por la culata, donde se encuentra el circuito magnético inductor y los polos. El inducido se encuentra en el rotor y su devanado está encajado en ranuras. Este se alimenta a partir del colector de delgas.

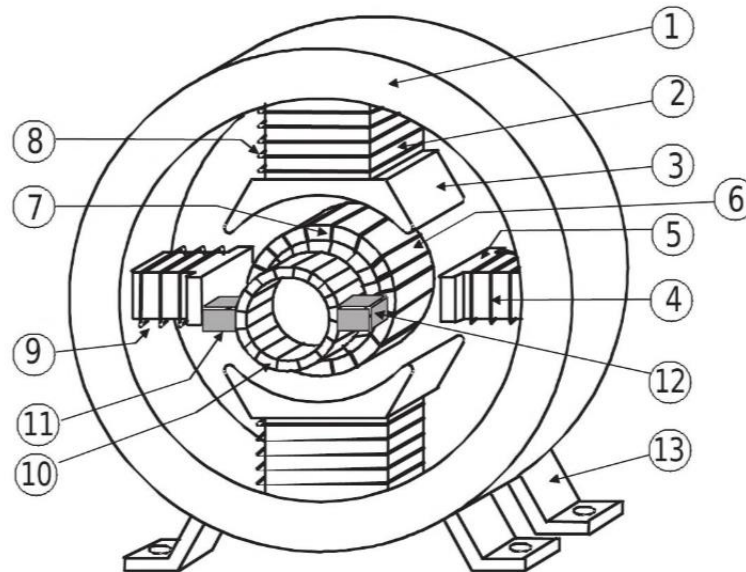


Figura 8. Elementos de una máquina de C.C.

En la siguiente tabla se muestran los elementos por los que está compuesta una máquina de C.C. en referencia a la *Figura 8*:

1. Culata o carcasa	2. Núcleos polares
3. Zapata polar	4. Polos de conmutación
5. Zapata polar del polo de conmutación	6. Devanado del inducido
7. Arrollamiento del inducido	8. Devanado inductor
9. Devanado de conmutación	10. Colector de delgas
11. Escobilla positiva	12. Escobilla negativa
13. Patas de la carcasa	

Tabla 1. Designación de los elementos de máquina de C.C.

1.3.2.2 Principio de funcionamiento

La máquina de corriente continua puede desempeñar la función de motor o de generador. En el presente TFG interesa que la máquina actúe como generador, es decir, que convierta la energía mecánica proporcionada por un motor a energía eléctrica. En este caso, en el inducido se producen corrientes alternas que son rectificadas por el colector de delgas y suministradas al exterior en forma de corriente continua.

La máquina se acciona a partir de un motor, por ejemplo, un MdI. En consecuencia, se generan unas f.e.m en los conductores. Cuando se conecta una carga resistiva se originan las corrientes en el inducido mencionadas anteriormente y estas, al interactuar con el campo magnético del inductor, generan un par electromagnético resistente al movimiento rotativo que ejerce el motor principal. En la siguiente figura se puede ver la explicación anterior:

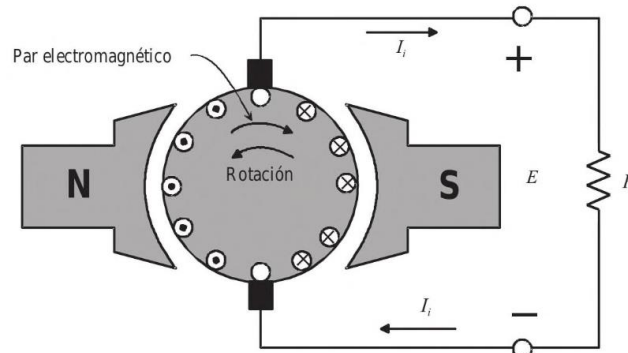


Figura 9. Máquina de C.C. funcionando como generador

1.3.2.3 Generador de C.C

Como se ha mencionado anteriormente, la máquina de corriente continua está constituida por un devanado. El inductor, también llamado devanado de excitación, lo forman los arrollamientos de todos los polos conectados en serie; a estos se le suministra una tensión de corriente continua (V_e), que genera una corriente de excitación (I_e), que a su vez causa una f.m.m, que es la que proporciona el flujo (Φ) para excitar a la máquina. En el presente TFG, se utilizará una fuente de C.C. como excitación externa del generador. En la *Figura 10* se puede apreciar un esquema del generador:

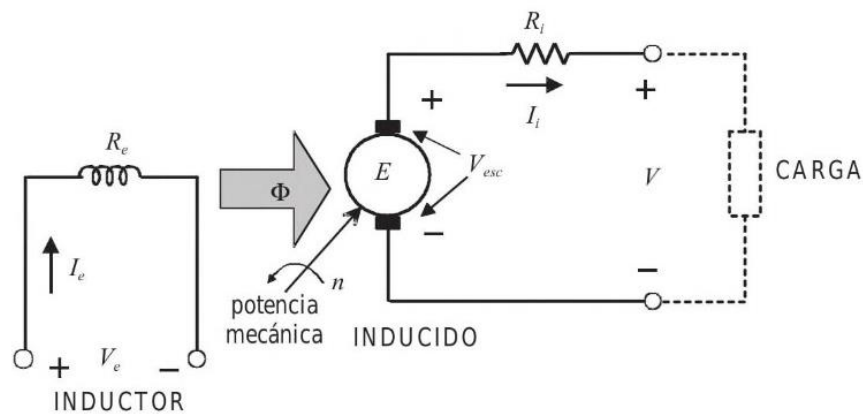


Figura 10. Generador de C.C. con excitación independiente

Cuando se conecta una carga se obtiene una expresión que rige el circuito del inducido:

$$E = V + R_i \cdot I_i + V_{esc} \quad (19)$$

Donde:

$E \equiv$ fuerza electromotriz (f.e.m)

$V \equiv$ tensión en los bornes del generador

$R_i \cdot I_i \equiv$ caída de tensión en la resistencia interna del generador

$V_{esc} \equiv$ caída de tensión en las escobillas (normalmente se toma un valor de 2 V)

La ecuación que corresponde al devanado de excitación es la siguiente:

$$V_e = R_e \cdot I_e \quad (20)$$

A partir de la curva de vacío se puede obtener la expresión que define la f.e.m:

$$E = k_E \cdot n \cdot \phi \quad (21)$$

Donde k_E es una constante característica de cada máquina. Esta expresión indica que la f.e.m es directamente proporcional a la velocidad del rotor y al flujo inductor.

1.4 Normas y referencias

1.4.1 Disposiciones legales y normativa aplicable

- UNE-EN 60034-28:2013. Máquinas eléctricas rotativas. Parte 28: Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula trifásicos de baja tensión.

1.4.2 Programas de cálculo

Microsoft Office - Excel

1.4.3 Plan de gestión de la calidad aplicado durante la redacción del proyecto

No aplica en este TFG.

1.4.4 Bibliografía

[1] Análisis del ahorro de energía añadiendo un segundo motor de inducción trifásico en el mismo eje mecánico - juny 2021 - Francisco José Espejo Bernet – Universitat Rovira i Virgili.

[2] Jesús Fraile Mora. “Máquinas eléctricas”. Octava edición. ISBN: 978-84-1622-866-9

[3] J. Pedra, F. Córcoles, "Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters from Manufacturer Data", IEEE, Transactions on energy conversion, Vol. 19, No. 2, June 2004

1.4.5 Otras referencias

- Catálogo de los motores de inducción estudiados:

<https://www.rodamientos-rodyco.es/wp-content/uploads/2015/06/08.-Cat%C3%A1logo-MOTORES-SIEMENS.pdf>

1.5 Definiciones y abreviaturas

C.C. \equiv corriente continua

$\cos\phi$ \equiv factor de potencia

f.e.m \equiv fuerza electromotriz

f.m.m \equiv fuerza magneto motriz

I_e \equiv corriente de excitación

I_i \equiv corriente del inducido

MdI \equiv Máquina de Inducción

M1 \equiv motor principal de 4 kW

M2 \equiv motor secundario de 1,5 kW

$n = n_r \equiv$ velocidad del rotor

$n_s \equiv$ velocidad de sincronismo

$P_{fe} \equiv$ pérdidas magnéticas o del hierro

$P_{fw} \equiv$ pérdidas mecánicas

$R'_c \equiv$ resistencia de carga (referida al estátor)

$R_{fe} \equiv$ resistencia del circuito magnético

$R_i \equiv$ resistencia interna del generador de C.C

$R_1 \equiv$ resistencia del devanado del estátor

$R'_2 \equiv$ resistencia del devanado del rotor (referida al estátor)

$s \equiv$ deslizamiento

$V \equiv$ tensión en los bornes del generador

$V_{esc} \equiv$ caída de tensión en las escobillas

$X_{d1} \equiv$ flujo de dispersión en el estátor

$X'_{d2} \equiv$ flujo de dispersión en el rotor (referido al estátor)

$X_m \equiv$ reactancia magnetizante

1.6 Requisitos de diseño

Para llevar a cabo el análisis experimental del rendimiento, se han utilizado dos motores de inducción trifásicos y una máquina de corriente continua disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas de la URV. La idea principal era realizar los ensayos con dos motores entre los cuales hubiera una diferencia de potencia del orden de 4 veces para obtener buenos resultados, pero el laboratorio no dispone de motores de mayor potencia.

1.6.1 Máquinas de inducción disponibles en el laboratorio

La máquina de inducción que actuará como motor principal tiene una potencia nominal de 4 kW. Las características principales se encuentran a continuación:

Modelo	Frecuencia (Hz)	P_N (kW)	V_N (V) Δ/Y	I_N (A) Δ/Y	$\cos\phi_N$	n_N (rpm)
Siemens 1LA7113-4AA10	50	4	230/400	14,3/8,2	0,83	1440

Tabla 2. Características del motor de 4 kW



Figura 11. Placa de características del motor de 4 kW



Figura 12. Motor de inducción de 4 kW

El motor que se utilizará para cubrir la demanda de baja potencia tiene una potencia nominal de 1,5 kW. Los datos de la placa de características se muestran a continuación:

Modelo	Frecuencia (Hz)	P _N (kW)	V _N (V) Δ/Y	I _N (A) Δ/Y	cosφ _N	n _N (rpm)
Siemens 1LA7096-4AA10	50	1,5	230/400	6/3,45	0,82	1420

Tabla 3. Características del motor de 1,5 kW

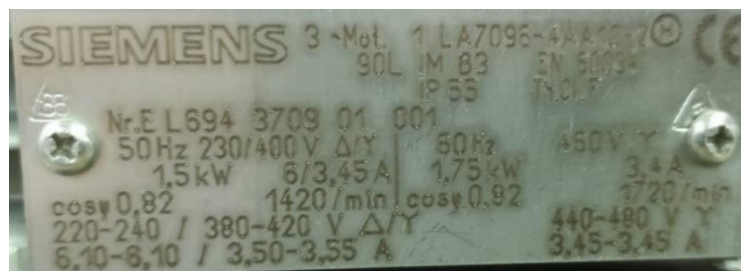


Figura 13. Placa de características del motor de 1,5 kW



Figura 14. Motor de inducción de 1,5 kW

Ver apartado 2.3 para consultar todos los datos de los motores proporcionados en el catálogo del fabricante.

1.6.2 Máquina de corriente continua disponible en el laboratorio

El generador de corriente continua es el encargado de proporcionar una carga mecánica a los motores de inducción trifásicos. Para regular el par resistente que ofrece el generador de corriente continua, éste alimentará una carga resistiva variable. Los datos de la placa de características son los siguientes:

Modelo	P_N (kW)	V_i (V)	I_i (A)	V_e (V)	I_e (A)	n_N (rpm)
Oremor BK2-112L	4	220	25	220	0,7	1500

Tabla 4. Características del generador de C.C. de 4 kW



Figura 15. Placa de características del generador de C.C. de 4 kW



Figura 16. Generador de C.C de 4 kW

Esta máquina de corriente continua dispone de ventilación forzada (parte superior de la *Figura 16*), activada por un pequeño motor de inducción trifásico.

1.6.3 Cargas resistivas disponibles en el laboratorio

El laboratorio de máquinas eléctricas dispone de tres armarios verticales que cuentan con tres tipos de cargas trifásicas: resistivas, inductivas y capacitivas. En los experimentos llevados a cabo, únicamente se han utilizado las cargas de tipo resistivo. Ver *Tabla 5*.

Posición interruptor	Interruptor				Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Potencia por fase (W)
	S1	S2	S3	S4			
1	0	0	0	0	-	0	0
2	I	0	0	0	220	1	220
3	0	I	0	0	110	2	440
4	I	I	0	0	73	3	660
5	0	0	I	0	55	4	880
6	I	0	I	0	44	5	1100
7	0	I	I	0	36,7	6	1320
8	I	I	I	0	31,4	7	1540
9	0	0	0	I	27,5	8	1760
10	I	0	0	I	24,4	9	1980
11	0	I	0	I	22	10	2200
12	I	I	0	I	20	11	2420
13	0	0	I	I	18,3	12	2640
14	I	0	I	I	16,9	13	2860
15	0	I	I	I	15,7	14	3080
16	I	I	I	I	14,7	15	3300

Tabla 5. Armario de cargas resistivas trifásico

1.6.4 Conexión a la red

En el laboratorio de máquinas eléctricas hay dos redes de tensión trifásicas, de 230 V y 400 V. Para la realización de los ensayos, se ha utilizado la red de 400 V, ya que es el valor de tensión con el cual se alimentan la mayoría de los motores de baja tensión.

Otro factor a tener en cuenta para escoger el valor de la red es la conexión que se empleará en la caja de bornes de los motores. Se utilizará la conexión en estrella por tener un valor de tensión de línea $V_L = 400$ V.

1.6.5 Instrumento de medida disponible en el laboratorio

Para realizar las mediciones de las variables de interés en diferentes puntos de funcionamiento, en el laboratorio de la universidad se dispone de un vatímetro digital Metrix PX 120 monofásico capaz de medir potencias trifásicas, con la opción T3FE (trifásico con 3 cables equilibrados). En la pantalla digital se muestran las medidas de tensión, corriente, potencia activa. Mediante la opción de *Display*, se pueden visualizar los valores de potencia reactiva, aparente y factor de potencia.

Cabe señalar que las medidas de tensión y corriente que proporciona el vatímetro corresponden a valores de línea.

A continuación, se muestra el esquema de conexión de medidas trifásicas:

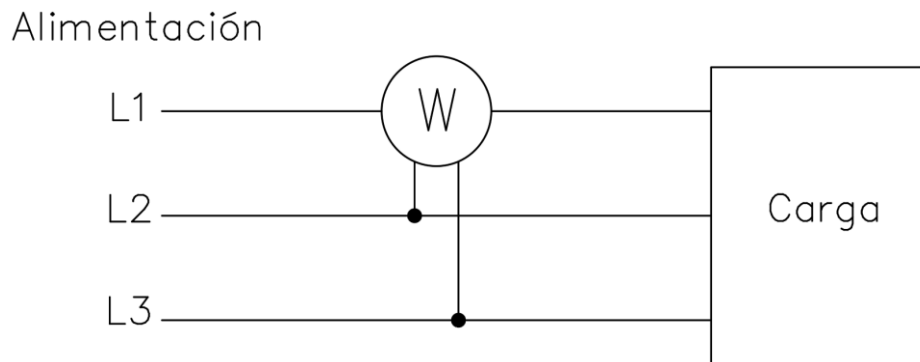


Figura 17. Esquema de conexión del vatímetro Metrix PX 120 para medidas trifásicas

1.7 Análisis de soluciones

1.7.1 Motores de pequeña potencia

En el presente apartado se analizarán los diferentes resultados obtenidos de las distintas técnicas de estimación de parámetros, la determinación de las pérdidas magnéticas y mecánicas, además de un estudio del rendimiento por medio de diferentes métodos para los motores de pequeña potencia.

1.7.1.1 Estimación de parámetros

En este apartado se analizarán las dos técnicas empleadas en este TFG para la estimación de parámetros del circuito equivalente de la MdI, las cuales son: en función de los ensayos de vacío y cortocircuito y mediante los datos del catálogo del fabricante.

Cabe destacar que en ambos casos se utilizará el circuito equivalente de 6 parámetros de la MdI, con la diferencia de que, en el caso de la estimación mediante catálogo, no se tiene en cuenta la resistencia del circuito magnético, en otras palabras, $R_{fe} = \infty$.

1.7.1.1.1 Mediante ensayos experimentales

Esta estimación consiste en determinar los parámetros del circuito equivalente de 6 parámetros del motor de inducción a partir de los ensayos de vacío y cortocircuito, siguiendo el procedimiento descrito en el libro de “Máquinas eléctricas” de Jesús Fraile Mora [1].

En la siguiente tabla se presentan los parámetros obtenidos:

Motor	R_1 (Ω)	R_{fe} (Ω)	X_m (Ω)	R'_2 (Ω)	X_{d1} (Ω)	X'_{d2} (Ω)
4 kW	1,8	303	52,3	1,12	2,52	2,524
1,5 kW	6,0	367	94,8	4,06	0,54	0,535

Tabla 6. Parámetros del circuito equivalente a partir de ensayos experimentales

El procedimiento seguido para la obtención de parámetros de los motores de 4 y 1,5 kW se encuentra detallado en los apartados de anexos 2.1.1.1 y 2.1.1.2 respectivamente.

1.7.1.1.2 Mediante catálogo

En este apartado, se utilizará la técnica de estimación de parámetros mediante catálogo [3], en la que se distinguen 4 casos. Para determinar cuál de ellos es el más preciso, en otras palabras, el que más se aproxima a los valores que proporciona el fabricante, se ha representado gráficamente la característica mecánica de par. A partir de la *Figura 18* y *Figura 19* se pueden encontrar los puntos característicos, es decir, el par de arranque, máximo y nominal para finalmente comparar analíticamente los errores que se producen en estos puntos y así poder determinar cuál es el caso más preciso en ambos motores.

1.7.1.1.3 Análisis comparativo

A continuación, se muestran los puntos mencionados para los dos motores:

	Fabricante	Ensayos	Catálogo			
			A	B	C	D
T_0 (N·m)	71,6	33,5	65,6	45,4	31,7	63,4
T_M (N·m)	79,5	71,1	81,8	68,2	57,8	95,4
T_N (N·m)	26,5	31,3	22,6	22,4	22,2	24,2

Tabla 7. Puntos característicos del par a partir de los parámetros de ensayos y mediante catálogo del motor de 4 kW

	Fabricante	Ensayos	Catálogo			
			A	B	C	D
T_0 (N·m)	24,2	23,9	22,6	17,9	13,8	29,7
T_M (N·m)	26,3	31,1	25,7	22,6	19,9	35,7
T_N (N·m)	10,1	11,4	8,2	8,1	8,1	9,0

Tabla 8. Puntos característicos del par a partir de los parámetros de ensayos y mediante catálogo del motor de 1,5 kW

Para medir el error de par que se comente utilizando los diferentes casos respecto a los puntos de par característicos del fabricante, se ha decidido usar el error relativo. El par de referencia en cada punto de funcionamiento corresponde al del fabricante:

$$\varepsilon_0 = \frac{|T_0 - T_{ref}|}{T_{ref}} \cdot 100 [\%] \quad (22)$$

$$\varepsilon_M = \frac{|T_M - T_{ref}|}{T_{ref}} \cdot 100 [\%] \quad (23)$$

$$\varepsilon_N = \frac{|T_N - T_{ref}|}{T_{ref}} \cdot 100 [\%] \quad (24)$$

Como el ensayo en carga se realiza con el motor funcionando en régimen permanente (zona de funcionamiento estable, entre el punto nominal y el de sincronismo), para determinar el error total se ha considerado que tiene más peso el que se produce en el punto de funcionamiento nominal. Atendiendo a estos criterios, la ponderación utilizada es la siguiente:

$$\varepsilon_T = 0,1 \cdot \varepsilon_0 + 0,3 \cdot \varepsilon_M + 0,6 \cdot \varepsilon_N [\%] \quad (25)$$

En la siguiente tabla se pueden ver los errores relativos que se cometen en cada punto característico de par:

Error	Ensayos	Catálogo			
		A	B	C	D
ε_0 (%)	53,16	8,37	36,60	55,71	11,33
ε_M (%)	10,52	2,93	14,23	27,36	20,06
ε_N (%)	17,97	14,90	15,41	16,13	8,73
ε_r (%)	19,25	10,65	17,18	23,46	12,39

Tabla 9. Errores en cada punto característico del par del motor de 4 kW

Error	Ensayos	Catálogo			
		A	B	C	D
ε_0 (%)	1,31	6,82	26,30	42,99	22,64
ε_M (%)	18,46	2,08	13,79	24,12	36,05
ε_N (%)	12,72	19,27	19,68	20,25	11,20
ε_r (%)	13,30	12,87	18,57	23,68	19,80

Tabla 10. Errores en cada punto característico del par del motor de 1,5 kW

Si se observan las tablas anteriores, se puede ver que el caso A es el que comete un error más reducido en ambos motores, con un error relativo de 10,65 % en el motor de 4 kW y de 12,87 % respecto al de 1,5 kW.

En las gráficas se corrobora que el caso A es el más preciso, ya que, como se puede observar en la *Figura 18* y *Figura 19*, la curva roja que representa el caso A es la que más se aproxima a los puntos característicos de par del fabricante.

Por tanto, para la determinación de pérdidas y rendimiento de los motores, se utilizarán los parámetros del caso A.

A continuación, se muestran las características mecánicas de cada caso para ambos motores, incluyendo la de los ensayos:

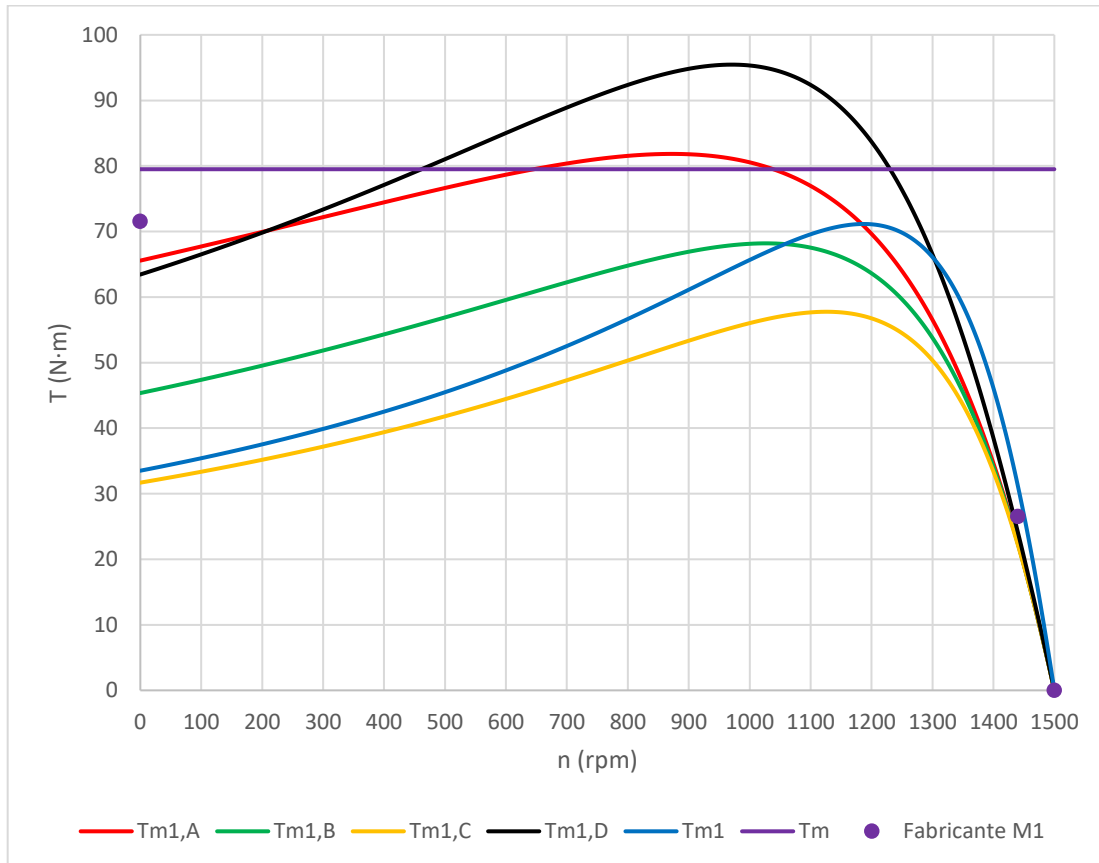


Figura 18. Comparativa de las características mecánicas obtenidas mediante catálogo del motor de 4 kW

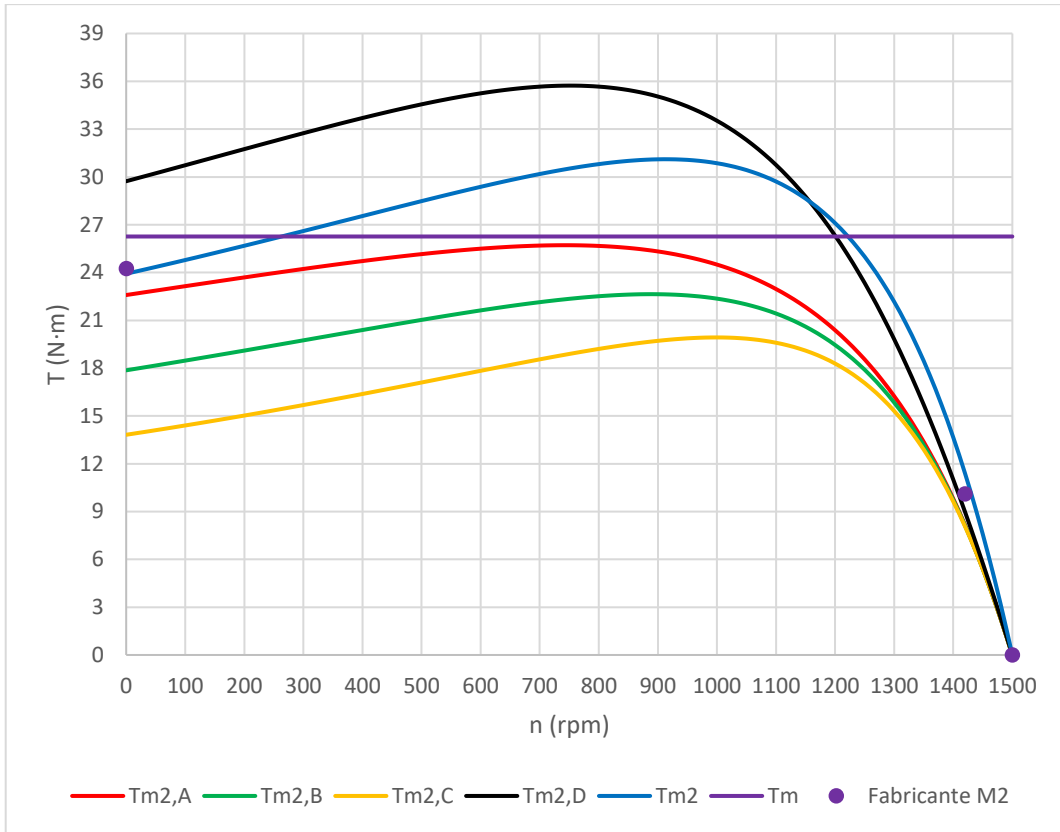


Figura 19. Comparativa de las características mecánicas obtenidas mediante catálogo del motor de 1,5 kW

1.7.1.2 Pérdidas magnéticas y mecánicas

Tal y como se comenta en el diseño del ensayo de vacío, el experimento sólo puede llevarse a cabo hasta un valor determinado de V_1 , por debajo del cual el motor se detiene, puesto que no genera un par suficiente para mantener la rotación del eje. Como se necesita saber cuál es el valor de $P_{fe} + P_{fw}$ cuando $V_1 = 0$ V, el cual coincide con el valor de P_{fw} , se han realizado diferentes extrapolaciones a partir de líneas de tendencia polinómicas con el objetivo de determinar cuál de ellas representa la gráfica de manera más precisa. Las aproximaciones son las siguientes:

- Polinómica de segundo grado:

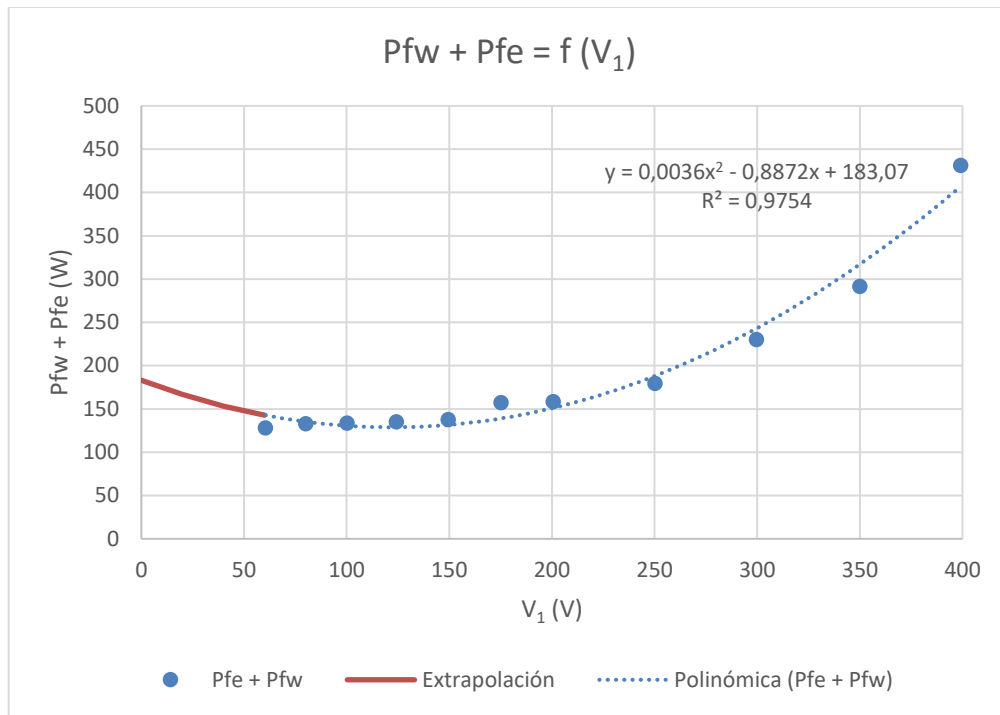


Figura 20. Línea de tendencia polinómica de segundo grado ensayo vacío motor de 4 kW

- Polinómica de tercer grado:

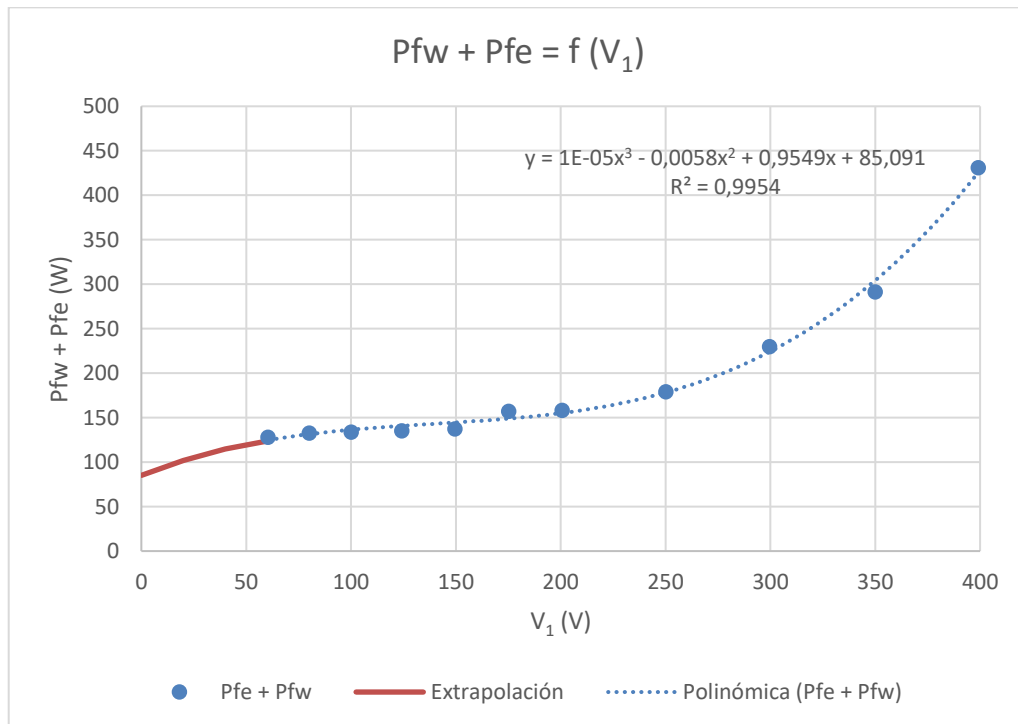


Figura 21. Línea de tendencia polinómica de tercer grado ensayo vacío motor de 4 kW

- Polinómica de cuarto grado:

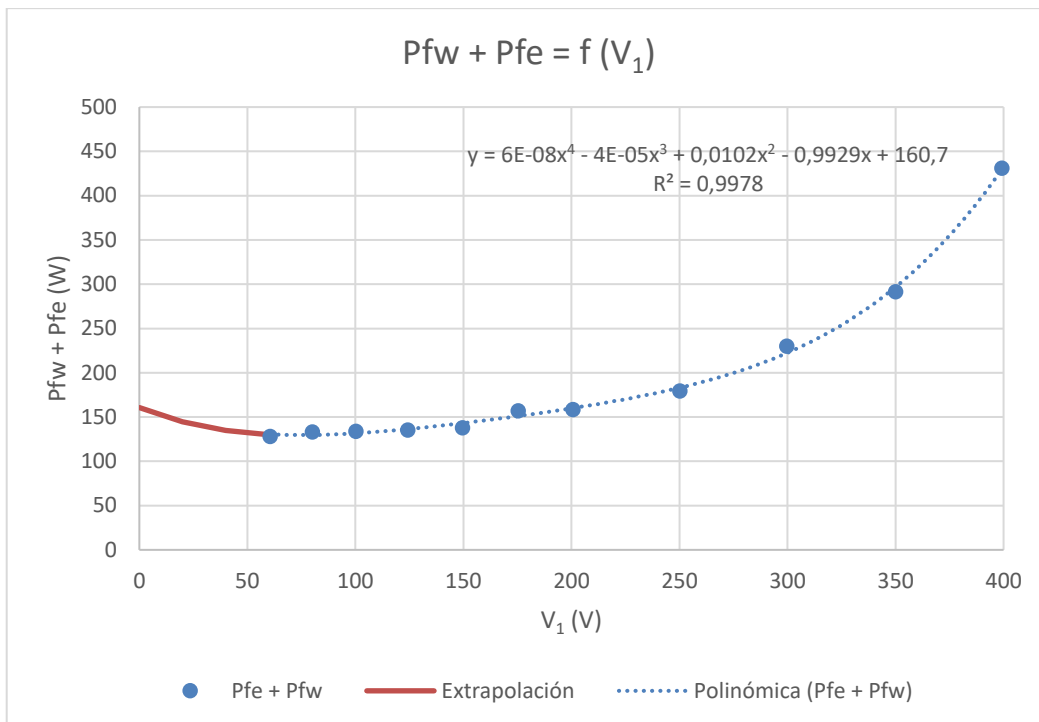


Figura 22. Línea de tendencia polinómica de cuarto grado ensayo vacío motor de 4 kW

- Polinómica de quinto grado:

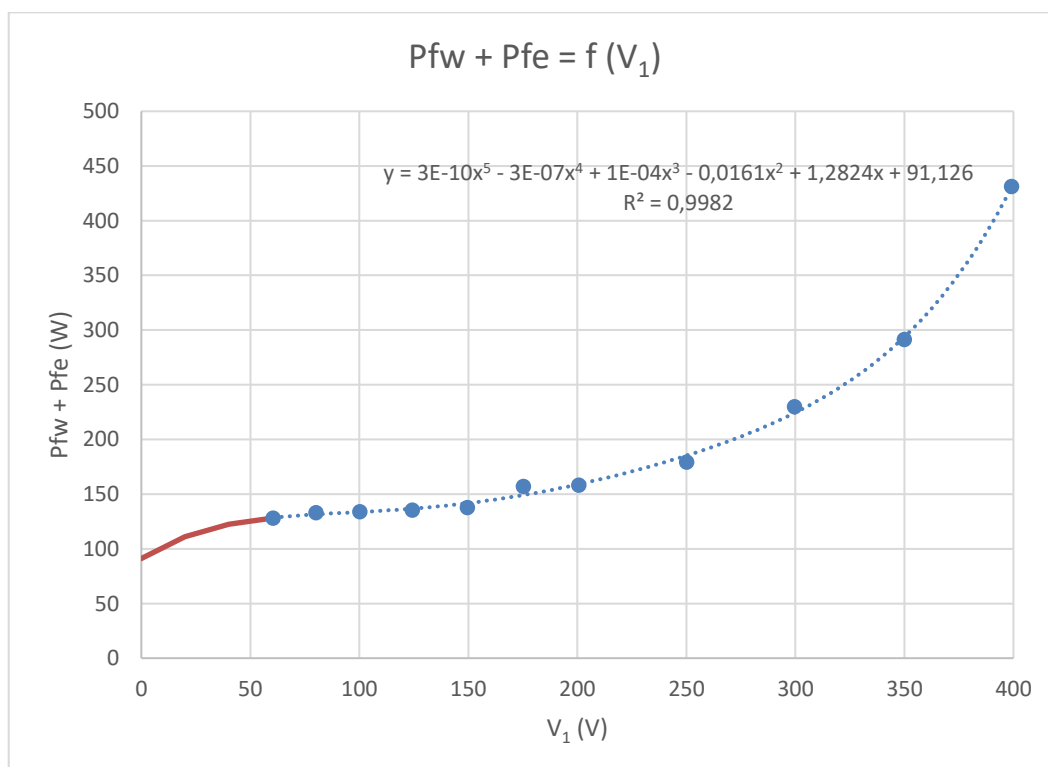


Figura 23. Línea de tendencia polinómica de quinto grado ensayo vacío motor de 4 kW

Como se puede observar, ninguna de las extrapolaciones se aproxima a la forma teórica, representada en la *Figura 36*. Consecuentemente, se ha decidido escoger el último valor del ensayo correspondiente a la tensión mínima (60,5 V) como el que interseca con el eje de

ordenadas. Por tanto, la extrapolación de las pérdidas para valores inferiores de tensión correspondería a un valor constante, equivalente a las pérdidas mecánicas. En el caso del motor de 4 kW, $P_{fw} = 127,96$ W.

En la siguiente figura se puede ver la representación gráfica de la explicación anterior:

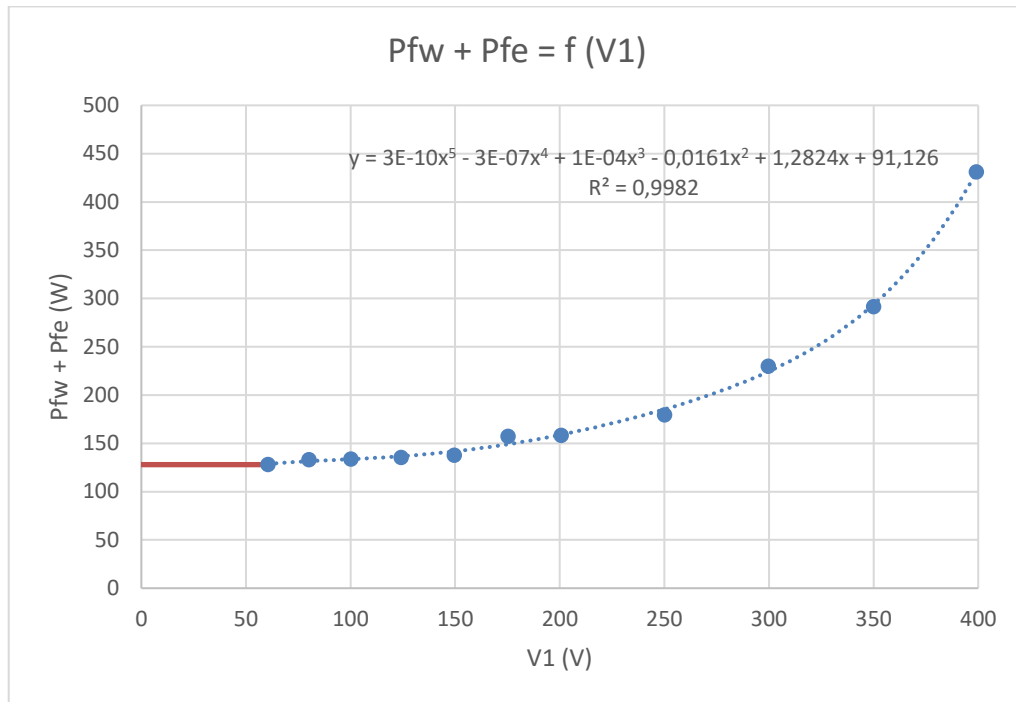


Figura 24. Pérdidas mecánicas y magnéticas en función de V_1 del motor de 4 kW

De la misma forma, para el motor de 1,5 kW se selecciona el punto de funcionamiento ensayado a menor tensión (65,1 V) como valor de pérdidas mecánicas, con un valor de $P_{fw} = 113,37$ W.

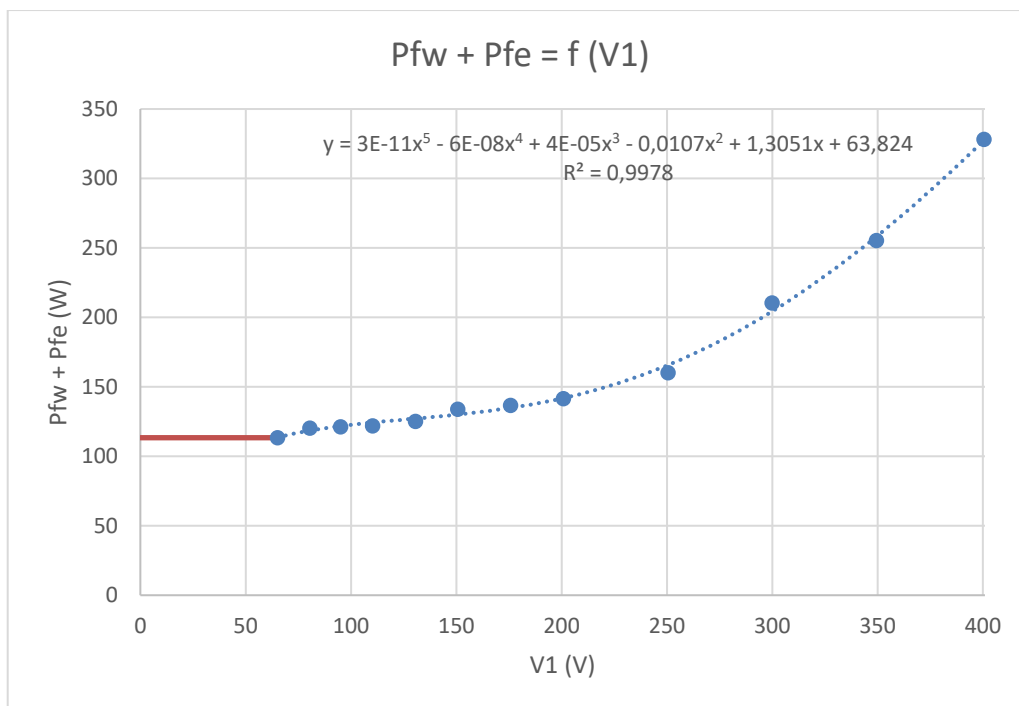


Figura 25. Pérdidas mecánicas y magnéticas en función de V_1 del motor de 1,5 kW

Cabe señalar que, a pesar de que la estimación mediante catálogo no considera la resistencia magnética, se han tomado los mismos valores de las pérdidas magnéticas y mecánicas determinadas en el ensayo de vacío de los dos motores para el posterior cálculo del rendimiento.

1.7.1.3 Análisis del rendimiento

En este apartado se van a analizar los rendimientos obtenidos por tres métodos diferentes:

- A partir de los puntos ensayados experimentalmente en el laboratorio.
- Cálculo del rendimiento analítico mediante los parámetros, pérdidas magnéticas y mecánicas previamente adquiridas en los ensayos de vacío y cortocircuito.
- En base a la estimación de parámetros mediante catálogo del caso seleccionado en el apartado 1.7.1.1.2.

Los objetivos de este estudio son, por una parte, validar matemáticamente los modelos del circuito equivalente, tanto el obtenido a partir de los ensayos, como el de catálogo y, por otra parte, comprobar analíticamente si es necesario realizar el ensayo en carga en el laboratorio para determinar el rendimiento, conociendo los parámetros del circuito equivalente y las pérdidas mecánicas y magnéticas previamente adquiridas en los ensayos de vacío y cortocircuito.

Para poder examinar la precisión de los métodos analíticos, se ha hecho coincidir los valores de potencia útil del estudio teórico con los adquiridos experimentalmente, variando el valor de la velocidad. De esta forma, se puede determinar el error que se comete en los cálculos analíticos y comprobar si es necesario realizar el ensayo en carga, conociendo previamente los datos mencionados en el párrafo anterior.

Para la determinación del error producido por los dos métodos analíticos, se ha empleado el error cuadrático medio por la razón de que es ideal para medir la diferencia media entre los valores de un modelo y los reales. Un error de 0 indicaría que el modelo es completamente exacto.

El error cuadrático medio se determina utilizando la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\eta_{teórico,n} - \eta_{ensayo})^2} \quad (26)$$

- Donde:
- $\varepsilon_{\eta} \equiv$ error cuadrático medio del rendimiento
 - $n \equiv$ número de puntos de funcionamiento estudiados
 - $\eta_{teórico} \equiv$ rendimiento teórico de cada punto
 - $\eta_{ensayo} \equiv$ rendimiento ensayado de cada punto

1.7.1.3.1 Rendimiento del motor de 4 kW

A continuación, se muestran las curvas de rendimiento de los diferentes procedimientos empleados en el motor de 4 kW:

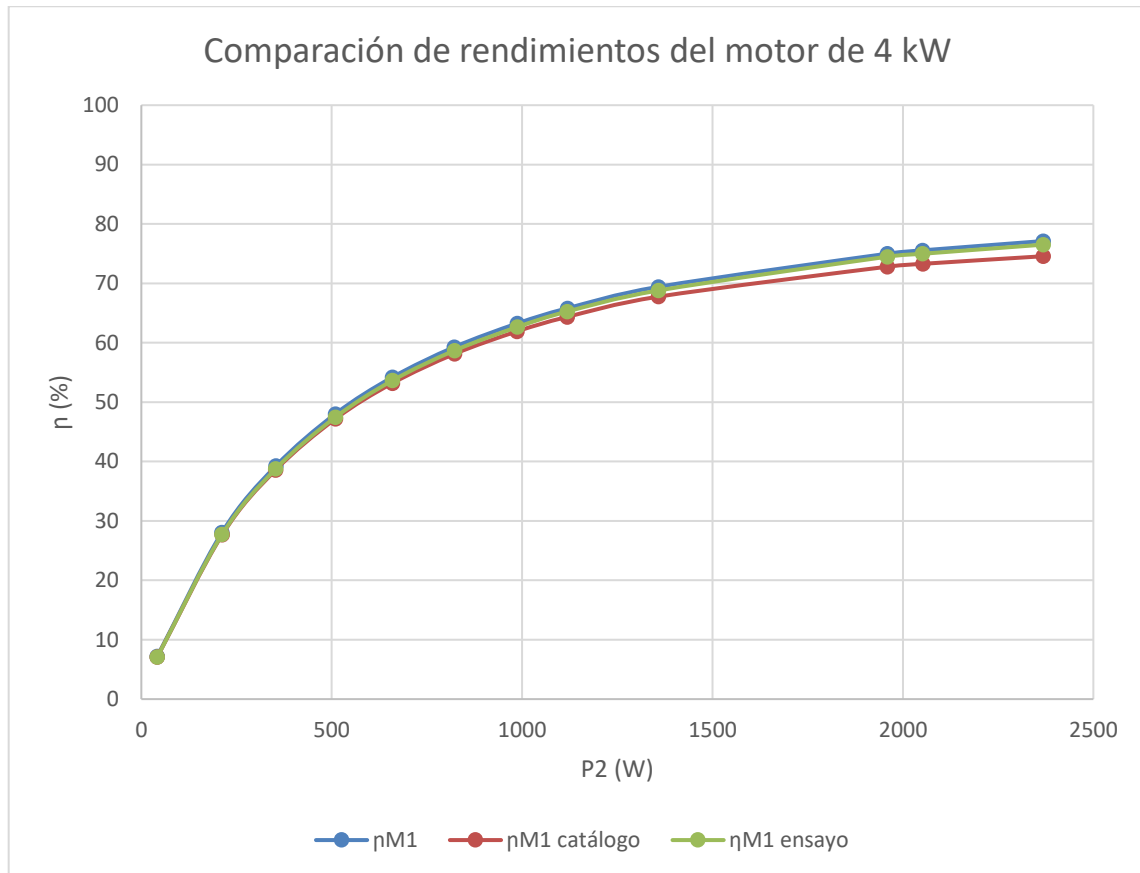


Figura 26. Gráfica de comparación para los errores cometidos en el rendimiento motor de 4 kW

Donde: η_{M1} \equiv rendimiento analítico del motor de 4 kW
 η_{M1} catálogo \equiv rendimiento mediante catálogo del motor de 4 kW
 η_{M1} ensayo \equiv rendimiento del ensayo experimental del motor de 4 kW

Ídem para M2.

Ver el apartado 2.1.4.1 de anexos para ver los resultados del rendimiento en cada punto de funcionamiento de los diferentes métodos utilizados.

1.7.1.3.2 Rendimiento del motor de 1,5 kW

En la siguiente figura se pueden ver las diferentes representaciones gráficas del rendimiento de los diferentes métodos utilizados en el motor de 1,5 kW:

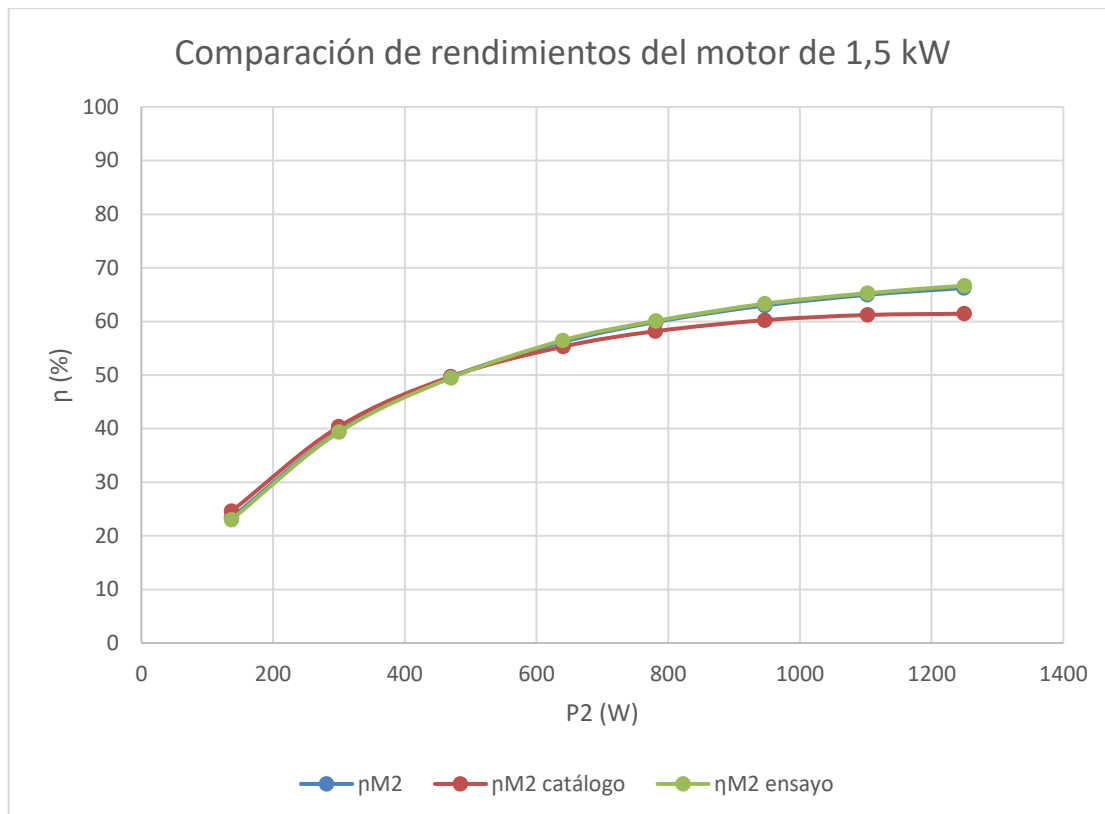


Figura 27. Gráfica de comparación para los errores cometidos en el rendimiento motor de 1,5 kW

Ver el apartado 2.1.4.2 de anexos para ver los resultados del rendimiento en cada punto de funcionamiento de los diferentes métodos utilizados.

Motor	Error catálogo	Error analítico
4 kW	1,02	0,52
1,5 kW	2,79	0,30

Tabla 11. Errores producidos en el rendimiento en función del método utilizado

Como se puede observar en la tabla anterior, el error producido en el rendimiento analítico es inferior, esto es debido a que el estudio analítico emplea los mismos parámetros obtenidos en los ensayos.

Por otro lado, puesto que los errores cometidos en el rendimiento mediante catálogo son mínimos, se demuestra que esta técnica de estimación es bastante fiable y que, una vez realizados los ensayos de vacío y cortocircuito, las curvas de rendimiento se pueden aproximar con bastante precisión sin necesidad de llevar a cabo el ensayo en carga.

1.7.1.3.3 Comparación de rendimientos

A continuación, se muestra la comparación de las curvas de rendimiento de los dos motores obtenidas a partir del ensayo en carga:

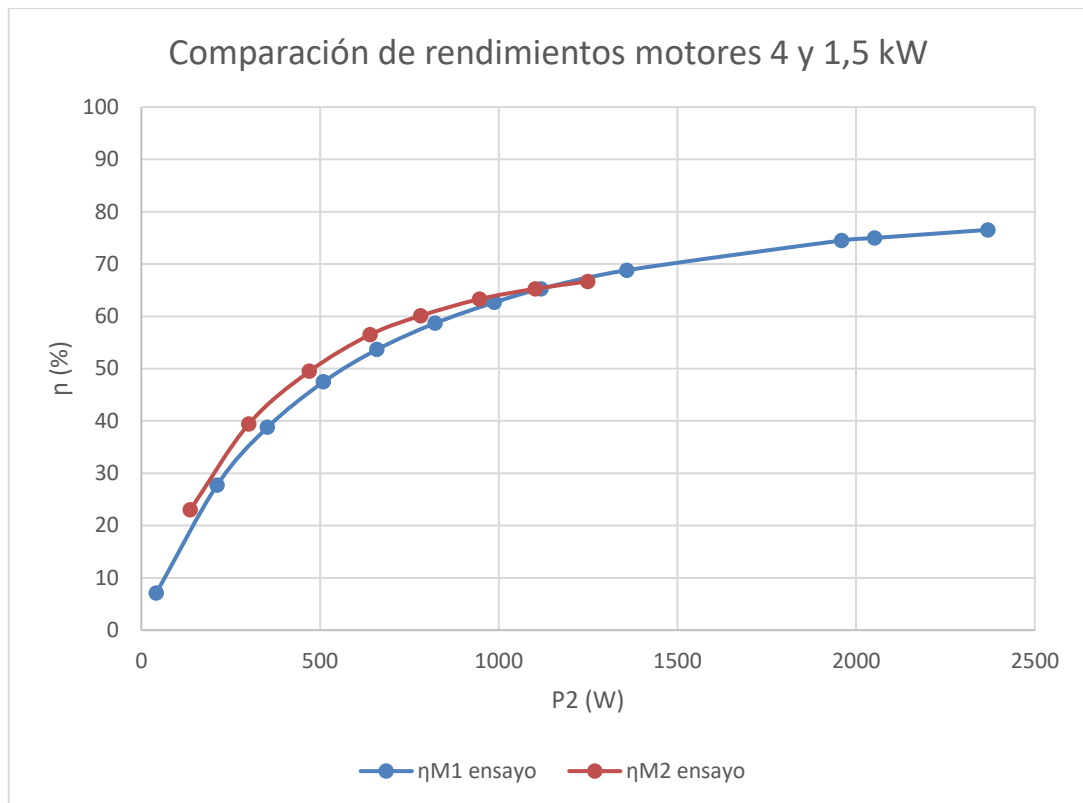


Figura 28. Comparación del rendimiento entre los motores de 4 y 1,5 kW

Tal y como se puede ver en la figura anterior, la diferencia de rendimiento entre los dos motores es mínima para cualquier valor de carga seleccionada. Por esta razón, se puede afirmar que, en este caso, no tiene sentido acoplar el motor secundario, ya que el motor principal puede desarrollar prácticamente el mismo rendimiento arrastrando el mismo valor de carga. Además, se tardaría una gran cantidad de tiempo amortizar el impacto económico que supondría incorporar el motor de 1,5 kW.

1.7.2 Motores de media potencia

Para realizar el estudio del rendimiento de dos motores acoplados en el mismo eje, lo ideal sería que la potencia del motor principal sea unas 4-5 veces superior a la del secundario. Sin embargo, las limitaciones en el laboratorio han impedido que la diferencia de potencia entre los motores fuese la deseada, por lo que se han analizado los rendimientos de tres motores de mayor potencia del mismo fabricante (Siemens) para comprobar la diferencia de eficiencia cuando el motor trabaja en un punto de funcionamiento muy inferior a su potencia asignada.

1.7.2.1 Justificación de los motores seleccionados

En este apartado se explica el criterio que se ha seguido para seleccionar los motores de media potencia a analizar.

En vista de los resultados obtenidos en los ensayos de los motores de 1,5 y 4 kW, se ha decidido estudiar motores de la misma familia, es decir, de 1500 rpm, 4 polos y 50 Hz, pero de más potencia para ver si en este caso el acoplamiento del segundo motor saldría rentable.

Como motor principal, se ha decidido escoger el motor de mayor potencia disponible en el catálogo, de 45 kW, el cual si se compara con el que se han realizado los ensayos (4 kW), presenta aproximadamente un incremento del 10 % de rendimiento en condiciones nominales.

Para la selección del motor secundario, se ha decidido estudiar dos motores cuyas potencias nominales sean aproximadamente 4-5 veces inferior al principal. Por tanto, se seleccionan el de 11 y 7,5 kW.

El catálogo que cuenta con todas las características de los motores se encuentra en el apartado 2.3.

1.7.2.2 Estimación de parámetros mediante catálogo

De la misma forma que en los motores de pequeña potencia, se registran los puntos característicos de par de los tres motores estudiados:

	Fabricante	A	B	C	D
T₀ (N·m)	818	557	286	170	311
T_M (N·m)	964	1163	865	685	1004
T_N (N·m)	292	268	266	262	276

Tabla 12. Puntos característicos del par a partir de los parámetros de ensayos y mediante catálogo del motor de 45 kW

	Fabricante	A	B	C	D
T₀ (N·m)	158	179	104	65,7	124
T_M (N·m)	194	275	215	175	269
T_N (N·m)	72	64,4	63,9	63,3	67,3

Tabla 13. Puntos característicos del par a partir de los parámetros de ensayos y mediante catálogo del motor de 11 kW

	Fabricante	A	B	C	D
T₀ (N·m)	127	133	83,4	54,8	106
T_M (N·m)	150	184	148	122	193
T_N (N·m)	47	43,5	43,3	42,9	45,8

Tabla 14. Puntos característicos del par a partir de los parámetros de ensayos y mediante catálogo del motor de 7,5 kW

Empleando las expresiones (22), (23) y (24), se pueden obtener los errores relativos de cada punto y siguiendo el mismo criterio de ponderación (25), se calcula el error relativo total:

Error	A	B	C	D
ε₀ (%)	31,86	64,98	79,17	61,94
ε_M (%)	20,67	10,29	28,88	4,16
ε_N (%)	8,20	9,02	10,16	5,45
ε_r (%)	14,30	15,00	22,67	10,71

Tabla 15. Errores en cada punto característico del par del motor de 45 kW

Error	A	B	C	D
ϵ_0 (%)	12,96	34,23	58,51	21,83
ϵ_M (%)	41,68	10,63	9,90	38,33
ϵ_N (%)	10,57	11,18	12,03	6,51
ϵ_r (%)	20,14	13,32	16,04	17,59

Tabla 16. Errores en cada punto característico del par del motor de 11 kW

Error	A	B	C	D
ϵ_0 (%)	4,94	34,26	56,84	16,82
ϵ_M (%)	22,48	1,71	18,67	28,54
ϵ_N (%)	7,41	7,95	8,69	2,48
ϵ_r (%)	11,68	8,71	16,50	11,73

Tabla 17. Errores en cada punto característico del par del motor de 7,5 kW

A diferencia de los motores de pequeña potencia, en los cuales el caso en el que se cometía un error más reducido coincidía en ambos en el A, en los de media potencia no sucede de la misma forma. Para el motor principal de 45 kW, el caso D es el más preciso, mientras que en los secundarios de 11 y 7,5 coincide el B.

Este estudio demuestra que, para elegir un conjunto de parámetros para el posterior cálculo del rendimiento, se debe analizar cada motor por separado, ya que el caso en el que se produce un menor error puede variar en cada motor.

A continuación, se pueden ver las diferentes características mecánicas de cada caso comparadas con los puntos del fabricante para los tres motores:

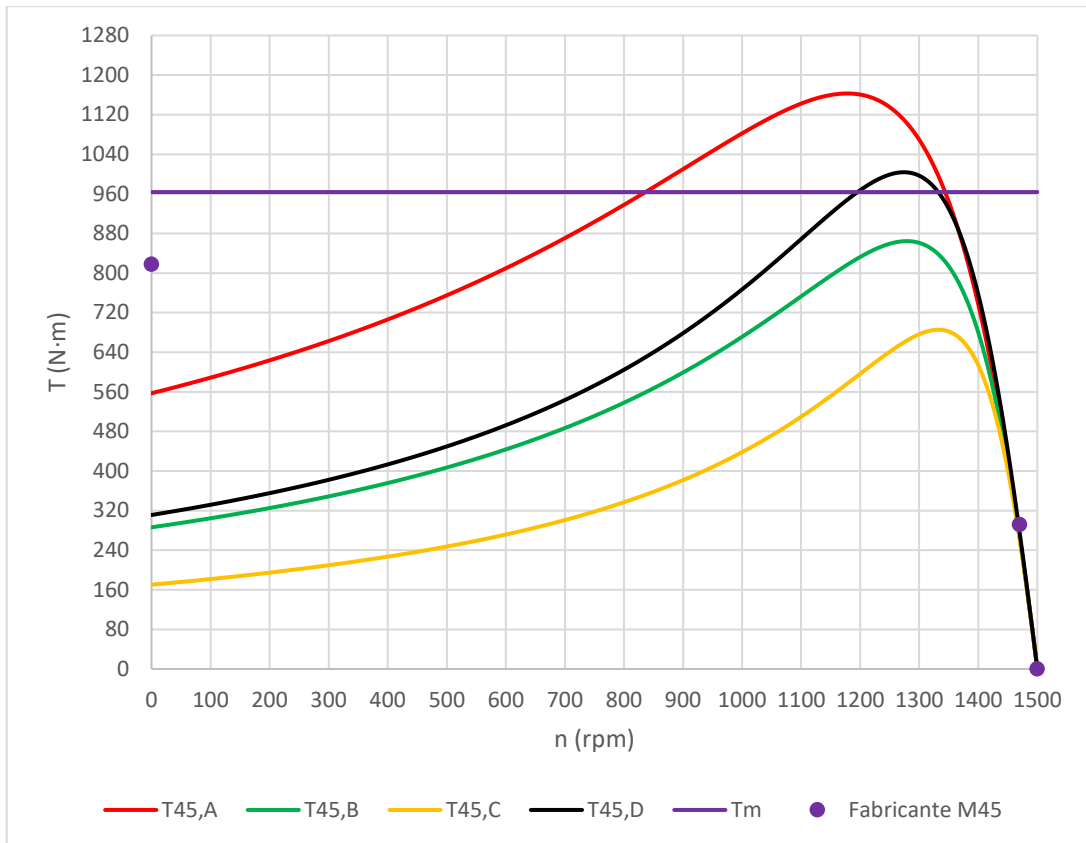


Figura 29. Comparativa de las características mecánicas obtenidas mediante catálogo del motor de 45 kW

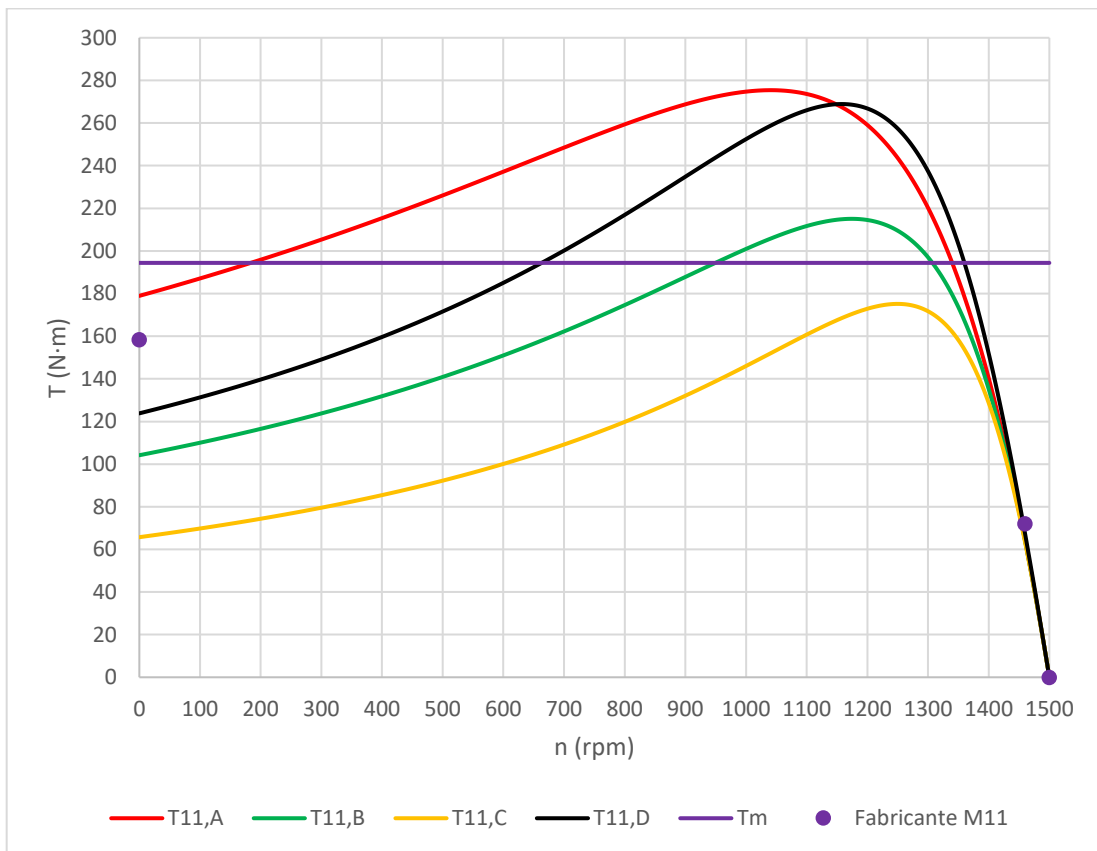


Figura 30. Comparativa de las características mecánicas obtenidas mediante catálogo del motor de 11 kW

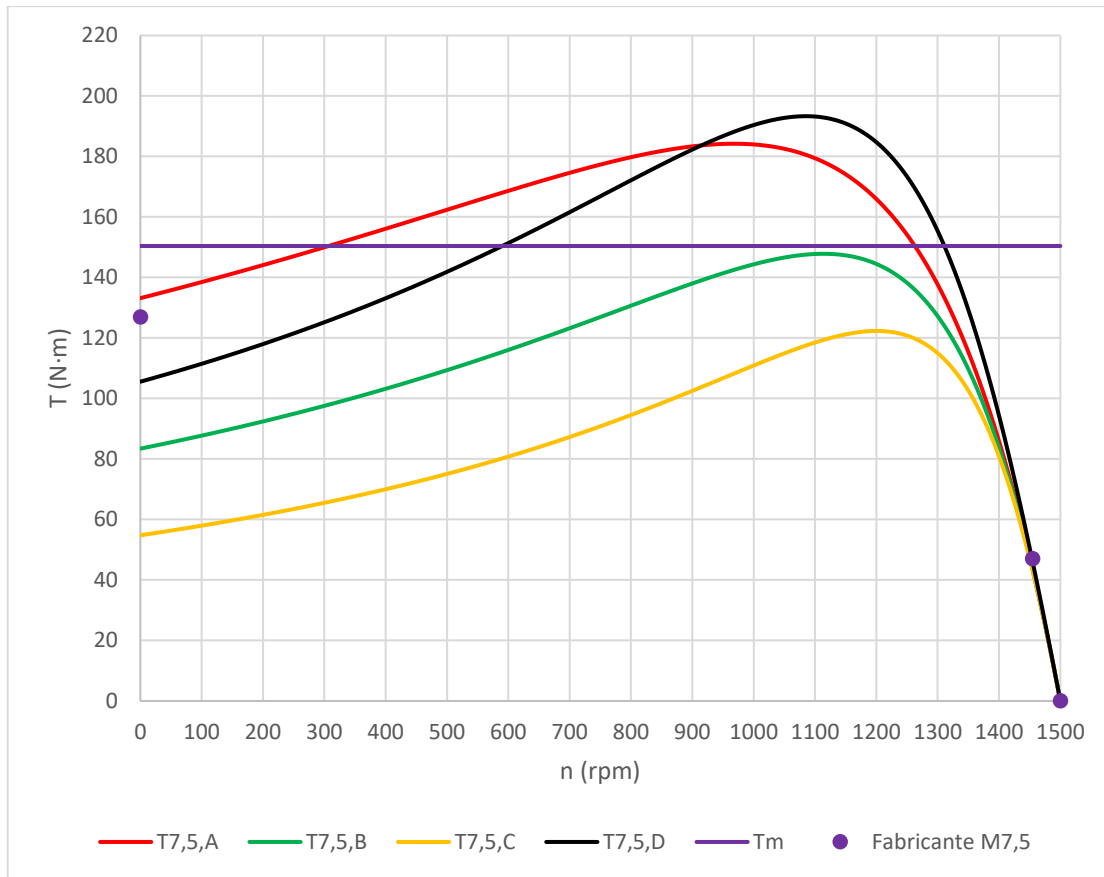


Figura 31. Comparativa de las características mecánicas obtenidas mediante catálogo del motor de 7,5 kW

1.7.2.3 Análisis del rendimiento

En este apartado se valorarán los rendimientos de los motores secundarios por separado, para conocer cuál de ellos sería el más adecuado para acoplarlo junto con el motor de 45 kW. Asimismo, se compararán las curvas de rendimiento del motor principal de 45 kW junto con los secundarios de 11 y 7,5 kW para determinar si se obtendría un ahorro energético significativo instalando algunos de ellos en el mismo eje del motor de 45 kW.

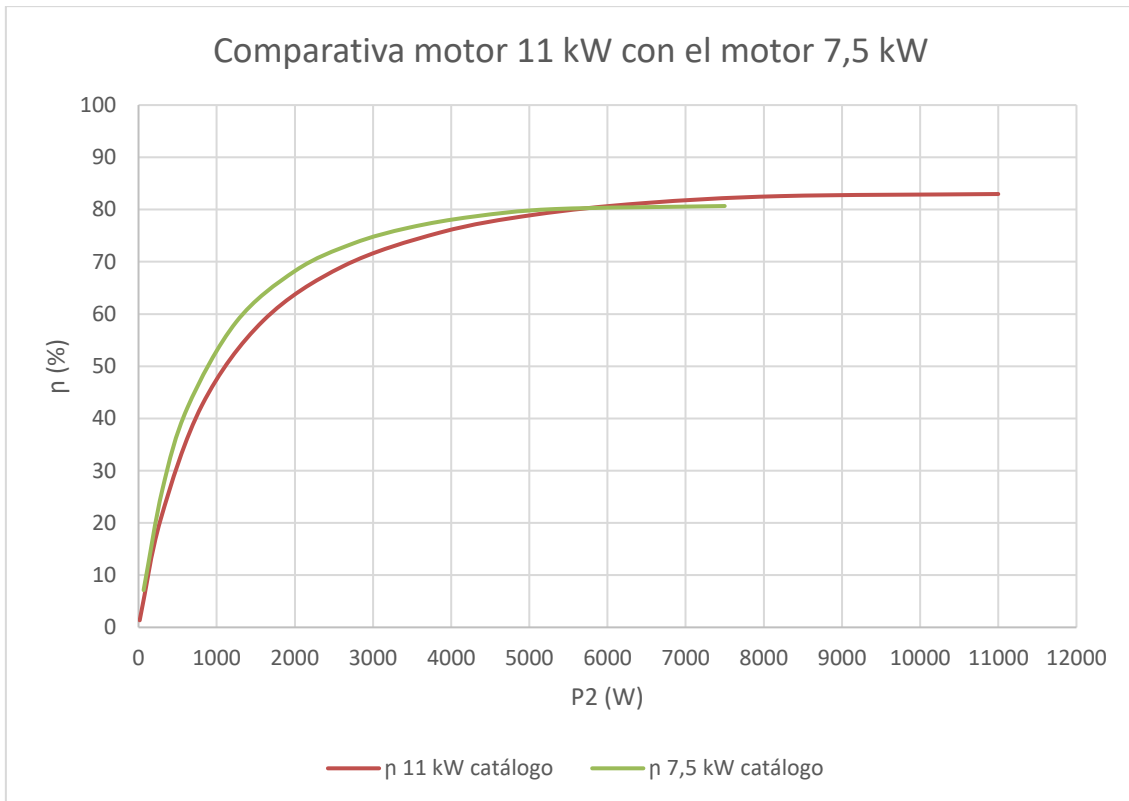


Figura 32. Gráfica comparativa entre los rendimientos de los motores de 11 y 7,5 kW

Como se puede apreciar en la figura anterior, la curva de rendimiento de ambos motores es muy similar, por lo que, la elección entre utilizar uno u otro depende del valor de la potencia de los periodos de baja demanda y la diferencia de precio entre ambos.

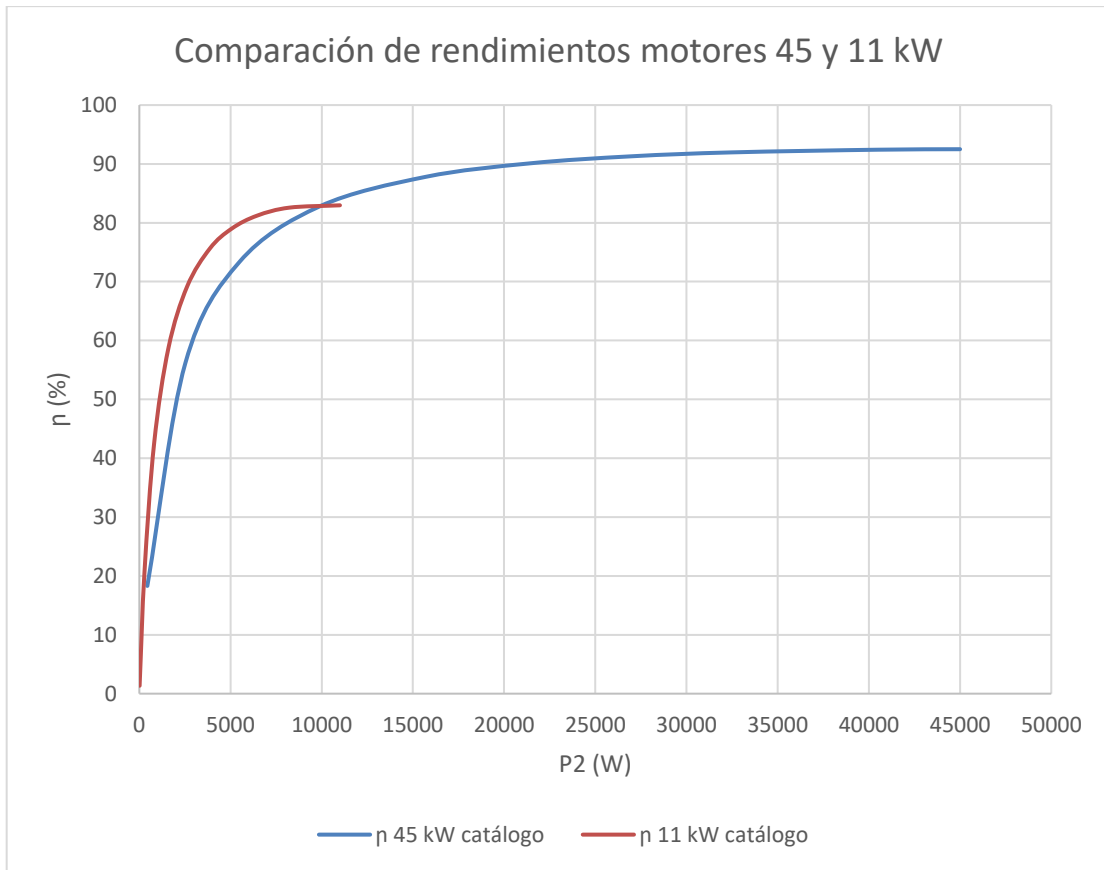


Figura 33. Gráfica comparativa entre los rendimientos de los motores de 45 y 11 kW

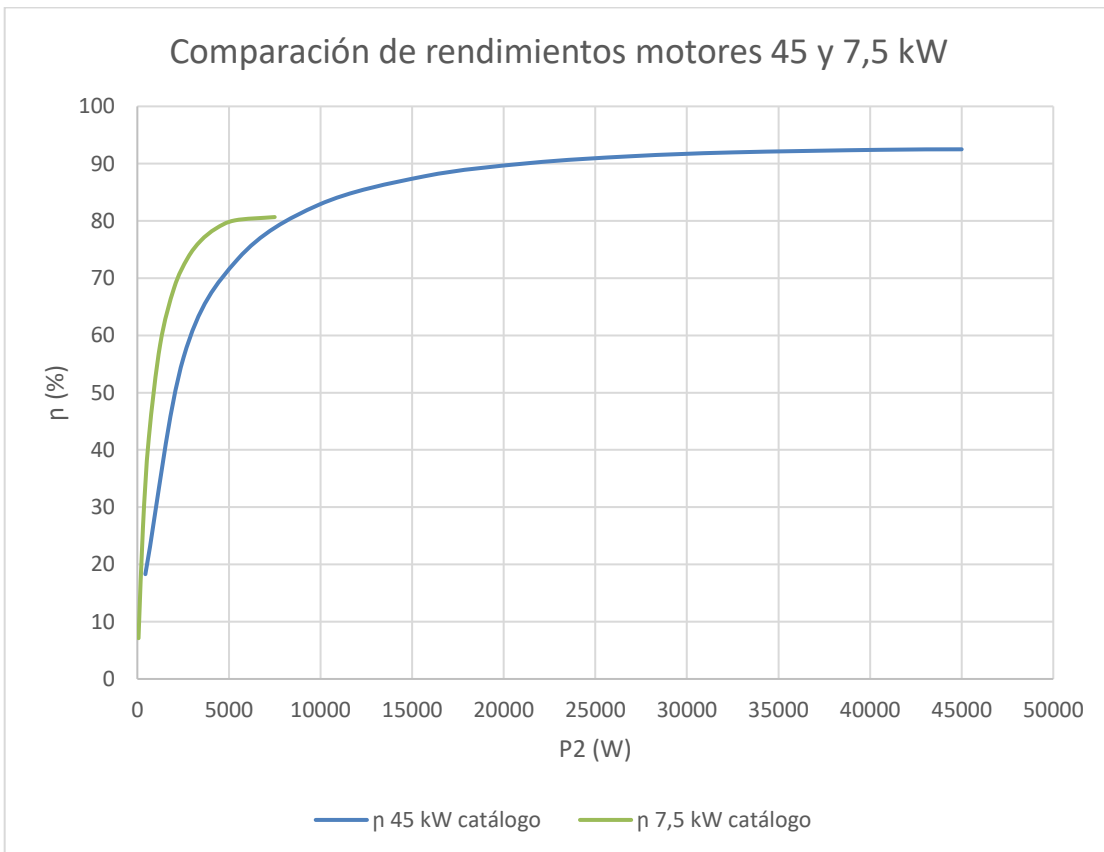


Figura 34. Gráfica comparativa entre los rendimientos de los motores de 45 y 7,5 kW

Se ha realizado una tabla comparativa, donde se analizan la potencia absorbida, el sumatorio de pérdidas y el rendimiento que desarrollan los diferentes motores para diferentes valores de carga mecánica, con la finalidad de determinar cualitativamente si sería provechoso el acoplamiento de los motores secundarios al principal de 45 kW:

P2 (kW)	P1 (kW)			Σ pérdidas (kW)			η (%)		
	45 kW	11 kW	7,5 kW	45 kW	11 kW	7,5 kW	45 kW	11 kW	7,5 kW
1	2,96	2,10	1,88	1,96	1,10	0,88	33,8	47,6	53,3
2	3,97	3,14	2,93	1,97	1,14	0,93	50,4	63,7	68,2
3	4,97	4,19	4,01	1,97	1,19	1,01	60,3	71,6	74,7
4	5,98	5,26	5,13	1,98	1,26	1,13	66,9	76,1	78,0
5	6,99	6,34	6,27	1,99	1,34	1,27	71,5	78,9	79,8
6	8,00	7,44	7,45	2,00	1,44	1,45	75,0	80,6	80,5
7	9,01	8,56	8,67	2,01	1,56	1,67	77,7	81,8	80,7
8	10,03	9,70	-	2,03	1,70	-	79,8	82,5	-
9	11,04	10,86	-	2,04	1,86	-	81,5	82,9	-
10	12,06	12,05	-	2,06	2,05	-	82,9	83,0	-
11	13,07	13,26	-	2,08	2,26	-	84,1	83,0	-

Tabla 18. Comparación de la potencia absorbida, pérdidas y rendimiento de los motores de media potencia

En la tabla anterior se puede observar que el motor principal de 45 kW absorbe una potencia y presenta unas pérdidas similares a los otros dos para cualquier valor de carga, lo que significa que no hay una gran diferencia en el consumo de energía entre el acoplamiento del segundo motor y el funcionamiento único del motor principal.

En definitiva, el rendimiento del motor de 45 kW empieza a decaer significativamente cuando trabaja a potencias inferiores al 10% de la asignada. Esto significa que el motor trabaja con una eficiencia elevada hasta que la carga es de un valor muy reducido y que, aunque al 50 % de la potencia nominal del motor de 7,5 kW la diferencia de rendimiento es de 11,1 % y se obtendría un ahorro energético, no es conveniente acoplar el segundo motor ya que este estaría desaprovechando su potencial funcionando lejos de su valor nominal, además del impacto económico que supondría el adquirir este segundo motor y la automatización para sincronizar el cambio de demandas de potencia.

1.8 Resultados finales

1.8.1 Motores de pequeña potencia

En el presente apartado se mostrarán los procedimientos seguidos y los resultados de los ensayos de vacío, cortocircuito y carga, para la obtención de los parámetros del circuito equivalente por los dos métodos mencionados en los apartados 1.7.1.1.1 y 1.7.1.1.2, así como la metodología para determinar la curva de rendimiento de los dos motores de pequeña potencia.

1.8.1.1 Estimación de parámetros mediante ensayos experimentales

En este apartado se detalla el procedimiento seguido para la obtención de los parámetros del circuito equivalente de la MdI. En el presente TFG, se han determinado de dos maneras diferentes; en primer lugar, a partir de los ensayos de vacío y cortocircuito realizados en el laboratorio y, en segundo lugar, en base a la técnica de estimación de parámetros mediante catálogo.

1.8.1.1.1 Medición de la resistencia del estator

El objetivo de este ensayo es poder conocer los valores de R_1 y R'_2 por separado, ya que, en caso contrario, únicamente se conocería R_{cc} del ensayo de cortocircuito.

Se utiliza un multímetro para medir los valores de resistencia de las tres fases del devanado del estator R_1 , por si se diera el caso en el que los devanados no fueran simétricos; entonces se consideraría el valor medio como el parámetro representativo

En las siguientes tablas se muestran los valores de resistencia medidos en cada fase del estator para los dos motores:

Motor	R_1 (Ω) Fase U	R_1 (Ω) Fase V	R_1 (Ω) Fase W
4 kW	1,8	1,8	1,8
1,5 kW	6	6	6

Tabla 19. Resistencia de las fases del devanado del estator del motor de 4 kW

1.8.1.1.2 Ensayo de vacío

Este ensayo consiste en hacer girar al motor sin carga, lo que determina una velocidad de giro del rotor muy cercana a la de sincronismo. De esta forma, la potencia que absorbe el motor P_0 es el conjunto de pérdidas en el circuito magnético, pérdidas mecánicas y pérdidas en los devanados del estator:

$$P_0 = P_{fe} + P_{fw} + P_{cu,1} \quad (27)$$

En la siguiente figura se muestra el esquema de montaje del ensayo de vacío, donde se puede ver una alimentación trifásica y un vatímetro digital como instrumento de medida para registrar las magnitudes necesarias, además de la conexión empleada en los bornes del motor (se debe tener especial cuidado en que el vatímetro indica la tensión de línea, por lo que para los valores de fase se debe dividir la lectura de tensión entre $\sqrt{3}$):

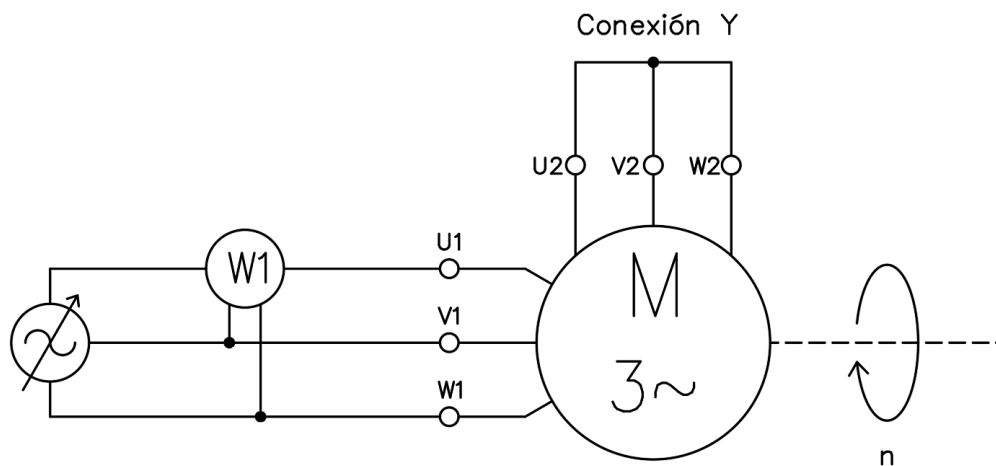


Figura 35. Esquema del ensayo de vacío

Para realizar este ensayo se debe alimentar el motor con una fuente de tensión alterna trifásica variable. Se regula únicamente el valor eficaz de la tensión, tomando como referencia el valor de la tensión de alimentación, empezando desde el valor nominal V_{IN} y disminuyendo hasta que el motor se pare por quedarse sin par suficiente para mover el eje.

Se requiere del vatímetro digital para las medidas de tensión V_{IL} , corriente I_0 y potencia absorbida P_0 de cada punto del experimento considerado.

Una vez finalizado el ensayo de vacío, se pueden determinar las pérdidas en el estátor en cada punto de funcionamiento de la manera siguiente:

$$P_{cu,1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \quad (28)$$

Donde I_0 es valor de corriente de fase (que a su vez es igual a la corriente de línea por la conexión de la MdI en estrella) del primer punto de funcionamiento del ensayo, en el cual el motor se alimenta a tensión nominal.

A partir de la ecuación (27), se puede expresar:

$$P_{fe} + P_{fw} = P_0 - P_{cu,1} \quad (29)$$

Para poder determinar el valor de P_{fe} y P_{fw} , se debe representar $P_{fe} + P_{fw}$ en función de V_1 ; surge como resultado una curva parabólica que se tiene que extrapolar hasta que interseque con el eje de ordenadas. Para $V_1 = 0$ se obtiene la magnitud de P_{fw} .

El valor de las pérdidas magnéticas será la diferencia entre el primer valor de $P_{fe} + P_{fw}$ del ensayo y el valor de P_{fw} . En la siguiente figura se puede ver la representación gráfica:

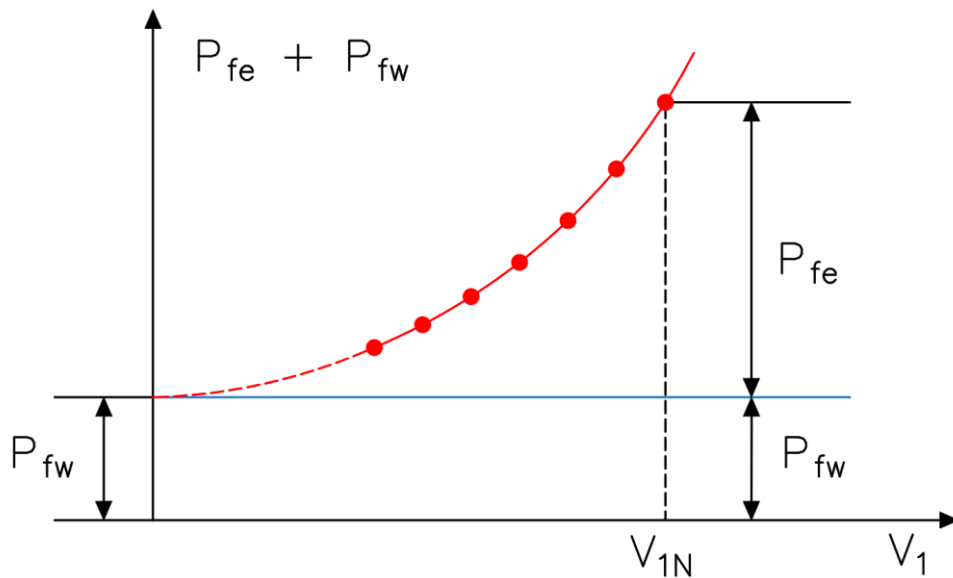


Figura 36. Gráfica de pérdidas mecánicas y magnéticas en función de V_1

En el apartado 1.7.1.2 se han mostrado las diferentes extrapolaciones mediante líneas de tendencia de distintos grados. Como resultado, ninguna de ellas representa de manera adecuada la forma teórica mostrada en la *Figura 36*.

Por tanto, para ambos motores se decide seleccionar el último valor de $P_{fe} + P_{fw}$ como el que corta con el eje de ordenadas, siendo este el valor de P_{fw} .

A continuación, se presenta una tabla donde se pueden ver los valores de las pérdidas magnéticas y mecánicas de los dos motores ensayados:

Motor	P_{fe} (W)	P_{fw} (W)
4 kW	303,14	127,96
1,5 kW	214,72	113,37

Tabla 20. Valores de pérdidas magnéticas y mecánicas de los dos motores ensayados

Después de haber cuantificado las pérdidas magnéticas a tensión nominal, se pueden calcular las corrientes de la rama en paralelo del circuito equivalente:

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad (30)$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin\varphi_0 \quad (31)$$

Es necesario mencionar que los valores de I_0 , $\cos\varphi_0$ y $\sin\varphi_0$ se refieren al primer punto ensayado, en el cual se alimenta el motor a tensión nominal.

A continuación, se calculan la resistencia y reactancia del circuito magnético con las siguientes expresiones:

$$R_{fe} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{3} I_{fe}} \quad (32)$$

$$X_m = \frac{V_{1N}}{\sqrt{3} I_m} \quad (33)$$

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los parámetros obtenidos en los ensayos de cortocircuito de ambos motores:

Motor	$\cos\varphi_0$	$\sin\varphi_0$	I_{fe} (A)	I_m (A)	R_{fe} (Ω)	X_m (Ω)
4 kW	0,17	0,985	0,76	4,41	303	52,3
1,5 kW	0,25	0,968	0,63	2,44	367	94,8

Tabla 21. Parámetros del ensayo de vacío

Los valores de las variables registradas en los ensayos de vacío del motor de 4 y 1,5 kW se facilitan en los apartados 2.1.1.1.1 y 2.1.1.2.1 respectivamente.

1.8.1.1.3 Ensayo de cortocircuito

En este ensayo se bloquea el rotor para evitar que este gire, siendo así $n = 0$, $s = 1$ y $R'_c = 0$. En esta condición la impedancia de la rama del rotor del circuito equivalente presenta su valor mínimo.

A continuación, se presenta el esquema de montaje del ensayo de cortocircuito, donde se bloquea el rotor para impedir del giro del eje mecánico, así como la conexión utilizada en la caja de bornes y el instrumento de medida:

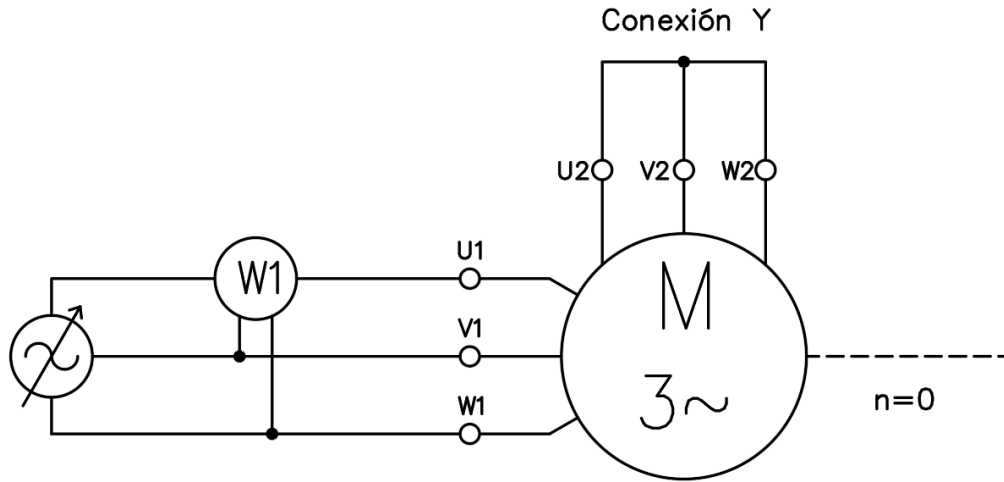


Figura 37. Esquema del ensayo de cortocircuito

Se alimenta el motor de inducción mediante una fuente de tensión trifásica regulada, que permite la variación del valor eficaz de la misma. La variable de referencia es la corriente consumida por el motor, que se regula aumentando la tensión de alimentación, para diferentes puntos de ensayo, entre 0 y su valor nominal, $I_{1,cc} = I_{1N}$. En este punto se deben tomar las medidas de tensión $V_{1,cc}$, corriente $I_{1,cc}$, potencia absorbida P_{cc} y factor de potencia $\cos\varphi_{cc}$.

Para determinar los parámetros de la rama en serie del modelo matemático, se lleva a cabo el ensayo de cortocircuito. Cuando la corriente absorbida por el motor ha alcanzado el valor nominal $I_{1,cc} = I_{1N}$, se registran los valores de $V_{1,cc}$, $I_{1,cc}$, P_{cc} y $\cos\varphi_{cc}$ mediante el vatímetro digital. A partir de las expresiones que se muestran a continuación, se pueden calcular los parámetros restantes:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot \frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3}} \cdot I_{1N}} \quad (34)$$

$$\sin\varphi_{cc} = \sin[\arccos(\cos\varphi_{cc})] \quad (35)$$

$$R_{cc} = \frac{\frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3}}}{I_{1N}} \cdot \cos\varphi_{cc} \quad (36)$$

$$X_{cc} = \frac{\frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3}}}{I_{1N}} \cdot \sin\varphi_{cc} \quad (37)$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 \rightarrow R'_2 = R_{cc} - R_1 \quad (38)$$

A falta de información de la relación entre X_{d1} y X'_{d2} , se considera que $X_{d1} = X'_{d2}$

$$X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2} \quad (39)$$

$$X_{d1} = X'_{d2} = \frac{X_{cc}}{2} \quad (40)$$

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros adquiridos en los ensayos de cortocircuito de ambos motores:

Motor	$\cos\phi_{cc}$	$\sen\phi_{cc}$	$R_{cc} (\Omega)$	$X_{cc} (\Omega)$	$R'_2 (\Omega)$	$X_{d1} (\Omega)$	$X'_{d2} (\Omega)$
4 kW	0,501	0,866	2,92	5,05	1,12	2,52	2,52
1,5 kW	0,765	0,081	10,06	1,07	4,06	0,535	0,535

Tabla 22. Parámetros del ensayo de cortocircuito

Los valores de las variables registradas en los ensayos de vacío del motor de 4 y 1,5 kW se facilitan en los apartados 2.1.1.1.2 y 2.1.1.2.2 respectivamente.

1.8.1.2 Estimación de parámetros mediante catálogo

La técnica de estimación de parámetros mediante catálogo permite determinar los parámetros del circuito equivalente a partir de los datos que facilita el fabricante. La ficha técnica del fabricante que contiene los datos de cada motor se puede encontrar en el apartado 2.3.

Para obtener los parámetros se utilizan las siguientes expresiones:

$$R_r = \frac{V_N^2 \cdot s_N}{P_N} \quad (41)$$

$$R_s = k_R \cdot R_r \quad (42)$$

$$X_m = \frac{V_N^2}{P_N \cdot \text{tg}[\arccos(\cos\phi_N)]} \quad (43)$$

$$X_{rd} = 0,05 \cdot X_m \quad (44)$$

$$X_{sd} = k_X \cdot X_{rd} \quad (45)$$

Donde:

- $R_r \equiv$ resistencia del rotor (equivalente a R'_2)
- $R_s \equiv$ resistencia del estátor (equivalente a R_1)
- $X_m \equiv$ reactancia magnetizante
- $X_{rd} \equiv$ reactancia del rotor (equivalente a X'_{d2})
- $X_{sd} \equiv$ reactancia del estátor (equivalente a X_{d1})
- $V_N \equiv$ tensión de línea nominal
- $s_N \equiv$ deslizamiento nominal

$P_N \equiv$ potencia útil nominal del motor

$\cos\phi_N \equiv$ factor de potencia nominal

k_R y k_X son variables adimensionales cuyo valor depende de la clase de motor que se considere. Los valores para cada caso se muestran en la siguiente tabla:

Caso	A	B	C	D
k_R	1,5	1,5	1,5	0,5
k_X	0	0,5	1	0,5

Tabla 23. Valores de k_R y k_X en función del caso

La técnica de estimación de parámetros a partir del catálogo del fabricante utiliza el circuito equivalente de 6 parámetros, con la diferencia de que desprecia la resistencia del circuito magnético, es decir, $R_{fe} = \infty$.

A continuación, se muestra el circuito equivalente explicado:

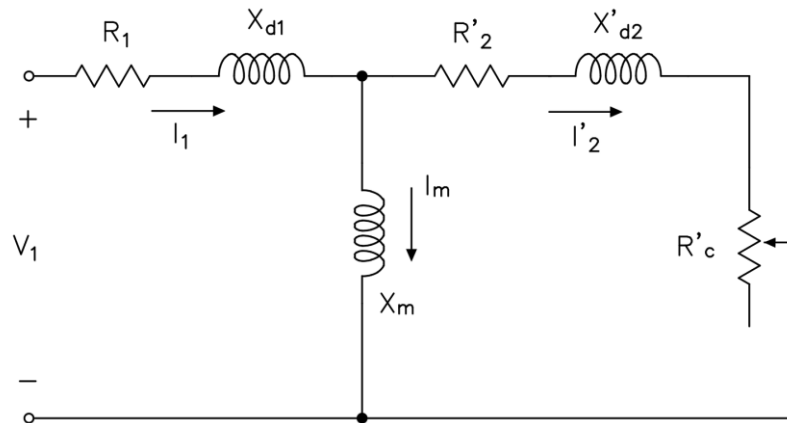


Figura 38. Circuito equivalente de 6 parámetros, pero $R_{fe} = \infty$

No obstante, tal y como se ha definido en el apartado 1.7.1.2, para esta estimación se emplearán las pérdidas magnéticas y mecánicas obtenidas en el ensayo de vacío, por lo que se está modificando el método y dotándolo de una mayor exactitud.

Los datos del fabricante necesarios son los siguientes:

P_N (kW)	V_N (V)	n_s (rpm)	n_N (rpm)	s_N	$\cos\phi_N$
1,5	400	1500	1420	0,0533	0,81
4	400	1500	1440	0,04	0,83

Tabla 24. Datos relevantes del fabricante de los motores de pequeña potencia

Tal y como se ha estudiado en el apartado 1.7.1.1.3, el caso A es en el que se produce un menor error en ambos motores. Utilizando las expresiones citadas en este mismo apartado se obtienen los diferentes parámetros:

Motor	Caso	Parámetro (Ω)				
		R_r	X_m	X_{rd}	R_s	X_{sd}
1,5 kW	A	5,69	147	7,37	8,53	0
4 kW	A	1,60	59,5	2,98	2,40	0

Tabla 25. Parámetros obtenidos mediante catálogo de los motores de pequeña potencia

Los cálculos detallados correspondientes a la obtención de los parámetros mediante catálogo de los motores de pequeña potencia se facilitan en el apartado 2.1.2 de anexos.

1.8.1.3 Rendimiento de los motores

1.8.1.3.1 Dimensionamiento de cargas

Para poder determinar el rendimiento de cada motor en función de la potencia útil del mismo, se debe estimar el valor de carga requerido en cada índice de carga deseado.

Como medida de seguridad, se ha tomado como referencia el índice de carga del generador de corriente continua, ya que, si se superase el valor del corriente del inducido, ($I_i = 25 \text{ A}$) existiría el riesgo de quemar la máquina.

Previamente, se han realizado una serie de consideraciones:

Si se trabaja a la velocidad de giro nominal y el generador se excita con el flujo magnético nominal, como las caídas de tensión en la resistencia interna y en las escobillas son muy pequeñas, se puede considerar que $E \cong V$.

Como la f.e.m es proporcional al flujo y a la velocidad de rotación, siguiendo la ecuación (21) y en el caso del presente TFG se va a operar a una velocidad diferente n' , debido a que las máquinas que accionan al generador de C.C giran a una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo $n < n_s$, entonces la nueva f.e.m, conservando el mismo flujo será:

$$E' = k_E \cdot n' \cdot \phi \quad (46)$$

Para facilitar el dimensionamiento de las cargas, se ha contemplado la siguiente simplificación:

Dado que las velocidades nominales de las máquinas de inducción son $n = 1440 \text{ rpm}$ para el motor de mayor potencia y $n = 1420 \text{ rpm}$ para el de menor potencia, se escoge como velocidad de referencia, $n_{\text{ref}} = 1430 \text{ rpm}$.

De las expresiones (21) y (46) se puede deducir la nueva f.e.m para la velocidad de referencia:

$$\frac{E}{E'} = \frac{n}{n'} \quad (47)$$

Por tanto:

$$E' = \frac{1430}{1500} \cdot 220 \cong 210 \text{ V}$$

Con todo lo explicado previamente, la tensión en bornes de la máquina se puede considerar 210 V.

A continuación, se explica el procedimiento para calcular la carga resistiva en función del índice de carga:

Se determinan los índices de carga de consigna con los que se quiere trabajar, que junto con la corriente de inducido nominal de la máquina de C.C ($I_{i,N} = 25 \text{ A}$), se puede obtener cada corriente de referencia con la siguiente relación:

$$C_{consigna}^{C.C} = \frac{I_i}{I_{i,N}} \quad (48)$$

A partir de la tensión de referencia que se ha fijado en los bornes de la máquina de C.C ($V_{ref} = 210 \text{ V}$) y la corriente de inducido correspondiente a cada índice de carga, se puede calcular el valor de carga resistiva para cada punto de la siguiente forma:

$$R_{consigna} = \frac{V_{ref}}{I_i} \quad (49)$$

En las siguientes tablas se muestran las cargas y el corriente inducido de referencia para ambos motores:

Punto	$C_{consigna}^{C.C}$	$I_{i,ref}$	R_{ref}
1	0,05	1,25	168
2	0,1	2,5	84
3	0,15	3,75	56
4	0,2	5	42
5	0,25	6,25	34
6	0,3	7,5	28
7	0,35	8,75	24
8	0,4	10	21
9	0,5	12,5	17
10	0,6	15	14
11	0,7	17,5	12
12	0,8	20	10

Tabla 26. Dimensionamiento de cargas para el motor de 4 kW

Punto	$C_{consigna}^{C.C}$	$I_{i,ref}$	R_{ref}
1	0,05	1,25	168
2	0,1	2,5	84
3	0,15	3,75	56
4	0,2	5	42
5	0,25	6,25	34
6	0,3	7,5	28
7	0,35	8,75	24
8	0,4	10	21

Tabla 27. Dimensionamiento de cargas para el motor de 1,5 kW

Los cálculos del dimensionamiento de cargas se encuentran detallados en el apartado 2.1.3 de anexos.

Una vez realizado el dimensionamiento de cargas, se debe pensar en una combinación que se aproxime a cada valor de referencia a partir de las cargas disponibles en los armarios del laboratorio *Tabla 5*. Se debe tener especial cuidado en no superar la corriente máxima admisible especificada en la misma tabla.

Las combinaciones elegidas son las siguientes:

R_{ref} (Ω)	Armario 1	Armario 2	Armario 3	Combinación	R_{eq} (Ω)
168	73	55	20 + 20	73 + 55 + 20 + 20	168
84	20 + 20	44	-	20 + 20 + 44	84
56	22	16,9 + 16,9	-	22 + 16,9 + 16,9	55,8
42	20	22	-	20 + 22	42
34	16,9 + 16,9	-	-	16,9 + 16,9	33,8
28	15,7	24,4 // 24,4	-	15,7 + 24,4 // 24,4	27,9
24	14,7	18,3 // 18,3	-	14,7 + 18,3 // 18,3	23,85
21	14,7	20	18,3 // 18,3	14,7 + 20 // 18,3 // 18,3	20,98
17	16,9	-	-	16,9	16,9
14	44 // 44	36,7	-	44 // 44 // 36,7	13,75
12	24,4 // 24,4	-	-	24,4 // 24,4	12,2
10	20 // 20	-	-	20 // 20	10

Tabla 28. Cargas requeridas de cada armario y combinaciones

1.8.1.3.2 Ensayo en carga

La finalidad de este ensayo es representar la curva de rendimiento de cada uno de los dos motores para poder determinar cuál será el valor de baja demanda. Éste coincidirá con el punto en el que el rendimiento del motor principal empiece a decaer significativamente y el secundario tenga una buena eficiencia.

En este ensayo interviene la máquina de corriente continua, actuando como generador y alimentando las diferentes cargas que se conecten. El dimensionamiento de las cargas se puede ver en el apartado *1.8.1.3.1*.

Los instrumentos de medida que se requieren para realizar este ensayo son los siguientes:

- Un vatímetro digital para medir los valores absorbidos por el motor de inducción.
- Un amperímetro para controlar la corriente de excitación del circuito inductor del generador de C.C.
- Un voltímetro y amperímetro para conocer la tensión y corriente del inducido del generador de C.C.

A continuación, se muestra un esquema que representa el ensayo en carga y donde se puede ver la conexión de los instrumentos mencionados:

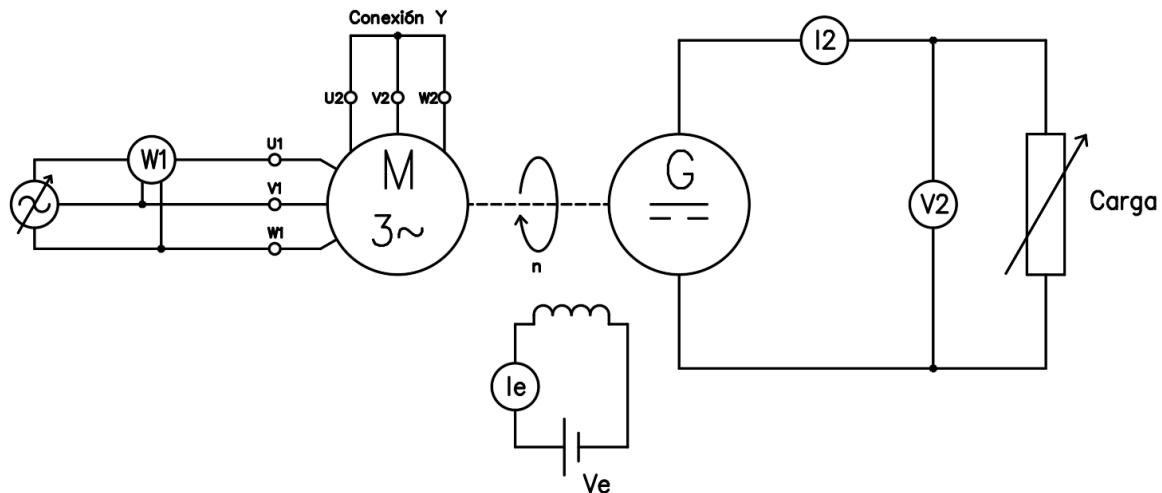


Figura 39. Esquema del ensayo en carga

Se procede del siguiente modo:

- Conexiones en serie con la MdI
- Conexiones en paralelo con la MdI
- Conexión en serie del circuito excitación
- Conexiones en serie con el generador C.C.
- Conexiones en paralelo con el generador C.C.
- Conexión triángulo para alimentar al ventilador de la máquina de C.C.
- Se conecta el valor de la carga de referencia y se anotan las medidas de cada instrumento

Para alimentar al motor se utiliza una fuente de tensión alterna trifásica variable, manteniendo durante todo el ensayo el valor de tensión nominal (400 V).

Se regula la tensión de excitación de la fuente independiente del generador de corriente continua hasta obtener el valor asignado de corriente del inductor ($I_e = 0,7 \text{ A}$), el cual debe permanecer fijo en el transcurso del experimento.

Para cada valor de carga se deben registrar las medidas que indican cada uno de los instrumentos, que permitirán determinar el rendimiento de cada motor.

Los valores de las variables registradas en los ensayos en carga del motor de 4 y 1,5 kW se facilitan en los apartados 2.1.3.1 y 2.1.3.2 respectivamente.

1.8.1.3.3 Determinación del rendimiento

Después de haber registrado todas las variables en cada punto de funcionamiento del ensayo en carga, cuantificado los parámetros del circuito equivalente y determinado las pérdidas mecánicas y magnéticas de ambos motores, se puede calcular el rendimiento en cada punto siguiendo el procedimiento explicado a continuación:

En primer lugar, a partir de la expresión (5), se calculan las pérdidas eléctricas en el devanado del estátor. Seguidamente, se calcula I'_{2f} mediante la expresión (14), para poder determinar las pérdidas eléctricas del rotor, indicada en la ecuación (8).

Después, se obtiene la potencia útil (P_2) descontando a la potencia absorbida todas las pérdidas de la máquina, tal y como se muestra en la expresión (11).

Finalmente, se aplica la expresión (12), que permite determinar el rendimiento de cada punto ensayado.

A continuación, se muestran las representaciones gráficas de los rendimientos de los dos motores ensayados en función de la potencia útil:

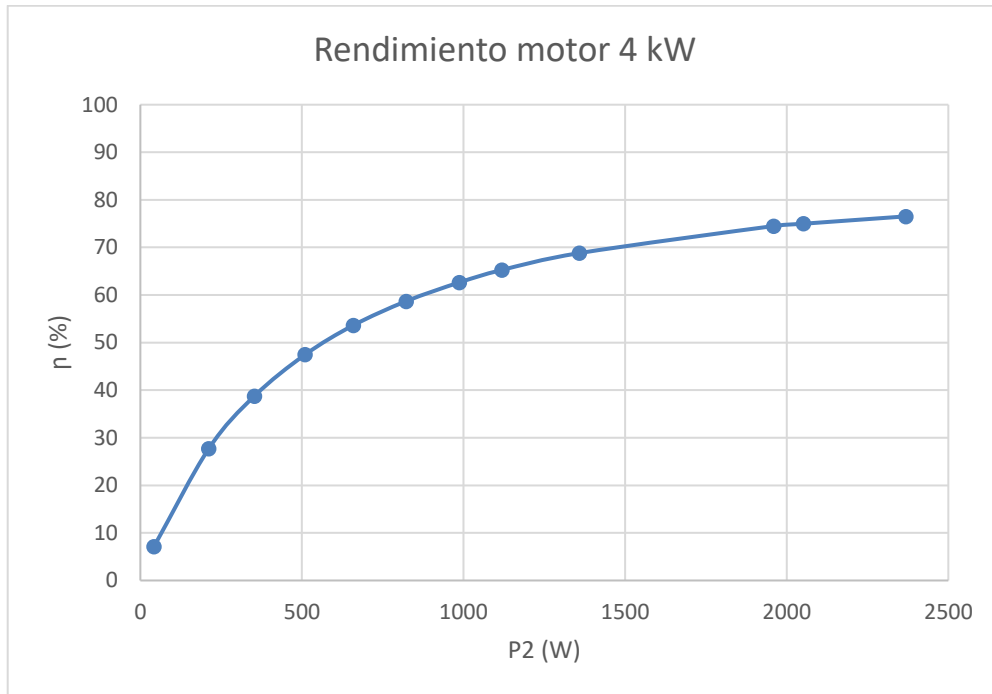


Figura 40. Curva de rendimiento del motor de 4 kW

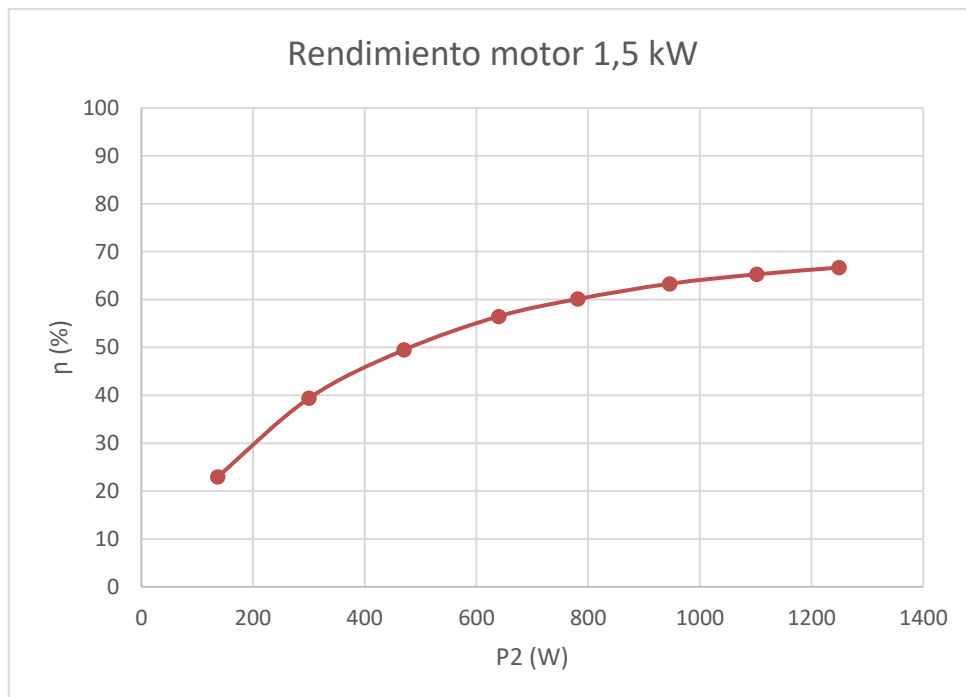


Figura 41. Curva de rendimiento del motor de 1,5 kW

Así como se ha explicado en el apartado 1.7.1.3.3, ambos motores presentan rendimientos similares en el rango de cargas seleccionado. Por tanto, no es rentable añadir el segundo motor.

Ver la *Tabla 44* y *Tabla 47* de anexos para consultar los resultados del rendimiento del ensayo en carga en cada punto de funcionamiento de los motores de pequeña potencia.

1.8.2 Motores de media potencia

Debido a que no se dispone de estos motores físicamente, se ha realizado una extrapolación de las pérdidas mecánicas y magnéticas a partir del porcentaje que estas representan en los motores de pequeña potencia ensayados experimentalmente. Además, los parámetros de estos motores se calcularán a partir de los datos del catálogo del fabricante

1.8.2.1 Estimación de parámetros mediante catálogo

Para la elección del conjunto de parámetros de los motores de media potencia se ha seguido el mismo procedimiento de la determinación del error relativo que se comete en cada uno de los casos. En el análisis de estos motores en el apartado 1.7.2.2, se han obtenido unos resultados diferentes a los de pequeña potencia. En los secundarios de 7,5 y 11 kW el caso más preciso es el B, mientras que en el principal de 45 kW le corresponde al D.

De igual forma que en los motores de pequeña potencia, para los de media potencia se emplean las mismas expresiones presentadas en el apartado 1.8.1.2.

Los datos del catálogo necesarios para calcular los parámetros son los siguientes:

P_N (kW)	V_N (V)	n_s (rpm)	n_N (rpm)	s_N	$\cos\phi_N$
7,5	400	1500	1455	0,03	0,82
11	400	1500	1460	0,0267	0,84
45	400	1500	1470	0,02	0,87

Tabla 29. Datos relevantes del fabricante de los motores de media potencia

A continuación, se muestra una tabla donde se pueden ver los valores de los parámetros del circuito equivalente en función del caso escogido para cada motor:

Motor	Caso	Parámetro (Ω)				
		R_r	X_m	X_{rd}	R_s	X_{sd}
7,5 kW	B	0,640	30,6	1,53	0,960	0,764
11 kW	B	0,388	22,5	1,13	0,582	0,563
45 kW	D	0,071	6,27	0,314	0,036	0,157

Tabla 30. Parámetros obtenidos mediante catálogo de los motores de media potencia

Los valores de los parámetros obtenidos mediante catálogo de los motores de media potencia se facilitan en el apartado 2.2.1.

1.8.2.2 Estimación de las pérdidas magnéticas

Si se observa la *Figura 38*, el circuito equivalente de la estimación de parámetros mediante catálogo no considera las pérdidas magnéticas, es decir, $R_{fe} = \infty$, además de que tampoco se representan las pérdidas mecánicas.

En consecuencia, para determinar las pérdidas magnéticas y mecánicas de los motores de media potencia de la misma serie del fabricante Siemens, se ha decidido realizar una aproximación lineal a partir del porcentaje de pérdidas respecto a la potencia absorbida que representan los motores de pequeña potencia y extrapolar el resultado para los motores de media potencia.

Respecto a las pérdidas magnéticas, la diferencia entre los porcentajes que representan las pérdidas del motor de 1,5 kW ($P_{fe}/P_1 = 11,05 \%$) y del de 4 kW ($P_{fe}/P_1 = 6,3 \%$) es significativa, por lo que la pendiente de la recta es bastante pronunciada. Si esta recta se extrapola para los motores de media potencia, el porcentaje de pérdidas sería negativo.

Por esta razón, para el motor de 45 kW se ha decidido asignar un valor de 3% de pérdidas magnéticas respecto a la potencia que absorbe según el fabricante, ($P_1 = 48180 \text{ W}$). En base a esta suposición, se han determinado el porcentaje de las pérdidas magnéticas de los otros dos motores estudiados (11 y 7,5 kW).

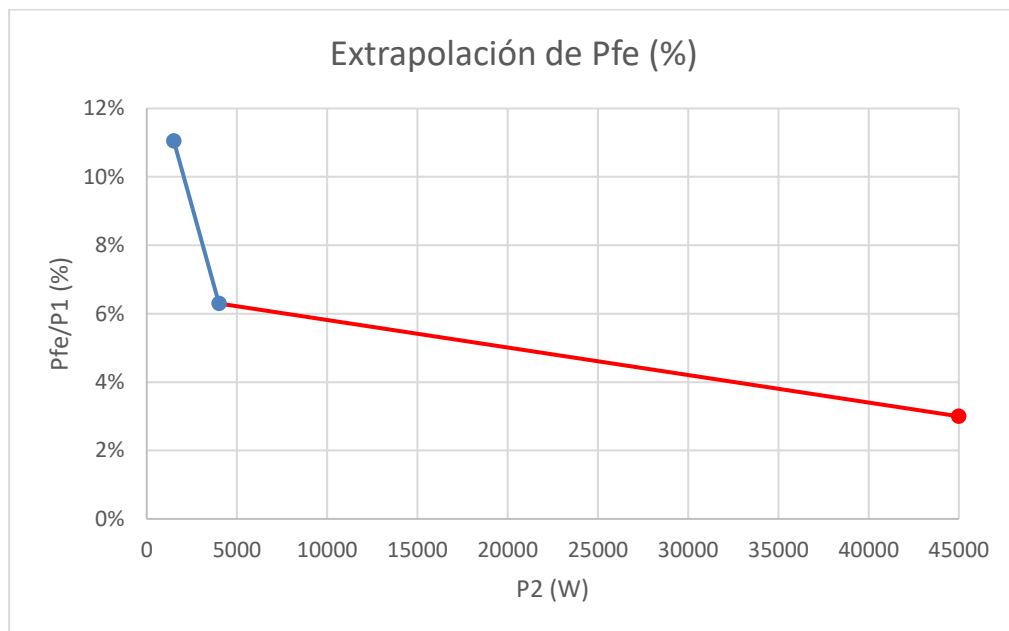


Figura 42. Extrapolación de pérdidas magnéticas

Los dos puntos azules corresponden al porcentaje de pérdidas magnéticas del motor de 1,5 y 4 kW respectivamente.

La línea roja representa la extrapolación hasta 45 kW.

La ecuación que corresponde a la recta roja es:

$$\frac{P_{fe}}{P_1} [\%] = -8 \cdot 10^{-7} P_2 + 0,0662 \quad (50)$$

Siguiendo la expresión anterior se pueden calcular las pérdidas magnéticas de los motores de 7,5 y 11 kW.

1.8.2.3 Estimación de las pérdidas mecánicas

Por otra parte, para definir las pérdidas mecánicas de los motores de media potencia, se ha decidido extrapolar linealmente las de los motores ensayados ya que estas aumentan levemente a medida que la potencia del motor es más elevada.

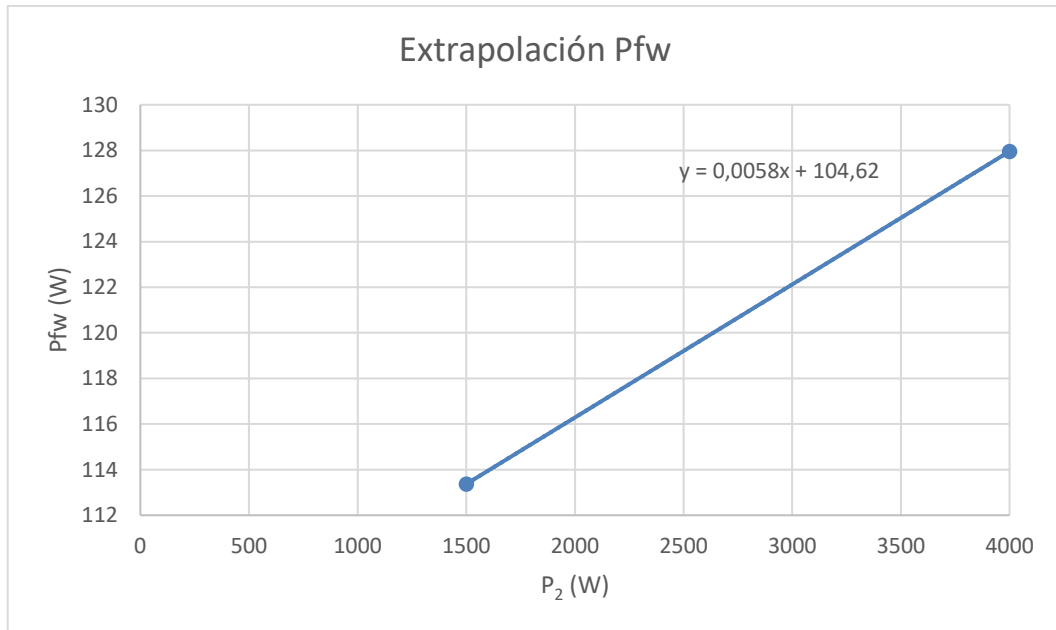


Figura 43. Extrapolación de pérdidas mecánicas

A partir de la ecuación de la recta del gráfico anterior, se pueden determinar las pérdidas mecánicas para los tres motores nuevos, sustituyendo la variable X por la potencia útil de cada uno.

A continuación, se muestra una tabla resumen de las pérdidas extrapoladas de los motores de la misma serie:

Motor	P ₂ (kW)	ρ_N	P ₁ (kW)	P _{fe} (W)	P _{fe} (%)	P _{fw} (W)	P _{fw} (%)
1,5 kW	1,5	0,772	1,94	214,7	11,05%	113,4	5,83%
4 kW	4,0	0,831	4,81	303,1	6,30%	128,0	2,66%
7,5 kW	7,5	0,860	8,72	525,0	6,02%	148,1	1,70%
11 kW	11,0	0,876	12,56	720,8	5,74%	168,4	1,34%
45 kW	45,0	0,934	48,18	1445,4	3,00%	365,6	0,76%

Tabla 31. Extrapolación de pérdidas de motores de la misma serie Siemens

1.8.2.4 Rendimiento de los motores

A partir de la técnica de estimación de parámetros mediante el catálogo del fabricante y la extrapolación de las pérdidas magnéticas y mecánicas realizadas en los apartados anteriores, se puede calcular el rendimiento para cada uno de los puntos de funcionamiento asignados para cada motor de media potencia.

Para crear los diferentes puntos de funcionamiento, en vez de aplicar diferentes valores de carga resistiva, se ha ido variando la velocidad para obtener una gama de valores de potencia

útil, desde la asignada hasta un valor reducido. En primer lugar, se deben calcular las corrientes que circulan por las distintas ramas del circuito equivalente de 6 parámetros, es decir, I_{1f} , I_m e I'_{2f} . A continuación, se calculan las pérdidas en el devanado del estátor y rotor de la misma manera que la empleada en los ensayos experimentales. Después, se determina la potencia absorbida utilizando la expresión (4), además de obtener la potencia útil utilizando la expresión (11). Finalmente, se calcula el rendimiento con (12).

A continuación, se muestran las representaciones gráficas de las curvas de rendimiento de los motores en comparación con los puntos de rendimiento que proporciona el catálogo del fabricante:

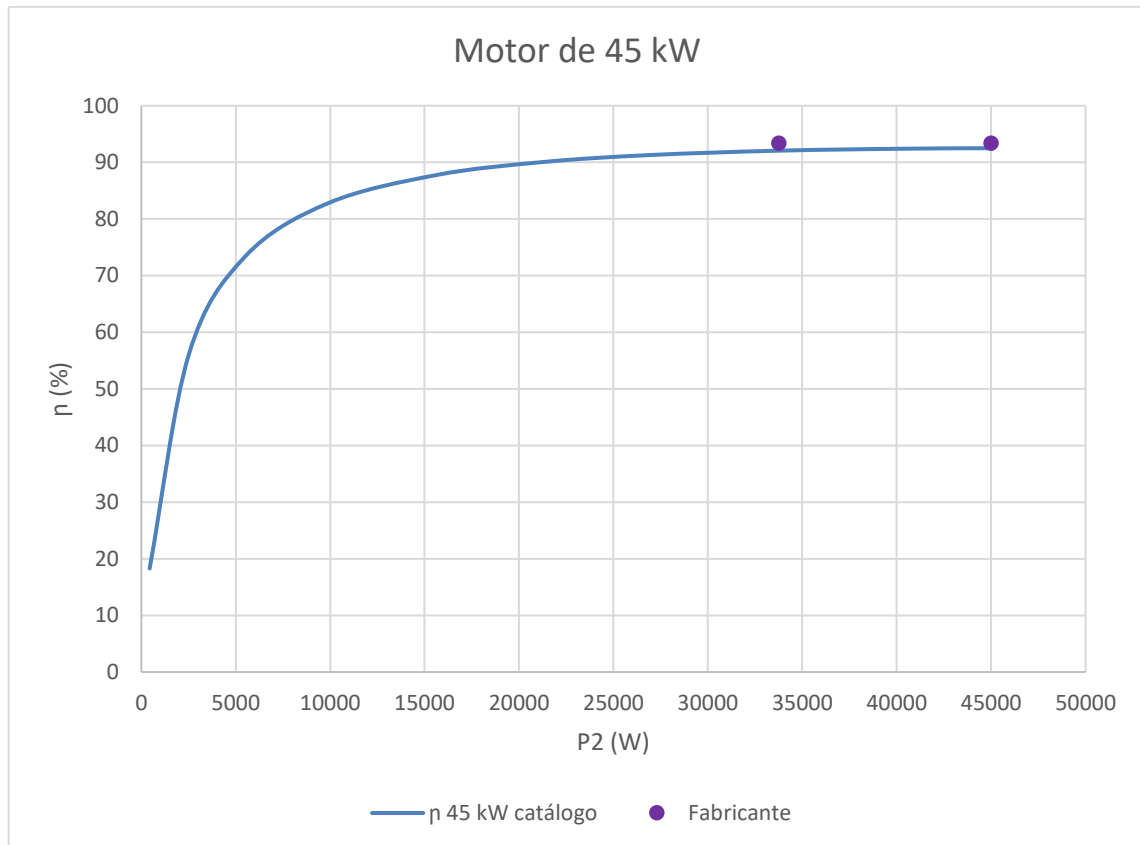


Figura 44. Comparación de la curva de rendimiento del motor de 45 kW con los puntos del fabricante

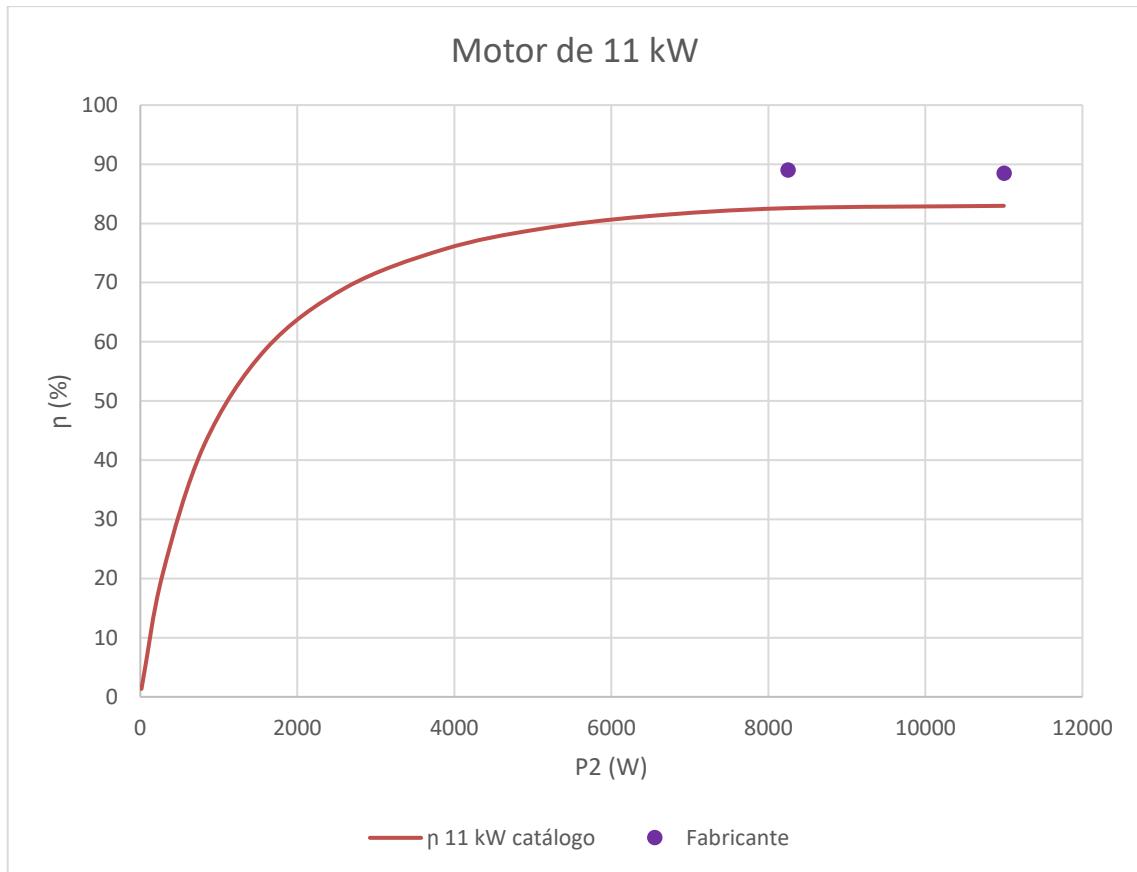


Figura 45. Comparación de la curva de rendimiento del motor de 11 kW con los puntos del fabricante

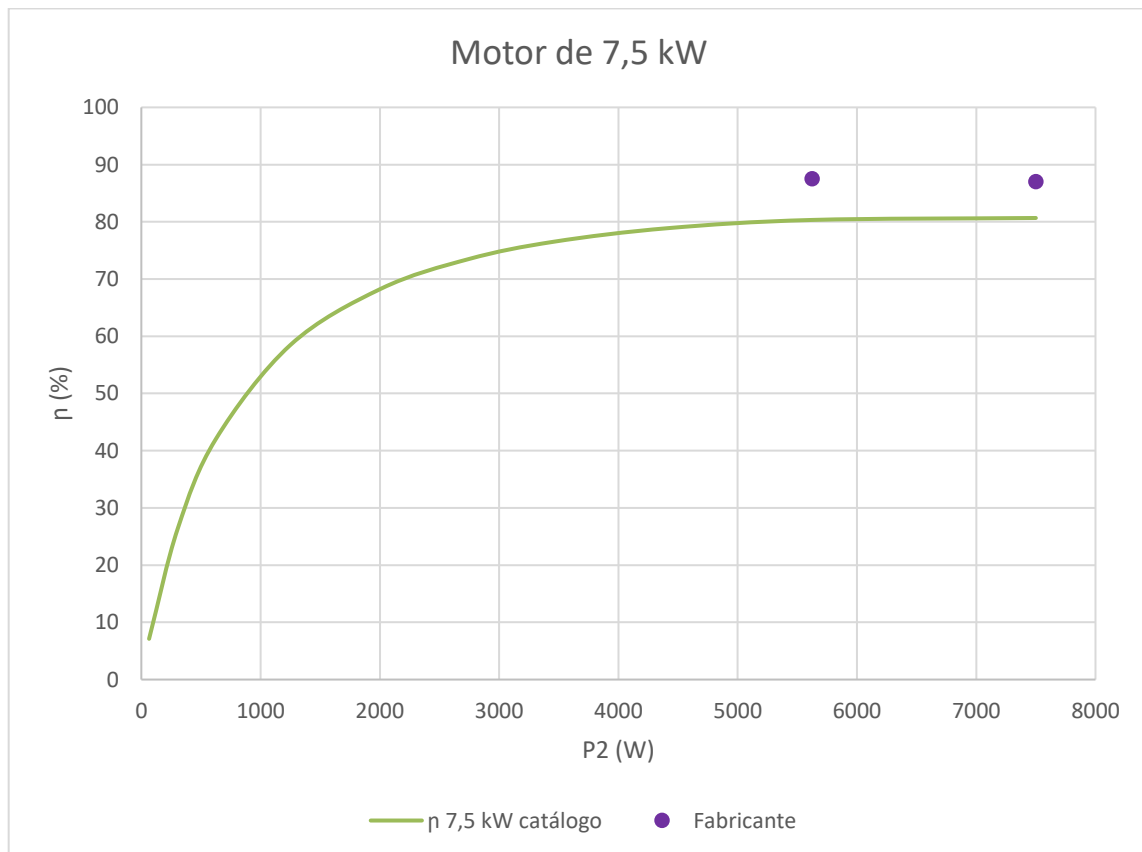


Figura 46. Comparación de la curva de rendimiento del motor de 7,5 kW con los puntos del fabricante

En la *Tabla 32* se pueden ver las diferencias de eficiencia entre la curva estimada y los valores de rendimiento a plena carga y a tres cuartos de la ficha técnica:

η	η catálogo (%)			η estimación catálogo (%)			Desviación (%)		
	45 kW	11 kW	7,5 kW	45 kW	11 kW	7,5 kW	45 kW	11 kW	7,5 kW
4/4	93,4	88,5	87	92,5	83	80,7	0,9	5,5	6,3
3/4	93,4	89	87,5	92,1	82,6	80,3	1,3	6,4	7,2

Tabla 32. Desviación del rendimiento entre la estimación y los puntos del fabricante

En la tabla anterior se observa que a medida que la potencia nominal del motor es menor, el valor del rendimiento se distancia de los puntos indicados por el fabricante.

Ver el apartado 2.2.2 de anexos para ver los resultados del cálculo del rendimiento mediante catálogo de los diferentes motores de media potencia estudiados.

1.8.3 Conclusiones

En el TFG de Francisco Espejo se justifica que, para motores de inducción de gran potencia, del orden de varios cientos de kW, cuando tienen que arrastrar una carga de una potencia muy inferior a la nominal, su rendimiento disminuye significativamente. Es entonces en este caso en el que el acoplamiento de un segundo motor para mover esta carga supondría un aumento de eficiencia energética, lo que implica un ahorro económico.

Por el contrario, en el presente TFG los ensayos han demostrado que para motores de baja potencia no se obtiene una rentabilidad esperada como se podría pensar extrapolando el resultado que se obtuvo en el anterior TFG, puesto que la diferencia de rendimiento es muy reducida cuando tienen que mover cargas de poca potencia y, por tanto, no es útil la incorporación del segundo motor.

Por otra parte, se ha comprobado que, para los motores de pequeña potencia, el cálculo del rendimiento a partir de la estimación de parámetros mediante catálogo es bastante fiable, hecho que indica que se puede conocer con cierta precisión la curva de rendimiento de los motores previamente a su ensayo. Además, el error reducido cometido en la determinación del rendimiento analítico prueba que no es completamente necesario realizar el ensayo en carga para obtener la característica del rendimiento.

En resumen, la aplicación de acoplar un segundo motor buscando un ahorro energético, no resulta beneficioso a motores de bajas potencias.

A continuación, se muestra una tabla que resume la validez de las diferentes combinaciones estudiadas en los apartados 1.7.1.3.3 y 1.7.2.3.

Carga mecánica	Combinación		
	Motor 4 + 1,5 kW	Motor 45 + 11 kW	Motor 45 + 7,5 kW
0,5 P _N	X	X	✓?
1,0 P _N	X	X	X

Tabla 33. Resumen de los posibles acoplamientos analizados

La combinación del motor de 45 y 7,5 kW puede resultar viable en el caso de que la carga mecánica seleccionada sea de un valor reducido, en el cual el motor secundario trabaje al

50 % de su potencia nominal o a un valor inferior, puesto que, en esta situación el rendimiento que desarrolla es considerablemente superior al principal. No obstante, las máquinas de inducción están diseñadas para funcionar a plena carga, por lo que se estaría infrutilizando la capacidad que tiene el motor de 7,5 kW.

1.9 Planificación

No aplica en este TFG.

1.10 Orden de prioridad de los documentos

El orden de prioridad de los documentos del TFG es el siguiente:

- Memoria
- Anexos

2 Anexos

2.1 Motores de pequeña potencia

2.1.1 Estimación de parámetros mediante ensayos experimentales

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos de vacío y cortocircuito, a partir de los cuales se obtienen los parámetros del circuito equivalente para ambos motores.

2.1.1.1 Motor 4 kW

2.1.1.1.1 Ensayo de vacío

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 1.8.1.1.2, partiendo de la una alimentación a tensión nominal (400 V), esta se va disminuyendo escalonadamente en intervalos de 50 V, hasta 200 V. A partir de aquí, se reduce cada 25 V y después cada 20 V para obtener más puntos de ensayo, hasta llegar a 60 V. En este punto la velocidad ha decaído 52 rpm respecto al anterior, lo que significa que ya no se debe continuar con el ensayo debido a que las pérdidas mecánicas variarían en gran medida.

Punto	$V_{1,L, ref}$ (V)	$V_{1,L}$ (V)	$I_{0,f}$ (A)	P_0 (W)	$\cos\phi_0$	$P_{cu,1}$ (W)	$P_{fe} + P_{fw}$ (W)	n (rpm)
1	400	399,2	4,47	539	0,17	107,90	431,10	1500
2	350	350	3,18	346	0,18	54,61	291,39	1500
3	300	299,7	2,48	263,1	0,2	33,21	229,89	1499
4	250	250,2	2	200,9	0,23	21,60	179,30	1497
5	200	200,7	1,585	171,8	0,31	13,57	158,23	1495
6	175	175,3	1,411	167,8	0,39	10,75	157,05	1494
7	150	149,6	1,278	146,4	0,44	8,82	137,58	1492
8	125	124,3	1,194	142,9	0,56	7,70	135,20	1488
9	100	100,2	1,175	141,2	0,69	7,46	133,74	1481
10	80	80,1	1,276	141,7	0,8	8,79	132,91	1476
11	60	60,5	1,691	143,4	0,81	15,44	127,96	1424

Tabla 34. Resultados del ensayo de vacío del motor de 4 kW

Teniendo en cuenta las expresiones del apartado 1.8.1.1.2 y los resultados del ensayo, se pueden determinar los elementos de la rama en paralelo del motor de 4 kW de la forma siguiente:

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 4,47 \cdot 0,17 = 0,76 \text{ A}$$

$$R_{fe} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{3} I_{fe}} = \frac{230,5}{0,76} = 303,301 \Omega$$

$$I_m = I_0 \cdot \sen\varphi_0 = 4,47 \cdot 0,985 = 4,405 \text{ A}$$

$$X_m = \frac{V_{1N}}{\sqrt{3} I_m} = \frac{230,5}{4,405} = 52,323 \Omega$$

2.1.1.1.2 Ensayo de cortocircuito

Este ensayo se realiza siguiendo la metodología definida en el apartado 1.8.1.1.3. Teniendo en cuenta que la conexión del motor es en estrella, la corriente nominal es de 8,2 A. A partir de una corriente de cortocircuito de 0,82 A, esta se ha ido incrementando hasta el valor asignado, obteniendo un total de 10 puntos de ensayo.

Punto	I _{1,f,ref} (A)	V _{1,cc,L} (V)	V _{1,cc,f} (V)	I _{cc} (A)	P _{cc} (W)	cosφ _{cc}
1	0,82	21,1	-	0,842	11,8	0,38
2	1,64	29	-	1,628	32,6	0,4
3	2,46	35,5	-	2,42	61,5	0,41
4	3,28	42,7	-	3,26	109,1	0,45
5	4,1	50,2	-	4,12	167,3	0,47
6	4,92	56,6	-	4,94	230,4	0,48
7	5,74	63,6	-	5,75	303,5	0,48
8	6,56	69,4	-	6,54	377,4	0,48
9	7,38	76,4	-	7,35	479,1	0,49
10	8,2	82,6	47,69	8,18	585,8	0,5

Tabla 35. Resultados del ensayo de cortocircuito del motor de 4 kW

Teniendo en cuenta las expresiones del apartado 1.8.1.1.3 y los resultados del ensayo, se pueden determinar los elementos de la rama en serie. A continuación, se muestran los cálculos correspondientes al último punto registrado de la Tabla 35, es decir, el ensayo de cortocircuito en condiciones nominales:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot \frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3}} \cdot I_{1N}} = \frac{585,8}{3 \cdot \frac{82,6}{\sqrt{3}} \cdot 8,18} = 0,501$$

$$\text{sen}\varphi_{cc} = \text{sen}[\arccos(\cos\varphi_{cc})] = \text{sen}[\arccos(0,501)] = 0,866$$

$$R_{cc} = \frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3} \cdot I_{1N}} \cdot \cos\varphi_{cc} = \frac{82,6}{8,18} \cdot 0,501 = 2,918 \Omega$$

$$X_{cc} = \frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3} \cdot I_{1N}} \cdot \text{sen}\varphi_{cc} = \frac{82,6}{8,18} \cdot 0,866 = 5,047 \Omega$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$R'_2 = R_{cc} - R_1 = 2,918 - 1,8 = 1,118 \Omega$$

Se considera $X_{d1} = X'_{d2}$, por tanto:

$$X_{d1} = X'_{d2} = \frac{X_{cc}}{2} = \frac{5,047}{2} = 2,524 \Omega$$

2.1.1.2 Motor 1,5 kW

2.1.1.2.1 Ensayo de vacío

Se repite el mismo procedimiento que el empleado para el motor principal con la diferencia de que el ensayo se detiene a los 65 V, dado que en este motor la velocidad desciende de forma más rápida.

Punto	V _{1,L, ref} (V)	V _{1,L} (V)	I _{0,f} (A)	P ₀ (W)	cosφ ₀	P _{cu,1} (W)	P _{fe} + P _{fw} (W)	n (rpm)
1	400	400,6	2,52	442,4	0,25	114,31	328,09	1495
2	350	349,5	1,824	315,2	0,29	59,89	255,31	1495
3	300	299,9	1,51	251,5	0,32	41,04	210,46	1494
4	250	250,5	1,212	186,5	0,35	26,44	160,06	1491
5	200	200,8	1,014	160	0,45	18,51	141,49	1483
6	175	175,8	0,909	151,6	0,55	14,87	136,73	1480
7	150	150,6	0,845	146,7	0,67	12,85	133,85	1474
8	130	130,6	0,831	137,5	0,73	12,43	125,07	1464
10	110	110,2	0,824	134,2	0,82	12,22	121,98	1447
11	95	95	0,947	137,4	0,88	16,14	121,26	1425
12	80	80,4	1,103	142,2	0,93	21,90	120,30	1379
13	65	65,1	1,495	153,6	0,91	40,23	113,37	1240

Tabla 36. Resultados del ensayo de vacío del motor de 1,5 kW

A continuación, se realiza el cálculo de los parámetros de la rama en paralelo del motor de 1,5 kW:

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 2,52 \cdot 0,25 = 0,63 \text{ A}$$

$$R_{fe} = \frac{\frac{V_{1N}}{\sqrt{3}}}{I_{fe}} = \frac{231,3}{0,63} = 367,121 \Omega$$

$$I_m = I_0 \cdot \sen\varphi_0 = 2,52 \cdot 0,968 = 2,44 \text{ A}$$

$$X_m = \frac{\frac{V_{1N}}{\sqrt{3}}}{I_m} = \frac{231,3}{2,44} = 94,79 \Omega$$

2.1.1.2.2 Ensayo de cortocircuito

En este caso, se ha procedido de la misma forma, en vista de que la corriente nominal para este motor es de 3,45 A.

Punto	I _{1,f,ref} (A)	V _{1,cc,L} (V)	V _{1,cc,f} (V)	I _{cc} (A)	P _{cc} (W)	cosφ _{cc}
1	0,345	6,2	-	0,337	3,3	0,92
2	0,69	14,4	-	0,704	14,5	0,83
3	1,035	22,5	-	1,037	32,2	0,8
4	1,38	29,6	-	1,397	56,3	0,79
5	1,725	37,3	-	1,726	86,4	0,77
6	2,07	44,4	-	2,04	120,4	0,77
7	2,415	53,8	-	2,4	171,6	0,77
8	2,76	61	-	2,74	218,6	0,76
9	3,105	69,6	-	3,1	286	0,77
10	3,45	78,3	45,21	3,44	357	0,77

Tabla 37. Resultados del ensayo de cortocircuito del motor de 1,5 kW

El cálculo de los parámetros de la rama en serie es el siguiente:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot \frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3}} \cdot I_{1N}} = \frac{357}{3 \cdot \frac{78,3}{\sqrt{3}} \cdot 3,44} = 0,765$$

$$R_{cc} = \frac{\frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3}}}{I_{1N}} \cdot \cos\varphi_{cc} = \frac{78,3}{3,44} \cdot 0,765 = 10,056 \Omega$$

$$X_{cc} = \frac{V_{1,cc}}{\sqrt{3} I_{1N}} \cdot \text{sen}\varphi_{cc} = \frac{78,3}{3,44} \cdot 0,644 = 8,46 \Omega$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$R'_2 = R_{cc} - R_1 = 10,056 - 6 = 4,056 \Omega$$

Se considera $X_{d1} = X'_{d2}$, por tanto:

$$X_{d1} = X'_{d2} = \frac{X_{cc}}{2} = \frac{8,46}{2} = 4,23 \Omega$$

2.1.2 Estimación de parámetros mediante catálogo

2.1.2.1 Motor 4 kW

Utilizando las expresiones del apartado 1.8.1.2 y las variables de cada caso indicadas en la *Tabla 23*, se pueden obtener los parámetros del circuito equivalente:

$$R_r = \frac{V_N^2 \cdot s_N}{P_N} = \frac{400^2 \cdot 0,04}{4000} = 1,6 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_N^2}{P_N \cdot \text{tg}[\arccos(\cos\varphi_N)]} = \frac{400^2}{4000 \cdot \text{tg}[\arccos(0,83)]} = 59,5 \Omega$$

$$X_{rd} = 0,05 \cdot X_m = 0,05 \cdot 59,5 = 2,98 \Omega$$

- Caso A:

$$R_s = k_R \cdot R_r = 1,5 \cdot 1,6 = 2,4 \Omega$$

$$X_{sd} = k_X \cdot X_{rd} = 0 \cdot 2,98 = 0 \Omega$$

- Caso B:

$$R_s = k_R \cdot R_r = 1,5 \cdot 1,6 = 2,4 \Omega$$

$$X_{sd} = k_X \cdot X_{rd} = 0,5 \cdot 2,98 = 1,49 \Omega$$

- Caso C:

$$R_s = k_R \cdot R_r = 1,5 \cdot 1,6 = 2,4 \Omega$$

$$X_{sd} = k_X \cdot X_{rd} = 1 \cdot 2,98 = 2,98 \Omega$$

- Caso D:

$$R_s = k_R \cdot R_r = 0,5 \cdot 1,6 = 0,8 \Omega$$

$$X_{sd} = k_X \cdot X_{rd} = 0,5 \cdot 2,98 = 1,49 \Omega$$

Motor	Parámetro (Ω)	Caso			
		A	B	C	D
4 kW	R _r	1,60	1,60	1,60	1,60
	X _m	59,5	59,5	59,5	59,5
	X _{rd}	2,98	2,98	2,98	2,98
	R _s	2,40	2,40	2,40	0,80
	X _{sd}	0	1,49	2,98	1,49

Tabla 38. Parámetros obtenidos mediante catálogo del motor de 4 kW

2.1.2.2 Motor 1,5 kW

De igual forma que en la sección anterior, se calculan los parámetros del motor de 1,5 kW:

Motor	Parámetro (Ω)	Caso			
		A	B	C	D
1,5 kW	R _r	5,69	5,69	5,69	5,69
	X _m	147	147	147	147
	X _{rd}	7,37	7,37	7,37	7,37
	R _s	8,53	8,53	8,53	2,84
	X _{sd}	0	3,68	7,37	3,68

Tabla 39. Parámetros obtenidos mediante catálogo del motor de 1,5 kW

2.1.3 Ensayo en carga

2.1.3.1 Motor 4 kW

Los índices de carga de consigna de la máquina de corriente C.C elegidos para cada punto de funcionamiento del motor de 4 kW son los siguientes:

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C _{consigna} ^{C.C}	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Tabla 40. Índices de carga de la máquina de C.C seleccionados para el ensayo del motor de 4 kW

Utilizando y aislando la expresión (48), se encuentra el valor de referencia asociado a cada punto ($I_{i,N} = 25 A$):

- Ejemplo de cálculo para el punto 1:

$$I_i = 0,05 \cdot 25 = 1,25 A$$

Tomando como valor de tensión de referencia ($V_{ref} = 210 \text{ V}$) determinado en el apartado 1.8.1.3.1, se puede calcular el valor de la carga resistiva de cada punto:

$$R_{consigna} = \frac{210}{1,25} = 168 \Omega$$

Siguiendo este procedimiento se pueden encontrar los valores de carga de los puntos restantes, mostrados en la *Tabla 26*.

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 1.8.1.3.2, se realiza el ensayo en carga. A continuación, se puede observar dos imágenes del montaje, los armarios de cargas y los instrumentos necesarios para ejecutar el experimento:

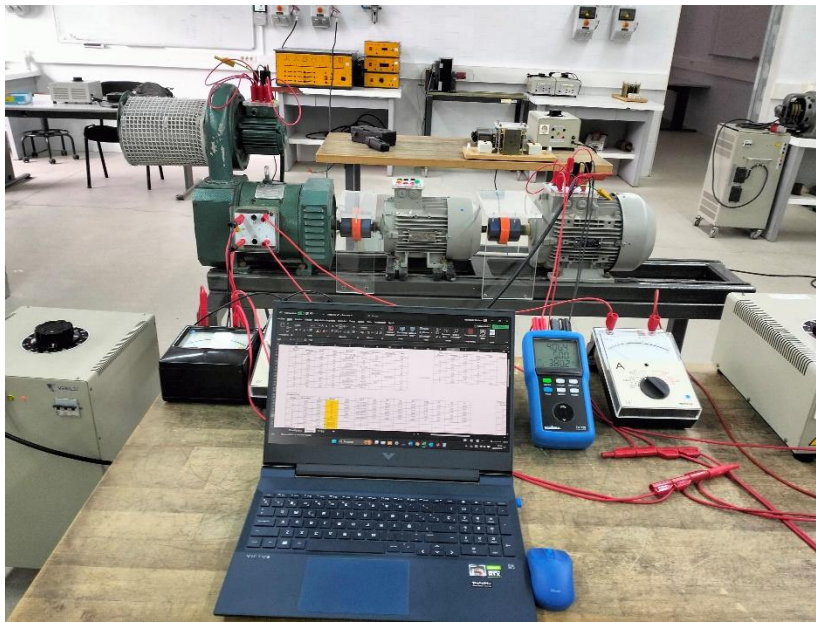


Figura 47. Montaje del ensayo en carga (1)

Para facilitar el seguimiento de los cables, las conexiones en serie se han realizado en rojo, mientras que en paralelo con cables negros.



Figura 48. Montaje del ensayo en carga (2)

En la tabla siguiente se pueden ver las variables registradas en el ensayo en carga del motor de 4 kW:

Punto	C _{consigna} ^{C.C} (pu)	R (Ω)	V _{1,L} (V)	I _{1,f} (A)	P ₁ (W)	cosφ	V ₂ (V)	I ₂ (A)	n (rpm)
1	0,05	170	400,7	4,65	590,3	0,18	178	1,05	1497
2	0,1	85	400,4	4,71	764,2	0,23	175	2,05	1495
3	0,15	58	399,8	4,76	910,4	0,28	172	2,98	1492
4	0,2	44	399,7	4,89	1074	0,32	170	3,9	1492
5	0,25	35	398	4,93	1229	0,36	169	4,8	1489
6	0,3	28	399,2	5,07	1401	0,4	165	5,8	1488
7	0,35	25	399,9	5,16	1576	0,44	165	6,7	1485
8	0,4	22	397,8	5,25	1714	0,47	163	7,5	1484
9	0,5	18	399,4	5,49	1974	0,52	159	9	1481
10	0,6	14	397	6,04	2630	0,63	165	11,5	1473
11	0,7	13	396,3	6,2	2736	0,64	159	12,2	1472
12	0,8	11	397,6	6,61	3095	0,68	151	14,25	1468

Tabla 41. Variables registradas en el ensayo en carga del motor de 4 kW

2.1.3.2 Motor 1,5 kW

A continuación, se muestran los índices de carga de consigna de la máquina de corriente C.C seleccionados para cada punto de funcionamiento del motor de 1,5 kW:

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8
C _{consigna} ^{C.C}	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4

Tabla 42. Índices de carga de la máquina de C.C seleccionados para el ensayo del motor de 1,5 kW

De la misma forma que en el apartado anterior, se calculan las cargas correspondientes a cada punto de funcionamiento. Ver en la *Tabla 27*.

En la tabla siguiente se pueden ver las variables registradas en el ensayo en carga del motor de 1,5 kW:

Punto	C _{consigna} ^{C.C} (pu)	R (Ω)	V _{1,L} (V)	I _{1,f} (A)	P ₁ (W)	cosφ	V ₂ (V)	I ₂ (A)	n (rpm)
1	0,05	173	402,3	2,66	594,6	0,32	183	1,06	1488
2	0,1	85	398,6	2,66	762,4	0,42	180	2,12	1480
3	0,15	58	400,5	2,77	950,5	0,49	178	3,07	1471
4	0,2	44	398,9	2,85	1133	0,58	174	4	1466
5	0,25	35	400,7	3	1300	0,62	171	4,85	1458
6	0,3	29	398,4	3,16	1495	0,69	169	5,8	1449
7	0,35	25	399,4	3,37	1689	0,72	166	6,7	1441
8	0,4	22	399,8	3,57	1874	0,76	165	7,55	1434

Tabla 43. Variables registradas en el ensayo en carga del motor de 1,5 kW

2.1.4 Rendimiento de los motores

En el presente apartado se muestran los resultados de los cálculos de las magnitudes necesarias para calcular el rendimiento en cada punto de funcionamiento. El procedimiento seguido para su obtención se encuentra detallado en el apartado 1.8.1.3.3. Asimismo, se presentan los resultados del rendimiento obtenido a partir de los datos del fabricante y el rendimiento analítico.

2.1.4.1 Motor 4 kW

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados del rendimiento en cada punto, además del repartimiento de pérdidas en los circuitos eléctricos:

s	P _{cu,1} (W)	I' _{2f} (A)	P _{cu,2} (W)	P ₂ (W)	η ensayo (%)
0,002	117	0,412	0,57	42	7,1
0,0033	120	0,685	1,58	212	27,7
0,0053	122	1,091	3,99	353	38,8
0,0053	129	1,091	3,99	510	47,5
0,0073	131	1,489	7,43	659	53,6
0,008	139	1,627	8,88	822	58,7
0,01	144	2,030	13,82	987	62,6
0,0107	149	2,151	15,53	1119	65,3
0,0127	163	2,556	21,91	1358	68,8
0,018	197	3,574	42,86	1959	74,5
0,0187	208	3,696	45,82	2052	75,0
0,0213	236	4,216	59,62	2368	76,5

Tabla 44. Resultados ensayo en carga motor de 4 kW

El procedimiento del cálculo del rendimiento analítico es idéntico al de los ensayos, con la diferencia de que para obtener diferentes puntos de funcionamiento no se cambia el valor de carga, sino que se varía gradualmente hasta alcanzar la potencia útil nominal.

n (rpm)	I' _{2f} (A)	I _{if} (A)	P _{cu,1} (W)	P _{cu,2} (W)	cosφ ₁	P ₁ (W)	Σ pérd (W)	P ₂ (W)	η 4 kW (%)
1472	3,67-0,296i	4,43-4,71i	226	45	0,685	3071	702	2368	77,1
1476	3,16-0,219i	3,92-4,63i	199	34	0,646	2715	664	2052	75,6
1478	3,00-0,199i	3,77-4,61i	192	31	0,633	2612	653	1959	75,0
1485	2,06-0,0931i	2,82-4,51i	153	14	0,531	1956	598	1358	69,4
1488	1,69-0,0627i	2,45-4,48i	141	10	0,481	1701	581	1119	65,8
1489	1,49-0,0486i	2,25-4,46i	135	7	0,451	1561	574	987	63,3
1491	1,24-0,0336i	2,00-4,45i	128	5	0,410	1387	565	822	59,3
1493	0,994-0,0216i	1,76-4,44i	123	3	0,368	1216	557	659	54,2
1494	0,77-0,0130i	1,53-4,43i	118	2	0,327	1061	552	510	48,0
1496	0,5373-0,00631i	1,30-4,42i	115	1	0,282	900	547	353	39,2
1498	0,32819-0,00235i	1,09-4,42i	112	0	0,240	755	543	212	28,0
1499	0,0784-0,000134i	0,840-4,41i	109	0	0,187	582	540	42	7,2

Tabla 45. Cálculo del rendimiento analítico del motor de 4 kW

A continuación, se muestra la tabla utilizada para la determinación del error que se produce en la estimación mediante catálogo:

n (rpm)	I'_{2f} (A)	I_{1f} (A)	$P_{cu,1}$ (W)	$P_{cu,2}$ (W)	$\cos\phi_1$	P_1 (W)	Σ pérd (W)	P_2 (W)	η 4 kW (%)
1450	4,58-0,272i	4,58-4,15i	275	101	0,741	3176	808	2368	74,6
1456	4,04-0,211i	4,04-4,09i	238	79	0,703	2800	748	2052	73,3
1458	3,88-0,195i	3,88-4,07i	228	73	0,690	2691	732	1959	72,8
1469	2,89-0,108i	2,89-3,99i	175	40	0,587	2004	646	1358	67,8
1473	2,51-0,0812i	2,51-3,96i	158	30	0,535	1738	620	1119	64,4
1475	2,3-0,0682i	2,3-3,95i	150	25	0,503	1594	607	987	61,9
1478	2,04-0,0538i	2,04-3,93i	141	20	0,461	1415	593	822	58,1
1481	1,79-0,0412i	1,79-3,92i	134	15	0,415	1239	580	659	53,2
1484	1,56-0,0314i	1,56-3,91i	128	12	0,370	1080	570	510	47,2
1486	1,32-0,0224i	1,32-3,90i	122	8	0,320	914	562	353	38,6
1488	1,11-0,0158i	1,11-3,90i	118	6	0,274	768	555	212	27,7
1491	0,853-0,0094i	0,85-3,89i	114	3	0,214	591	549	42	7,1

Tabla 46. Cálculo del rendimiento mediante catálogo del motor de 4 kW

2.1.4.2 Motor 1,5 kW

Para el motor de 1,5 kW se realiza el mismo procedimiento que el empleado en el motor de 4 kW.

s	$P_{cu,1}$ (W)	I'_{2f} (A)	$P_{cu,2}$ (W)	P_2 (W)	η ensayo (%)
0,008	127	0,453	2,49	137	23,0
0,0133	127	0,742	6,69	300	39,4
0,0193	138	1,071	13,95	470	49,5
0,0227	146	1,244	18,83	640	56,5
0,028	162	1,531	28,53	781	60,1
0,034	180	1,832	40,82	946	63,3
0,0393	204	2,107	54,01	1102	65,3
0,044	229	2,342	66,76	1250	66,7

Tabla 47. Resultados ensayo en carga motor de 1,5 kW

n (rpm)	I'_{2f} (A)	I_{1f} (A)	$P_{cu,1}$ (W)	$P_{cu,2}$ (W)	$\cos\phi_1$	P_1 (W)	Σ pérd (W)	P_2 (W)	η 1,5 kW (%)
1441	2,09-0,161i	2,72-2,60i	255	54	0,723	1885	636	1249	66,2
1449	1,82-0,122i	2,45-2,56i	226	40	0,691	1696	594	1102	65,0
1458	1,54-0,087i	2,17-2,52i	199	29	0,652	1503	556	946	63,0
1466	1,25-0,0576i	1,88-2,49i	176	19	0,602	1304	523	781	59,9
1472	1,02-0,0378i	1,64-2,47i	159	13	0,554	1139	500	640	56,2
1480	0,737-0,0199i	1,37-2,46i	142	7	0,486	946	477	470	49,6
1488	0,467-0,008i	1,10-2,44i	129	3	0,409	760	460	300	39,5
1494	0,216-0,001i	0,845-2,44i	120	1	0,327	585	448	137	23,4

Tabla 48. Cálculo del rendimiento analítico del motor de 1,5 kW

n (rpm)	I'_{2r} (A)	I_{1r} (A)	$P_{cu,1}$ (W)	$P_{cu,2}$ (W)	$\cos\phi_1$	P_1 (W)	Σ pérd (W)	P_2 (W)	η 1,5 kW (%)
1377	2,93-0,277i	2,93-1,84i	308	148	0,847	2033	784	1249	61,4
1393	2,60-0,217i	2,60-1,78i	255	116	0,824	1801	699	1102	61,2
1408	2,27-0,165i	2,27-1,73i	209	88	0,795	1571	625	946	60,2
1423	1,94-0,12i	1,94-1,69i	169	64	0,754	1342	561	781	58,2
1434	1,67-0,0894i	1,67-1,66i	142	48	0,710	1158	518	640	55,3
1447	1,36-0,059i	1,36-1,63i	115	32	0,643	945	475	470	49,7
1459	1,07-0,0367i	1,07-1,60i	95	20	0,556	743	443	300	40,4
1469	0,80-0,0206i	0,80-1,59i	81	11	0,452	557	420	137	24,6

Tabla 49. Cálculo del rendimiento mediante catálogo del motor de 1,5 kW

2.2 Motores de media potencia

2.2.1 Estimación de parámetros mediante catálogo

El cálculo de los parámetros de los motores de media potencia se realiza empleando las expresiones introducidas en el apartado 1.8.1.2 y las variables de cada caso en la Tabla 23.

Motor	Parámetro (Ω)	Caso			
		A	B	C	D
7,5 kW	R_r	0,64	0,64	0,64	0,64
	X_m	30,563	30,563	30,563	30,563
	X_{rd}	1,528	1,528	1,528	1,528
	R_s	0,96	0,96	0,96	0,32
	X_{sd}	0	0,764	1,528	0,764
11 kW	R_r	0,388	0,388	0,388	0,388
	X_m	22,518	22,518	22,518	22,518
	X_{rd}	1,126	1,126	1,126	1,126
	R_s	0,582	0,582	0,582	0,194
	X_{sd}	0	0,563	1,126	0,563
45 kW	R_r	0,071	0,071	0,071	0,071
	X_m	6,274	6,274	6,274	6,274
	X_{rd}	0,314	0,314	0,314	0,314
	R_s	0,107	0,107	0,107	0,036
	X_{sd}	0	0,157	0,314	0,157

Tabla 50. Parámetros obtenidos mediante catálogo de los motores de media potencia

2.2.2 Rendimiento de los motores

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 1.8.2.4 se puede calcular el rendimiento en los puntos de funcionamiento deseados para los tres motores analizados.

2.2.2.1 Motor 45 kW

El cálculo del rendimiento se realiza para el caso D de la estimación de parámetros mediante catálogo:

n (rpm)	I _{2f} (A)	I _{1f} (A)	P _{cu,1} (W)	P _{cu,2} (W)	cosφ ₁	P ₁ (W)	Σ pérd (W)	P ₂ (W)	η 45 kW (%)
1467	70,2-10,3i	70,2-47,1i	762	1074	0,831	48648	3648	45000	92,5
1470	63,2-8,28i	63,2-45,1i	643	867	0,814	43802	3322	40481	92,4
1475	52,9-5,77i	52,9-42,6i	492	604	0,779	36657	2907	33750	92,1
1480	42,7-3,74i	42,7-40,6i	370	392	0,725	29574	2572	27002	91,3
1484	34,3-2,41i	34,3-39,2i	289	252	0,658	23756	2353	21403	90,1
1488	25,8-1,36i	25,8-38,2i	226	142	0,560	17879	2180	15699	87,8
1492	17,3-0,61i	17,3-37,4i	181	64	0,419	11953	2056	9898	82,8
1495	10,8-0,24i	10,8-37,0i	159	25	0,280	7484	1995	5489	73,3
1497	6,49-0,01i	6,49-36,9i	150	9	0,173	4495	1970	2525	56,2
1498	3,46-0,02i	3,46-36,8i	146	3	0,094	2399	1960	439	18,3

Tabla 51. Cálculo del rendimiento mediante catálogo del motor de 45 kW

2.2.2.2 Motor 11 kW

El cálculo del rendimiento se realiza para el caso B de la estimación de parámetros mediante catálogo:

n (rpm)	I _{2f} (A)	I _{1f} (A)	P _{cu,1} (W)	P _{cu,2} (W)	cosφ ₁	P ₁ (W)	Σ pérd (W)	P ₂ (W)	η 11 kW (%)
1448	19,1-2,73i	19,1-13,0i	934	435	0,827	13257	2257	11000	83,0
1462	14,4-1,54i	14,4-11,8i	606	245	0,774	9990	1740	8250	82,6
1470	11,5-0,971i	11,5-11,2i	450	154	0,715	7953	1494	6459	81,2
1476	9,26-0,63i	9,26-10,9i	357	100	0,648	6416	1346	5070	79,0
1481	7,38-0,40i	7,38-10,7i	293	64	0,569	5113	1246	3867	75,6
1486	5,47-0,22i	5,47-10,5i	244	35	0,463	3791	1168	2623	69,2
1490	3,93-0,11i	3,93-10,4i	215	18	0,354	2721	1122	1599	58,8
1493	2,76-0,0557i	2,76-10,3i	199	9	0,258	1911	1097	814	42,6
1495	1,97-0,0285i	1,97-10,3i	191	5	0,189	1368	1085	283	20,7
1496	1,58-0,0183i	1,58-10,3i	189	3	0,152	1095	1081	15	1,3

Tabla 52. Cálculo del rendimiento mediante catálogo del motor de 11 kW

2.2.2.3 Motor 7,5 kW

El cálculo del rendimiento se realiza para el caso B de la estimación de parámetros mediante catálogo:



n (rpm)	I _{2f} (A)	I _{1f} (A)	P _{cu,1} (W)	P _{cu,2} (W)	cosφ ₁	P ₁ (W)	Σ pérd (W)	P ₂ (W)	η 7,5 kW (%)
1440	13,4-1,82i	13,4-9,38i	772	352	0,820	9297	1797	7500	80,7
1456	10,1-1,02i	10,1-8,58i	506	198	0,762	7003	1378	5625	80,3
1465	8,08-0,652i	8,08-8,21i	382	126	0,702	5600	1182	4418	78,9
1472	6,52-0,424i	6,52-7,98i	306	82	0,633	4520	1061	3459	76,5
1477	5,39-0,2895i	5,39-7,85i	261	56	0,566	3736	990	2746	73,5
1482	4,25-0,179i	4,25-7,74i	224	35	0,481	2942	932	2010	68,3
1487	3,08-0,09451i	3,08-7,65i	196	18	0,374	2137	887	1249	58,5
1491	2,14-0,0457i	2,14-7,60i	180	9	0,272	1486	862	624	42,0
1493	1,67-0,0277i	1,67-7,58i	174	5	0,215	1158	852	306	26,4
1495	1,32-0,01718i	1,32-7,57i	170	3	0,171	911	847	65	7,1

Tabla 53. Cálculo del rendimiento mediante catálogo del motor de 7,5 kW

2.3 Catálogo de los motores utilizados

Motores con rotor de jaula 1 LA · Carcasa de aluminio · Ejecución básica

Datos de selección y pedido

Potencia nominal kW	Tamaño	Referencia Complementos de la referencia para tensión y forma constr. en la tabla a pie de página	Clase de rendimiento 	Valores de servicio a potencia nominal			En conexión directa		relación entre		Clase de par CL	Momento de inercia J kg m ²	Peso Forma IM B 3 aprox. kg		
				Velocidad nominal min ⁻¹	Rendimiento η a 4/4 p.c. %	3/4 %	Factor de potencia $\cos \varphi$	Corriente nominal a 400 V A	Par nominal Nm	par de arranque y par nominal				corriente de arranque y corriente nominal	par máximo y par nominal
Motor de bajo consumo según CEMEP "Improved Efficiency" eff2, tipo de protección IP55, clase F 															
3000 min⁻¹, 2 polos, 50 Hz															
0,09 0,12	56 M	1LA7 050-2AA .. 1LA7 053-2AA ..	2	2830 2800	63,0 65,0	62,0 64,0	0,81 0,83	0,26 0,32	0,30 0,41	2,0 2,1	3,7 3,7	2,3 2,4	16 16	0,00015 0,00015	3 3
0,18 0,25	63 M	1LA7 060-2AA .. 1LA7 063-2AA ..	2	2820 2830	63,0 65,0	62,0 65,0	0,82 0,82	0,50 0,68	0,61 0,84	2,0 2,0	3,7 4,0	2,2 2,2	16 16	0,00018 0,00022	4 4
0,37 0,55	71 M	1LA7 070-2AA .. 1LA7 073-2AA ..	2	2740 2800	66,0 71,0	65,0 70,0	0,82 0,82	1,00 1,36	1,3 1,9	2,3 2,5	3,5 4,3	2,3 2,6	16 16	0,00029 0,00041	5 6
0,75 1,1	80 M	1LA7 080-2AA .. 1LA7 083-2AA ..	2	2855 2845	73,0 77,0	72,0 77,0	0,86 0,87	1,73 2,40	2,5 3,7	2,3 2,6	5,6 6,1	2,4 2,7	16 16	0,00079 0,0010	9 11
1,5 2,2	90 S 90 L	1LA7 090-2AA .. 1LA7 096-2AA ..	2	2860 2880	79,0 82,0	80,0 82,0	0,85 0,85	3,25 4,55	5,0 7,3	2,4 2,8	5,5 6,3	2,7 3,1	16 16	0,0014 0,0018	13 16
3	100 L	1LA7 106-2AA ..	2	2890	84,0	84,0	0,85	6,10	9,9	2,8	6,8	3,0	16	0,0035	22
4	112 M	1LA7 113-2AA ..	2	2905	86,0	86,0	0,86	7,80	13	2,6	7,2	2,9	16	0,0059	29
5,5 7,5	132 S 132 M	1LA7 130-2AA .. 1LA7 131-2AA ..	2	2925 2930	86,5 88,0	86,5 88,0	0,89 0,89	10,4 13,8	18 24	2,0 2,3	5,9 6,9	2,8 3,0	16 16	0,015 0,019	39 48
11 15 18,5	160 M 160 M 160 L	1LA7 163-2AA .. 1LA7 164-2AA .. 1LA7 166-2AA ..	2	2940 2940 2940	89,5 90,0 91,0	89,5 90,2 91,2	0,88 0,90 0,91	20,0 26,5 32,0	36 49 60	2,1 2,2 2,4	6,5 6,6 7,0	2,9 3,0 3,1	16 16 16	0,034 0,043 0,051	68 77 86
22	180 M	1LA5 183-2AA ..	2	2940	91,7	91,7	0,88	39,5 ¹⁾	71	2,5	6,9	3,2	16	0,077	113
30 37	200 L	1LA5 206-2AA .. 1LA5 207-2AA ..	2	2945 2945	92,3 92,8	92,3 92,8	0,89 0,89	53,0 65,0 ¹⁾	97 120	2,4 2,4	7,2 7,7	2,8 2,8	16 16	0,14 0,16	159 179
45	225 M	1LA5 223-2AA ..	2	2960	93,6	93,6	0,89	78,0 ¹⁾	145	2,8	7,7	3,4	16	0,20	209
1500 min⁻¹, 4 polos, 50 Hz															
0,06 0,09	56 M	1LA7 050-4AB .. 1LA7 053-4AB ..	2	1350 1350	56,0 58,0	55,0 57,0	0,77 0,77	0,20 0,29	0,42 0,64	1,9 1,9	2,6 2,6	1,9 1,9	13 13	0,00027 0,00027	3 3
0,12 0,18	63 M	1LA7 060-4AB .. 1LA7 063-4AB ..	2	1350 1350	55,0 60,0	54,0 60,0	0,75 0,77	0,42 0,56	0,85 1,3	1,9 1,9	2,8 3,0	2,0 1,9	13 13	0,00029 0,00037	4 4
0,25 0,37	71 M	1LA7 070-4AB .. 1LA7 073-4AB ..	2	1350 1370	60,0 65,0	60,0 65,0	0,78 0,78	0,77 1,06	1,8 2,6	1,9 1,9	3,0 3,3	1,9 2,1	13 13	0,00052 0,00077	5 6
0,55 0,75	80 M	1LA7 080-4AA .. 1LA7 083-4AA ..	2	1395 1395	67,0 72,0	67,0 72,0	0,82 0,81	1,44 1,86	3,8 5,1	2,2 2,3	3,9 4,2	2,2 2,3	16 16	0,0014 0,0017	9 10
1,1 1,5	90 S 90 L	1LA7 090-4AA .. 1LA7 096-4AA ..	2	1415 1420	77,0 79,0	77,0 79,0	0,81 0,81	2,55 3,40	7,4 10	2,3 2,4	4,6 5,3	2,4 2,6	16 16	0,0024 0,0033	13 16
2,2 3	100 L	1LA7 106-4AA .. 1LA7 107-4AA ..	2	1420 1420	82,0 83,0	82,5 83,5	0,82 0,82	4,70 6,40	15 20	2,5 2,7	5,6 5,6	2,8 3,0	16 16	0,0047 0,0055	21 24
4	112 M	1LA7 113-4AA ..	2	1440	85,0	85,5	0,83	8,20	27	2,7	6,0	3,0	16	0,012	31
5,5 7,5	132 S 132 M	1LA7 130-4AA .. 1LA7 133-4AA ..	2	1455 1455	86,0 87,0	86,0 87,5	0,81 0,82	11,4 15,2	36 49	2,5 2,7	6,3 6,7	3,1 3,2	16 16	0,018 0,023	41 49
11 15	160 M 160 L	1LA7 163-4AA .. 1LA7 166-4AA ..	2	1460 1460	88,5 90,0	89,0 90,2	0,84 0,84	21,5 28,5	72 98	2,2 2,6	6,2 6,5	2,7 3,0	16 16	0,043 0,055	73 85
18,5 22	180 M 180 L	1LA5 183-4AA .. 1LA5 186-4AA ..	2	1460 1460	90,5 91,2	90,5 91,2	0,83 0,84	35,5 ¹⁾ 41,5 ¹⁾	121 144	2,3 2,3	7,5 7,5	3,0 3,0	16 16	0,13 0,15	113 123
30 37	200 L	1LA5 207-4AA ..	2	1465	91,8	91,8	0,86	55,0	196	2,6	7,0	3,2	16	0,24	157
45	225 S	1LA5 220-4AA ..	2	1470	92,9	92,9	0,87	66,0 ¹⁾	240	2,8	7,0	3,2	16	0,32	206
45	225 M	1LA5 223-4AA ..	2	1470	93,4	93,4	0,87	80,0 ¹⁾	292	2,8	7,7	3,3	16	0,36	232