



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# PROJECTE FI DE CARRERA

**TÍTOL: Análisis del motor de inducción mediante técnicas de programación no lineal**

**AUTOR: Christian Pasquet Ibañez**

**TITULACIÓ: Ingeniería Técnica Industrial Especialidad Electricidad**

**DIRECTOR: Marcel Torrent i Burgues**

**DEPARTAMENT: Electricidad**

**DATA: Febrero 2010**

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals:  Sí  No

## PROYECTE FI DE CARRERA

### RESUM (màxim 50 línies)

El siguiente proyecto analiza el motor de inducción mediante técnicas de programación no lineal que nos permitan encontrar los parámetros del circuito equivalente en motores trifásicos hasta 90 kW de 2 y 4 polos. En él se desarrollaran los diferentes protocolos y hojas de cálculo con el objetivo de que se pueda utilizar fuera de este proyecto.

Primeramente hemos introducido este proyecto con un estudio sobre los dos pilares del mismo, la programación no lineal y el motor de inducción. Una vez hecho esto se ha pasado a explicar las normativas referentes a los ensayos necesarios para obtener los parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción.

Por otro lado se han analizado 116 motores de hasta 90 KW, de 2 y 4 polos y de eficiencias correspondientes a EFF1 y EFF2 con el programa no lineal desarrollado para este proyecto. A raíz de esto hemos obtenido unos resultados que comparamos, junto con un estudio económico, al final de este trabajo.

Finalmente se han valorado los resultados obtenidos y diferentes aspectos a poder mejorar de cara a una mejor implantación del programa no lineal.

### Paraules clau (màxim 10):

Motor	Inducción	Cálculo	Parámetros
Circuito equivalente	Comparativa	Pérdidas	Programación
Catálogo	Ensayos		

# Índice

Introducción general del proyecto.....	1
Capítulo 1. Programación no lineal.....	2
1.1. Generalidades.....	2
1.2. Software informático.....	3
Capítulo 2. El motor de inducción.....	4
2.1. Generalidades.....	4
2.2. Constitución.....	5
2.3. Funcionamiento como motor.....	6
2.4. Características principales.....	9
2.4.1. Deslizamiento.....	9
2.4.2. Factor de potencia.....	11
2.4.3. Corriente de arranque.....	12
2.4.4. Par de arranque y par máximo.....	12
2.4.5. Rendimiento.....	13
2.5. Circuito equivalente.....	14
2.6. Balance de potencias.....	16
2.7. Curvas características.....	18
2.7.1. Par-Velocidad.....	18
2.7.2. Corriente-Velocidad.....	19
2.7.3. Rendimiento-P/Pn.....	19
2.7.4. Factor de potencia-P/Pn.....	20
Capítulo 3. Descripción del procedimiento para la obtención del circuito equivalente según norma.....	21
3.1. Norma IEC 60034-2-1.....	21
3.1.1. Generalidades.....	21
3.1.2. Consideraciones respecto a las medidas a efectuar.....	21
3.1.3. Ensayos para la medida de la resistencia.....	22
3.1.4. Ensayo de vacío.....	22
3.1.5. Ensayo con el rotor bloqueado.....	24
3.1.6. Determinación del circuito equivalente.....	24
3.1.7. Asignación de pérdidas adicionales.....	28

Capítulo 4. Hojas de cálculo para la determinación del circuito equivalente.....	31
4.1. Introducción .....	31
4.2. Ejecución de la hoja de cálculo .....	31
4.3. Contenido .....	31
4.4. Consideraciones previas .....	32
Capítulo 5. Protocolo para el cálculo del circuito equivalente mediante las hojas de cálculo .....	33
5.1. Introducción .....	33
5.2. Definición del sistema .....	33
5.3. Protocolo .....	36
5.3.1. Iniciando el proceso.....	36
5.3.2. Introducción de datos .....	37
5.3.3. Iniciando el proceso.....	38
5.3.4. Evolución del proceso .....	39
Capítulo 6. Resultados obtenidos .....	41
6.1. Introducción .....	41
6.2. Resultados generales .....	41
6.3. Resultados individuales.....	44
6.4. Parámetros del circuito equivalente.....	45
6.5. Datos de catálogo .....	46
6.6. Error cometido.....	47
6.7. Separación de pérdidas.....	49
Capítulo 7. Estudio económico .....	51
7.1. Introducción .....	51
7.2. Estudio para el ensayo directo.....	51
7.2.1. Motores de potencia nominal de 0,75 kW a 7,5 kW .....	51
7.2.2. Motores de potencia nominal de 9,2 kW a 30 kW .....	52
7.2.3. Motores de potencia nominal de 37 a 90 kW .....	52
Capítulo 8. Conclusiones y perspectivas .....	53
8.1. Introducción .....	53
8.2. Valores iniciales y tensión nominal.....	53
8.3. Pérdidas por rozamiento y pérdidas adicionales .....	54
8.4. Conclusiones finales.....	54
Bibliografía.....	56

## Anexos

Anexo I. Presentación de resultados de los motores analizados.

Anexo II. Presentación de gráficas comparativas de los datos de catálogo, parámetros del circuito equivalente y errores obtenidos en los motores analizados.

## CD-ROM

Hojas de cálculo. Parametizan el circuito equivalente a la vez que imprime las curvas características.

Ficheros de Microsoft Excel. Contienen todas las gráficas comparativas ubicadas en los anexos.

Catálogos técnicos. Fabricantes: ABB y SIEMENS.

Propuesta original del PFC.

Resumen.

Memoria y Anexos.

## Introducción general del proyecto

El siguiente proyecto trata de analizar diferentes motores de inducción con el fin de poder encontrar un método por el cual especificar su circuito equivalente mediante herramientas de programación no lineal, en nuestro caso utilizando Solver de Excel.

En la mayoría de los casos para obtener todas las características de un motor eléctrico se tendrá que someter dicho motor a diferentes ensayos. Las normativas actuales establecen un procedimiento para la obtención del circuito equivalente de motores eléctricos en el cual se ha de aplicar y utilizar un material específico, así como su precisión en caso de aparatos de medidas, también descrito en dichas normas, las cuales veremos en este proyecto. Sin embargo, este procedimiento se vuelve complicado y costoso en casos de motores de potencias elevadas y en casos en los que, por determinados motivos, dichos motores pertenezcan a una cadena de producción o algún caso similar.

La estimación de parámetros de un modelo es un proceso determinante para el correcto modelado del comportamiento un sistema. En el caso de la máquina de inducción trifásica existen diferentes modelos los cuales nos presentan diferentes ventajas y desventajas a la hora de definir ciertos comportamientos. En este proyecto queda establecido el análisis a través del modelo de jaula sencilla, el cual se analizará más adelante. Una vez elegido el modelo, se conoce la cantidad y naturaleza de los parámetros a estimar y se determina si se consideran constantes o variables. El siguiente paso consiste en recopilar los datos necesarios para realizar la estimación, siendo en este caso los datos de catálogo nuestro punto de partida. Por último es necesario aplicar un algoritmo de cálculo que permita la obtención de los parámetros.

Tanto en la adopción del modelo como en la selección de los datos necesarios para realizar la estimación de sus parámetros existen pocas variaciones en la bibliografía especializada, sin embargo, sorprende la enorme variación de propuestas respecto a los algoritmos de cálculo, no observándose hasta el momento una tendencia de referencia.

Este proyecto presenta un método de fácil implementación con una técnica de programación no lineal basada en la resolución de sistemas no lineales mediante un valor objetivo, partiendo de los datos de catálogo de la máquina a modelar.

El presente proyecto se inicia con una descripción breve del principio de funcionamiento de estos sistemas de programación no lineal y con la exposición de diferentes programas que aplican este tipo de cálculo. Posteriormente veremos una descripción breve del principio de funcionamiento y el modelo de la máquina de inducción trifásica.

Más adelante, se detallara un presupuesto del material necesario a fin de conocer la inversión necesaria para la realización de los diferentes ensayos, teniendo en cuenta el rango de potencias de los motores y las diferentes posibilidades en cuanto a los dispositivos de medida que pueden ser utilizados en la medición de las diferentes magnitudes eléctricas.

Por último se aborda la metodología y el proceso de cálculo aplicados a este proyecto, así como los resultados y conclusiones del trabajo presentado en el mismo.

# Capítulo 1. Programación no lineal

## 1.1. Generalidades

Programación no lineal (PNL) es el proceso de resolución de un sistema de igualdades y desigualdades sujetas a un conjunto de restricciones sobre un conjunto de variables reales desconocidas, con una función objetivo a maximizar, cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no son lineales. Aunque los problemas de programación lineal son muy comunes y cubren un amplio rango de aplicaciones, en la vida real uno se tiene que enfrentar con cierta frecuencia a otro tipo de problemas que no son lineales. Cuando el conjunto de restricciones, la función objetivo, o ambos, son no lineales, se dice que se trata de un tipo de problema de programación no lineal (PPNL).

Un problema general de programación no lineal consiste en encontrar los valores de ciertas variables que maximizan o minimizan una función dada, dentro de un conjunto definido por una serie de restricciones de desigualdad, de forma que no hay aseguradas condiciones de linealidad ni sobre la función a optimizar ni sobre las funciones que definen el conjunto dentro del cual buscamos dicho óptimo.

Este tipo de problemas es muy representativo de las circunstancias en las que se desenvuelve la actividad económica. Normalmente, se dispone de cantidades limitadas de recursos, pero sin la obligación de emplearlas en su totalidad, si ello no resultase adecuado. Por consiguiente, es posible pensar en soluciones factibles y óptimas que no saturan necesariamente todas las restricciones, dejando un excedente inutilizado del recurso cuya disponibilidad limitan.

En nuestro caso, el que concierne a este proyecto, la función objetivo tendrá que tomar por valor la potencia nominal del motor a analizar. De esta manera, el conjunto de variables y restricciones entraran en juego con el fin de lograr exactamente el valor de la función objetivo. Esto es posible debido a que en el sistema de ecuaciones las variables están relacionadas de tal manera que al ajustar el valor de la función objetivo, estas variables toman el valor necesario para cumplir tanto las restricciones como el resultado de la misma función objetivo.

El proceso de cálculo básicamente está basado en realizar iteraciones hasta cumplir con todas las restricciones y el valor final buscado. Además está decir, entonces, que como todo proceso de cálculo que se resuelve mediante iteraciones el valor inicial de las variables afecta directamente al número de iteraciones necesarias con el fin de llegar a la solución, haciendo en algunos casos que el proceso sea demasiado lento.

## 1.2. Software informático

Existen hoy en día diferentes paquetes informáticos que nos permiten, con mayor o menor dificultad, aplicar la programación no lineal a problemas de diferentes áreas como pueden ser las matemáticas, la ingeniería, la estadística, la economía, etc.

A continuación veremos algunos de los programas disponibles:

- **Solver de Microsoft Excel:** Adecuado para modelos de dimensiones reducidas. De distribución pública con el paquete de Microsoft Office.
- **NEOS Server for Optimization:** Servidor de libre acceso a diferentes optimizadores. Aconsejable para la resolución esporádica de modelos.
- **WinQSB:** Programa educativo disponible en diversas webs.
- **LINGO:** Comprende una versión de prueba, pero su versión completa es de pago.
- **MINOS, SNOPT, NPSOL:** Laboratorio de optimización de sistemas de la universidad de Stanford. Acceso vía web

Para la realización de este proyecto se ha utilizado el Solver de Microsoft Excel. Las razones por las cuales se ha decidido por este programa son variadas: la fácil utilización que presenta la interface de Excel, la fácil distribución de esta herramienta que hace que se pueda utilizar sin necesidad de instalar software extra, la simplicidad de uso frente a la potencia de cálculo, idioma, etc. Junto con esto, el hecho de que nuestro modelo no sea de una dimensión grande nos ha llevado a optar por esta herramienta en detrimento de las otras que también disponían de una versión gratuita.



# Capítulo 2. El motor de inducción

## 2.1. Generalidades

Hablar del motor de inducción es hablar del motor eléctrico de corriente alterna más utilizado en la actualidad. Según la distribución del mercado por tipo de motor, podemos decir que los motores de corriente alterna dominan las ventas de forma rotunda tal y como queda reflejado en la siguiente gráfica.

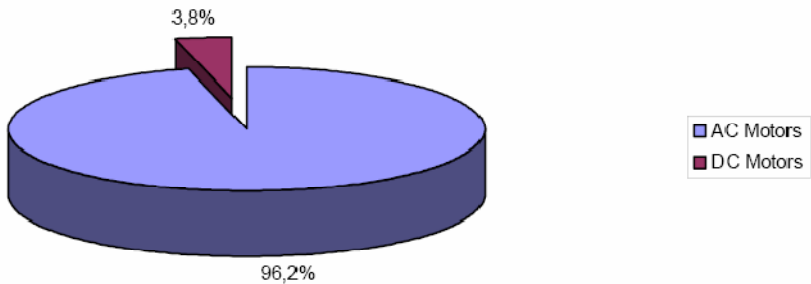


Figura 2.1: Distribución de compras según el tipo de motor en EU-25 [1]

A su vez, los motores de corriente alterna en Europa son en su mayoría motores de inducción de 3 fases, como queda reflejado en la siguiente figura. Los motores de inducción de tres fases pueden tener un mejor comportamiento dinámico al ser alimentados mediante variadores de velocidad, un menor coste y menor mantenimiento.

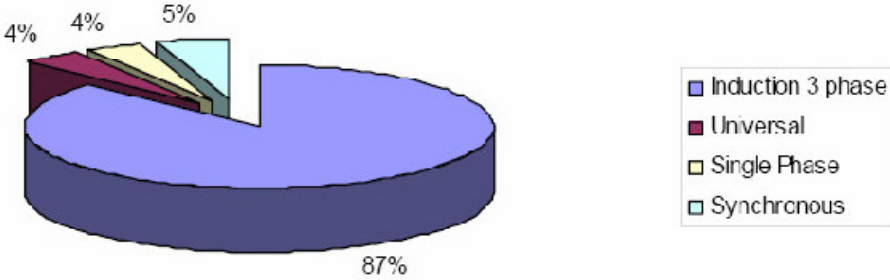


Figura 2.2: Distribución de ingresos en motores AC en EU-25 [1]

Este tipo de motor tiene en todo su rango de potencias un amplio uso, sea en potencias medias o en grandes potencias como son los motores de inducción trifásicos utilizados por la industria. También existen muchas aplicaciones monofásicas para este tipo de motor como pueden ser electrodomésticos o

bombas. La distribución de ventas según potencia la podemos ver en la figura que esta a continuación, donde vemos como el casi 60% de las ventas se registran en potencias entre 0,75 y 7,5 kW.

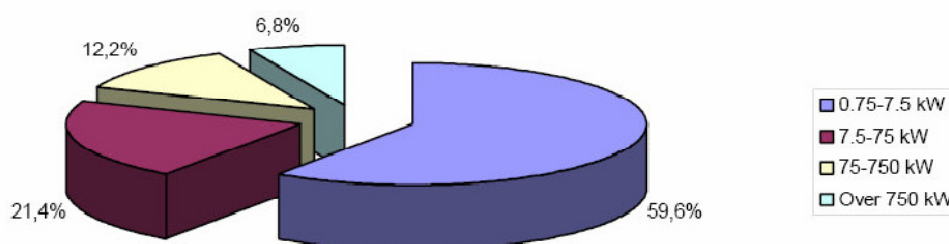


Figura 2.3: Distribución de compras de motores AC según tamaño en EU-25 [1]

## 2.2. Constitución

Un motor de inducción es simplemente un transformador eléctrico cuyo circuito magnético está separado, por medio de un entrehierro, en dos partes: una parte fija llamada estator y otra parte móvil llamada rotor. El estator está formado por un devanado (primario) situado en un núcleo de chapas magnéticas de acero ranuradas. El rotor al igual que el estator, también posee un núcleo de chapas magnéticas ranuradas en el cual se sitúa un devanado (secundario), pero éste, puede que no sea bobinado sino que contenga unas barras de cobre, bronce, o aluminio unidas en los extremos a unos anillos (rotor de jaula de ardilla) que las cortocircuitan. Entre el estator y el rotor existe una separación de aire que debe ser lo más reducida posible, sin que haya roce alguno, y que se denomina entrehierro. Cuando se suministra una corriente alterna, procedente de una red, al devanado primario, se induce una corriente de sentido opuesto en el devanado secundario, produciéndose flujo magnético en el entrehierro, siempre que éste último esté cerrado en cortocircuito o a través de una impedancia exterior. Dicho flujo magnético determina un par de giro sobre el rotor transformando la energía eléctrica en energía mecánica. En los motores asíncronos trifásicos, se hacen circular corrientes alternas que generan un campo magnético sinusoidal que gira sincrónicamente (velocidad de sincronismo) con la frecuencia de la fuente de alimentación del motor.

El motor de inducción en vacío puede llegar a alcanzar velocidades casi iguales a la de sincronismo, pero en el momento en que se aplique carga, la velocidad se reduce a un valor inferior al de sincronismo, de ahí el nombre de motores asíncronos.

La característica esencial que distingue a la máquina de inducción de los otros tipos de motores eléctricos, es que las corrientes secundarias se engendran solamente por inducción, como en un transformador, en vez de ser suministradas por una excitatriz de corriente continua u otra fuente exterior de energía, como en las máquinas sincrónicas y en las de corriente continua.

El tipo de motores que contempla la figura 2.4 son motores asíncronos trifásicos con rotor de jaula de ardilla, como se ha mencionado anteriormente, está formado por un eje y un núcleo de chapas magnéticas prensadas, en cuyo interior, se sitúa el devanado secundario compuesto por barras de aluminio inyectadas (jaula del rotor). El estator, por otro lado, está formado por un bobinado alojado en las ranuras de un núcleo de chapas magnéticas prensadas, protegido de posibles contactos a masa mediante material aislante que puede ser de diferentes tipos dependiendo de las condiciones de trabajo que se exigirán al motor. Se utilizan tres tipos de aislamiento que son: aislamiento clase B, F y H. Por ejemplo, el tipo H se utiliza en condiciones de funcionamiento duras como temperaturas y sobrecargas elevadas. Este tipo de motores tienen unas características que hacen que sea el más utilizado, como por ejemplo, su poco mantenimiento y solidez, su capacidad de mantener una velocidad constante y sobrecarga, o su bajo coste de fabricación.

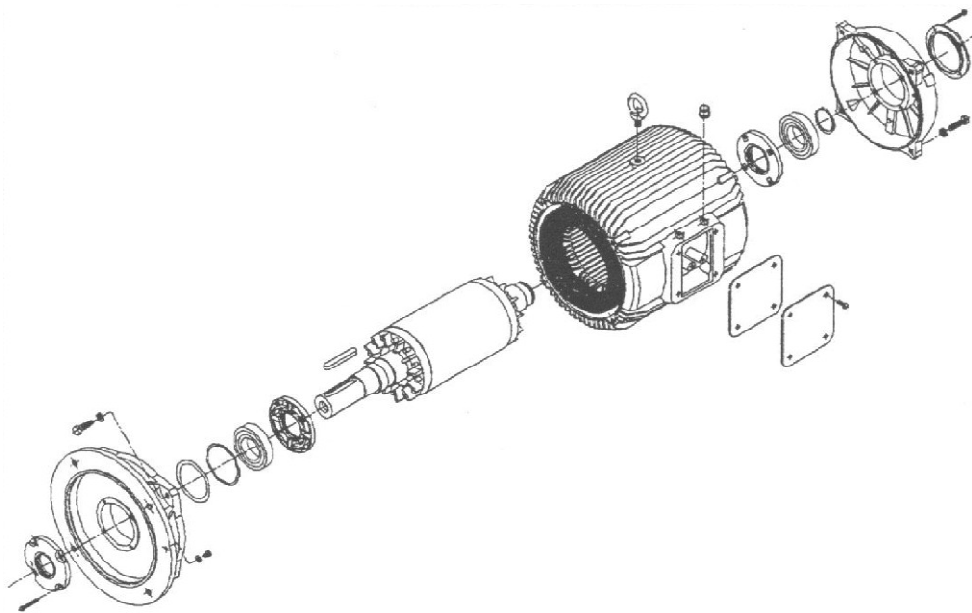


Figura 2.4: Despiece de un motor asíncrono trifásico con rotor de jaula de ardilla [2]

### 2.3. Funcionamiento como motor

El devanado estatórico de  $p$ , pares de polos, es alimentado por el sistema de corrientes trifásicas de la red, de pulsación  $\omega$  [rad/s], creando un campo giratorio de velocidad angular  $\Omega = \omega/p$  [rad/s], que expresada en vueltas por minuto, viene dada por:

$$n_s = \frac{60 \cdot \Omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}]$$

donde  $f$  es la frecuencia de la red en Hz. A esta velocidad se la denomina velocidad sincrónica.

Observando la figura 2.5 se puede recordar el concepto de polo. En el dibujo, las zonas de entrada de las líneas del campo magnético corresponden al polo norte de éste, y las zonas de salida, que corresponderían al polo sur, se situarían a 180 grados. El número de polos viene normalizado y se pueden construir motores de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24 y de hasta 80 polos.

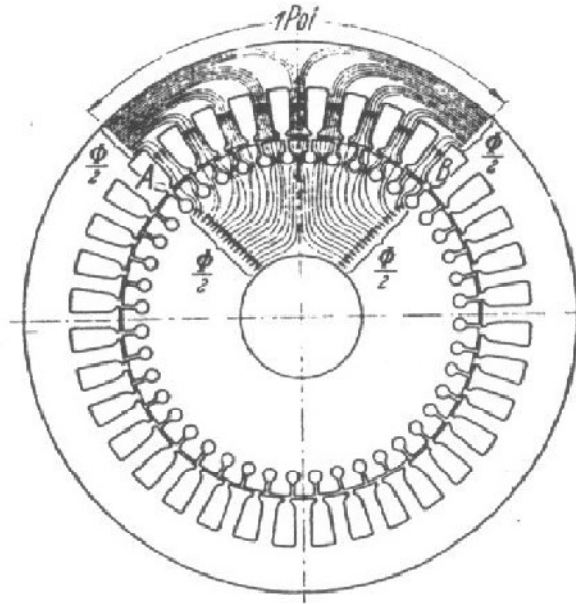


Figura 2.5: Distribución de los polos en una máquina asíncrona

A partir de la velocidad sincrónica puede obtenerse el deslizamiento, que se define como la relación que existe entre la diferencia de velocidad del campo magnético giratorio creado por el devanado estático y del campo inducido en el rotor, y la velocidad del campo inductor creado por el estator, y que puede expresarse de la siguiente forma:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

donde  $n_s$  es la velocidad sincrónica y  $n$  la velocidad del rotor. El deslizamiento viene expresado en %.

La potencia absorbida por el motor es la suma de la potencia útil que proporciona (potencia mecánica) y de las pérdidas totales que se producen en todas las partes que lo componen (pérdidas mecánicas, pérdidas en el hierro, pérdidas en el bobinado del estator, pérdidas en la jaula del rotor y pérdidas adicionales). La potencia nominal se refiere a la potencia mecánica desarrollada en el eje del motor a su velocidad nominal y puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta \quad [\text{W}]$$

donde  $U$  es la tensión de red,  $I$  la corriente de red,  $\cos\varphi$  es el factor de potencia y  $\eta$  es el rendimiento que se define como la relación entre la potencia útil desarrollada por el motor y la potencia total absorbida por éste. La potencia absorbida se refiere a la potencia activa, que la definimos como la proporción de potencia que el motor absorbe de la red para transformarla en energía mecánica o calorífica. La potencia activa se calcula de la siguiente forma:

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad [\text{W}]$$

Para crear un campo magnético cada una de las tres fases del motor debe absorber cierta potencia que no contribuye a la potencia de salida del motor y que por tanto debe ser lo más baja posible. A esta potencia se la denomina potencia reactiva, y se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad [\text{Var}]$$

La potencia activa y reactiva pueden representarse gráficamente como dos vectores desfasados entre sí 90 grados cuyo vector resultante se denomina potencia aparente. La potencia aparente se expresa en VA (voltio-amperio) y se calcula de la siguiente forma:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{VA}]$$

De la relación entre la potencia activa (absorbida) y la potencia aparente se obtiene el factor de potencia:

$$\cos\varphi = \frac{P_{ab}}{S}$$

El momento de giro del motor se expresa en Nm y se obtiene a partir de la potencia y la velocidad nominales del motor mediante la siguiente expresión:

$$M_n = \frac{P_n}{\Omega} \quad [\text{Nm}]$$

Como en el sistema trifásico la suma de los vectores instantáneos de los vectores instantáneos de las tres corrientes es, en cada momento, igual a cero, pueden reducirse por agrupación las seis bornes o conductores, que sería, para un devanado trifásico, a tres. Esta agrupación es factible realizarla de dos formas distintas, denominadas conexión estrella y conexión triángulo.

- a) *Conexión estrella*: Resulta de unir los extremos finales de las tres ranuras en un punto común, llamado neutro o centro de la estrella. La tensión entre bornes es, en este caso, raíz de tres veces la de la fase, mientras que la corriente de línea es la misma que la de la fase. La conexión en estrella se simboliza con el signo Y. Un motor trifásico conectado en estrella a una tensión de alimentación de 380V, quedará sometido a 220V por fase.
- b) *Conexión triángulo*: Resulta de conectar sucesivamente los extremos de las tres ranuras, y los puntos de unión resultantes, con la red. Las tensiones en cada fase del devanado don las mismas que la de la red, mientras que la corriente de línea e raíz de tres veces superior a la de fase. El símbolo  $\Delta$  caracteriza la conexión triángulo.

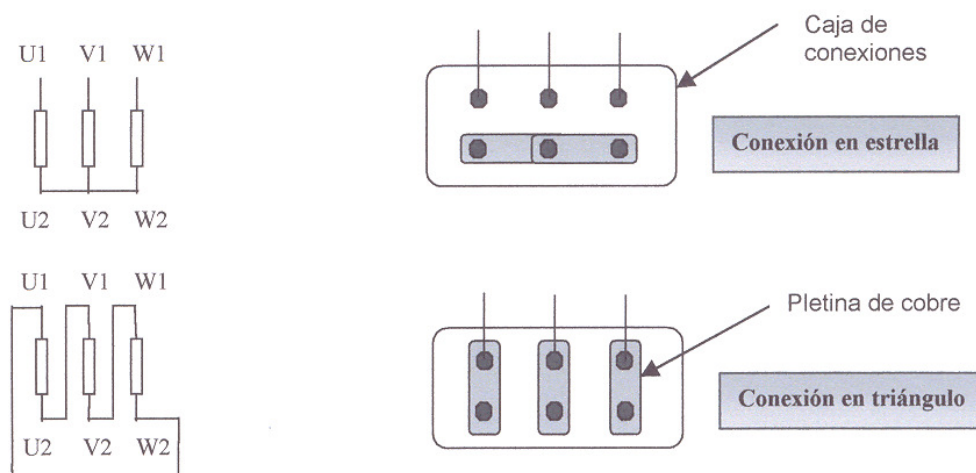


Figura 2.6: Conexionado externo de los motores de inducción

## 2.4. Características principales

### 2.4.1. Deslizamiento

Anteriormente hemos apuntado acerca del deslizamiento. En este punto nos centraremos un poco mas ya que es una de las características más importantes y definen el comportamiento en un motor de inducción.

Existen dos términos que se usan para definir el movimiento relativo del rotor y los campos magnéticos. Uno es la velocidad de deslizamiento, que se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor

$$n_d = n_s - n_m$$

Donde:

$n_d$ , es la velocidad de deslizamiento de la maquina.

$n_s$ , es la velocidad del campo magnético giratorio.

$n_m$ , es la velocidad mecánica del eje del motor.

El otro término utilizado es el deslizamiento, que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o porcentaje, es decir:

$$s = \frac{(n_s - n_m)}{n_s} \cdot 100$$

Al poner en funcionamiento el motor, el rotor está en estado estacionario, por tanto la velocidad es nula ( $n=0$ ) y el deslizamiento es unitario ( $s=1$ ). En cambio cuando el rotor gira a una velocidad nominal, o sea velocidad a una velocidad de sincronismo ( $n_s$ ), el deslizamiento es nulo ( $s=0$ ). Toda la gama de velocidades de funcionamiento del motor de inducción quedan dentro de estos dos límites.

A su vez, dependiendo del valor del deslizamiento, se distinguen tres zonas de funcionamiento distintas que caracterizan a este tipo de motor: zona de funcionamiento como motor, zona de funcionamiento como generador y zona de funcionamiento como freno. El modo de funcionamiento más característico es el de motor y corresponde al rango de deslizamiento comprendido entre  $s=0$  y  $s=1$ . Si tenemos en cuenta este campo de variación de  $s$ , en el régimen motor, podemos decir que:

- La potencia mecánica interna es positiva. Es decir, se transmite energía mecánica al eje.
- La potencia en el entrehierro es positiva, lo que indica un par electromagnético positivo.
- Si la potencia de entrehierro es positiva, entonces, se transfiere energía en el sentido estator-rotor.

Cuando trabaja como generador corresponde a las velocidades superiores a la de sincronismo lo que comporta deslizamientos negativos. El motor de inducción, entonces, funciona como generador recibiendo energía mecánica de un motor externo que gira a una velocidad superior a la del sincronismo entregando energía eléctrica a la red por medio del devanado estático. Trabajando en este régimen, al ser el deslizamiento negativo, tenemos:

- La potencia mecánica interna es negativa. La máquina absorbe potencia mecánica a través del eje.
- La potencia en el entrehierro es negativa, por lo que el par electromagnético cambia de signo respecto al comportamiento como motor.
- Si la potencia en el entrehierro es hace negativa, la transferencia de energía se hace de rotor a estator.

El régimen en zona de freno de una máquina asíncrona se produce para deslizamientos superiores a la unidad, lo que corresponde a velocidades negativas. En esta situación el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio, de tal forma que la máquina recibe energía de la red y energía mecánica a través del eje. Cuando  $s > 1$  resulta:

- La resistencia de carga es negativa y por tanto también es negativa la potencia mecánica interna. La máquina recibe energía mecánica a través del eje.
- La potencia de entrehierro es el cociente de dos cantidades negativas; por consiguiente la potencia es positiva y el par electromagnético, positivo.
- Si la potencia de entrehierro es positiva, quiere decir que se transfiere la energía en el sentido estator-rotor. Por ello la potencia que se absorbe de la red es positiva.

Durante el período de frenado la máquina recibe energía mecánica por medio del eje y también energía eléctrica de la red. Este régimen de frenado se utiliza en la práctica cuando se desea frenar de manera rápida un motor. La maniobra se realiza invirtiendo dos fases de la alimentación, de forma que el campo giratorio pase súbitamente a girar en sentido contrario al del rotor.

#### **2.4.2. Factor de potencia**

El factor de potencia es otra de las características importantes de un motor. Podemos saber cómo nos afecta esta característica mediante las siguientes afirmaciones:

- Un factor de potencia bajo comparado con otro alto, origina, para una misma potencia, una mayor demanda de intensidad, lo que implica la necesidad de utilizar cables de mayor sección.



- La potencia aparente es tanto mayor cuanto más bajo sea el factor de potencia, lo que origina una mayor dimensión de los generadores.

Ambas afirmaciones nos llevan a un mayor coste de la instalación alimentadora. Esto no resulta práctico para la red eléctrica, puesto que el gasto es mayor para un factor de potencia bajo.

Por otro lado, si nos basamos en la curva característica par-velocidad hay tres zonas diferenciadas donde el factor de potencia actúa de una forma diferente. En la primera zona, correspondiente a la región de bajo deslizamiento, la reactancia del rotor es despreciable, por lo que el factor de potencia del rotor es aproximadamente unitario. En la segunda región, correspondiente a la de deslizamiento moderado, la reactancia del rotor tiene el mismo orden de magnitud que la resistencia del rotor, por lo cual el factor de potencia comienza a disminuir. En la tercera región, correspondiente a la de alto deslizamiento, el incremento de la carga aumenta pero el incremento en la corriente del rotor no se percibe debido a la disminución en el factor de potencia.

### 2.4.3. Corriente de arranque

Los motores de inducción se pueden poner en funcionamiento conectándolos directamente a la red eléctrica. Sin embargo, este procedimiento no es el más recomendado ya que la corriente de arranque requerida acusa un pico importante, que puede ser entre 5 y 7 veces la corriente nominal del motor, por lo que debe utilizarse en la práctica algún método para disminuir esta corriente de arranque. Aplicar una tensión reducida mediante arranque estrella-triángulo o mediante convertidores estáticos puede ser una de las variantes.

Esta corriente de arranque puede variar en forma amplia y depende de la potencia nominal del motor y de la efectividad de la resistencia del rotor en condiciones de arranque. Por otro lado, se puede reducir con un circuito de arranque, cosa que también reduciría el par de arranque del motor.

### 2.4.4. Par de arranque y par máximo

Este tipo de motores presenta un par máximo posible que puede desarrollar. Este par, llamado par máximo o par de desviación ( $M_{max}$ ), es dos o tres veces más grande que el par nominal a plena carga. Este par máximo se obtiene cuando la potencia en el entrehierro también es máxima. Esto es debido a que cuando la potencia en el entrehierro es igual a la potencia consumida por la resistencia del rotor  $R_2/s$ , el par máximo se produce cuando la potencia consumida por esta resistencia sea máxima.

El deslizamiento del rotor para el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor. Entonces, vemos que viene definido por la siguiente expresión:

$$s_{Mmax} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X'_{d2})^2}}$$

A pesar que el deslizamiento en el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor, el par máximo es independiente del valor de la resistencia del rotor. Además, el par máximo es proporcional al cuadrado del voltaje suministrado e inversamente al tamaño de las impedancias del estator y de la reactancia del rotor.

En cuanto al par de arranque podemos decir que es un poco mayor al par a plena carga, por lo que este motor puede arrancar con cualquier carga que pueda alimentar a plena potencia.

En este tipo de motores el par máximo, situado en la curva, será de 200% a 250% del par nominal a plena carga y el par de arranque (cuando  $n=0$ ) será de aproximadamente entre 1,1 y 1,5 veces el par nominal.

#### **2.4.5. Rendimiento**

Como en cualquier otro dispositivo de transformación de la energía, existen unas pérdidas, de tal forma que solamente se entrega a la salida una parte de la energía absorbida en la entrada. El rendimiento, o la eficacia, de un motor viene determinado por las pérdidas que se producen en la máquina. Por tanto, se define como el cociente entre la potencia útil (salida) y la potencia absorbida o total (entrada), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}}$$

Al definir la potencia absorbida como la potencia útil mas la pérdidas generadas por el motor podemos definir el rendimiento de esta manera:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{Pérdidas}}$$

## 2.5. Circuito equivalente

Para analizar el funcionamiento en régimen permanente de la máquina de inducción conectada a la red, en cualquier forma de funcionamiento, pueden usarse diferentes circuitos equivalentes de parámetros constantes. En estos circuitos aparecen todos los parámetros de la máquina con sus valores efectivos referidos al estator. En lo que respecta al presente proyecto, utilizaremos uno de los varios modelos para el cálculo y posterior estudio de sus valores.

El circuito equivalente de jaula sencilla es, podríamos decir, el más sencillo y utilizado para el análisis del comportamiento del motor de inducción. A partir del estudio del motor de inducción mediante este modelo podemos predecir con facilidad el comportamiento y características de dicho motor en la región de funcionamiento normal, pero puede presentar errores de comportamiento en el arranque [3], [4], [5], [6].

Para obtener las expresiones de todas las corrientes, tensiones, pérdidas, así como las expresiones que nos determinaran el funcionamiento del motor a continuación haremos un análisis de este modelo.

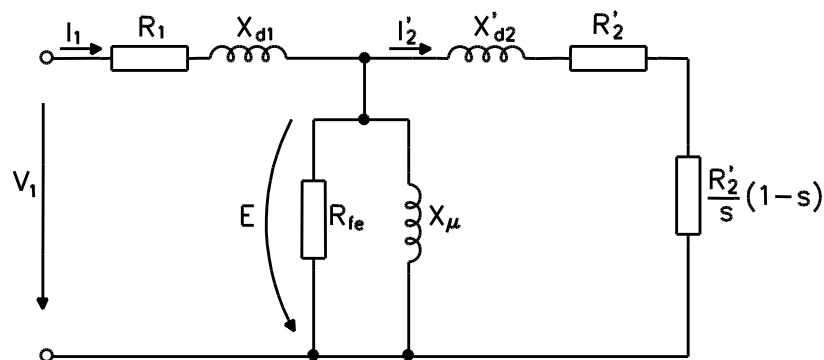


Figura 2.7: Circuito equivalente de jaula sencilla

Donde,

$R_1$ , es la resistencia del estator.

$X_{d1}$ , es la reactancia de dispersión del estator.

$X_\mu$ , es la reactancia de magnetización.

$R_{fe}$ , es la resistencia de pérdidas del hierro.

$X'_{d2}$ , es la reactancia de dispersión del rotor, referida al estator.

$R'_2$ , es la resistencia del rotor, referida al estator.

$V_1$ , es la tensión de alimentación.

$E$ , es la f.e.m. inducida en el rotor.

$I_1$ , es la corriente absorbida.

$I'_2$ , es la corriente del rotor, referida al estator.

$s$ , es el deslizamiento del rotor.

En el circuito equivalente de la figura 2.7 los valores de todas las impedancias son constantes, menos la impedancia rotórica  $Z_2$ , que varía con el deslizamiento:

$$\underline{Z}_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad [\Omega]$$

y el valor que presenta la impedancia desde los terminales del estator:

$$\underline{Z}_t = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{20} \quad [\Omega]$$

donde  $Z_{20}$  es la impedancia equivalente de la rama de magnetización en paralelo con la impedancia secundaria:

$$\underline{Z}_{20} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \quad [\Omega]$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{R_{fe} \cdot jX_\mu}{R_{fe} + jX_\mu} \quad [\Omega]$$

Por tanto, a efectos de análisis, la máquina de inducción se comporta desde los terminales del estator como una impedancia cuyo valor varía con la velocidad. Una vez establecido el valor de esta impedancia es fácil determinar la corriente estatórica:

$$\underline{I}_1 = \frac{V_1}{\underline{Z}_t} \quad [A]$$

con ello, la tensión en bornes de la rama de magnetización y de impedancia secundaria es:

$$\underline{E} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_0 = \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_t} \cdot V_1 \quad [V]$$

Las corrientes por la rama de magnetización resultan:

$$I_{fe} = \frac{\underline{E}}{R_{fe}} = \frac{\underline{Z}_0}{R_{fe} \cdot \underline{Z}_t} \cdot V_1 \quad [\text{A}]$$

$$I_{\mu} = \frac{\underline{E}}{jX_{\mu}} = \frac{\underline{Z}_0}{jX_{\mu} \cdot \underline{Z}_t} \cdot V_1 \quad [\text{A}]$$

$$\underline{I}_0 = I_{fe} + I_{\mu} \quad [\text{A}]$$

Para saber la corriente rotórica hemos de realizar la reducción al equivalente de Thevenin visto desde el rotor, entonces vendría dada por:

$$\underline{V}_{th} = \frac{\underline{V}_1}{R_1 + jX_{d1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}}} \quad [\text{V}]$$

$$\underline{Z}_{th} = \frac{1}{\frac{1}{R_{fe} + jX_{\mu}} + \frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}}} \quad [\Omega]$$

$$\underline{I}'_2 = \frac{\underline{V}_{th}}{\underline{Z}_{th} + \underline{Z}_2} \quad [\text{A}]$$

## 2.6. Balance de potencias

A partir del esquema equivalente por fase y de las impedancias y corrientes calculadas anteriormente tenemos que la potencia absorbida viene dada por:

$$P_{ab} = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad [\text{W}] \quad (2.01)$$

De esta potencia una parte se degrada en calor por efecto Joule en la resistencia  $R_1$ , de cada fase del devanado del primario, la cual, a efectos útiles podemos considerar como una pérdida. A esta potencia la denominamos potencia de pérdidas por efecto Joule en el primario:

$$P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (2.02)$$

La inducción de corrientes de Foucault y el fenómeno de histéresis dan lugar a las denominadas pérdidas en el hierro del estator y vienen expresadas por:

$$P_{fe} = 3 \cdot \frac{E^2}{R_{fe}} \quad [\text{W}] \quad (2.03)$$

Deduciendo de la potencia absorbida las pérdidas por efecto Joule en el estator y las pérdidas en el hierro del estator, tendremos la potencia electromagnética transmitida al secundario. Esta potencia síncrona es:

$$P_s = P_{ab} - P_{j1} - P_{fe} = 3 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I_2'^2 \quad [\text{W}] \quad (2.04)$$

La potencia correspondiente a las pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor, de resistencia por fase  $R'_2$ , bajo la corriente  $I_2$ , es igual a:

$$P_{j2} = 3 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2 = P_s \cdot s \quad [\text{W}] \quad (2.05)$$

Esta potencia síncrona que, con el rotor en reposo y el devanado cerrado sobre sí mismo se disiparía toda ella en calor por efecto Joule, en el rotor en movimiento sólo una parte de ella se pierde por efecto Joule, la correspondiente a la resistencia del devanado rotórico, el resto aparece como potencia mecánica interna del motor:

$$P_{mec} = 3 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot (1 - s) \cdot I_2'^2 = P_s - P_{j2} = P_s \cdot (1 - s) \quad [\text{W}] \quad (2.06)$$

La potencia útil en el eje del motor será algo menor debido a las pérdidas por rozamientos y resistencia del aire (ventilación incluida) provocadas por el giro del rotor, denominadas pérdidas mecánicas, a las cuales, habría que añadir las pérdidas adicionales o suplementarias. Teniendo en cuenta estas últimas pérdidas, queda como potencia útil del sistema:

$$P_u = P_{mec} - P_{freg} - P_{ad} = P_{ab} - \sum \text{Pérdidas} \quad [\text{W}] \quad (2.07)$$

Para finalizar tenemos las pérdidas adicionales,  $P_{ad}$ . Las pérdidas adicionales son pérdidas residuales en el motor, estas son difíciles de determinar por mediación directa o cálculo. Estas pérdidas se producen en carga y generalmente varían con el cuadrado del par.

$$P_{ab} - P_u = \sum \text{Pérdidas}$$

$$P_{ad} = \sum \text{Pérdidas} - P_{j1} - P_{j2} - P_{fe} - P_{freg}$$

Estas pérdidas adicionales se dividen en:

- ⌞ pérdidas del campo principal
  - superficiales
  - pulsación
- ⌞ pérdidas del campo armónico
  - superficiales
  - pulsación
  - inducidas en el devanado del estator debido al rotor

## 2.7. Curvas características

En el presente proyecto se ha trabajado con las 4 curvas características más importantes que describen el funcionamiento del motor de inducción. De las diferentes curvas características que pueden utilizarse para analizar el comportamiento de un motor de inducción y que se utilizan en su proceso de selección para una aplicación determinada, hemos seleccionado las que se han creído las más importantes y por este motivo pasamos a analizarlas a continuación.

### 2.7.1. Par-Velocidad

La curva de par-velocidad del motor de inducción nos brinda valores importantes e información sobre la operación de dichos motores. De aquí y a simple vista podemos determinar y asegurar que:

- El par inducido del motor es cero a velocidad síncrona.
- Es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga.
- Hay un par máximo posible que no se puede exceder que es dos o tres veces el par nominal a plena carga del motor.
- El par de arranque del motor es un poco mayor al par a plena carga.

Así también podemos señalar aquellos puntos más característicos en esta grafica, como son:

- **Funcionamiento en sincronismo ( $s=0$ ;  $M=0$ ):** en este caso la velocidad de rotación del motor es la de sincronismo. El par electromagnético producido en este punto es igual a cero y la máquina a esta velocidad no puede con ningún par resistente.
- **Régimen asignado o nominal ( $s=s_n$ ;  $M=M_n$ ):** corresponde a la velocidad nominal y al par nominal o de plena carga. Se produce generalmente para deslizamientos comprendidos entre el 3% y el 8%, que representan velocidades cercanas a la de sincronismo que se sitúan en la parte derecha de la curva.
- **Funcionamiento a par máximo ( $s=s_m$ ;  $M=M_m$ ):** representa el par máximo o crítico del motor y se produce para deslizamientos comprendidos entre el 15% y el 30%.
- **Régimen de arranque ( $s=1$ ;  $M=M_a$ ):** en este caso la velocidad es cero y corresponde al par de arranque.

### 2.7.2. Corriente-Velocidad

En la curva corriente-velocidad podemos ver la evolución del consumo del motor de inducción para todo su rango de velocidades.

En ella podemos ver los puntos de máximo consumo, que corresponden a los de corriente máxima, y los de menor consumo, correspondientes a los de corriente mínima.

Por tanto, podemos decir con total certeza que se efectuará el máximo consumo en el arranque y el mínimo consumo a velocidades muy cercanas a la velocidad de sincronismo.

### 2.7.3. Rendimiento-P/Pn

Este tipo de grafica nos muestra el rendimiento de la máquina para los distintos puntos de trabajo. Ya hemos podido comprobar que a potencias suministradas altas implican índices de carga altos.

Sin embargo, el equilibrio para un funcionamiento óptimo lo encontramos en el punto de mayor rendimiento, que coincide en la mayoría de los casos en puntos cercanos a  $\frac{3}{4}$  de la carga nominal.



#### **2.7.4. Factor de potencia-P/Pn**

La evolución del factor de potencia respecto al índice de carga tiene un aumento pronunciado de este a medida que aumentamos la carga. A partir de un nivel de carga apreciamos como la mejora del factor de potencia no es tan pronunciada, esto se debe a la saturación del circuito magnético, donde la potencia reactiva consumida por el motor aumenta con diferente relación. El punto donde esto se produce, corresponde curiosamente al punto determinado anteriormente como punto de rendimiento máximo.

## **Capítulo 3. Descripción del procedimiento para la obtención del circuito equivalente según norma**

### **3.1. Norma IEC 60034-2-1**

#### **3.1.1. Generalidades**

Título: Rotating electrical machines.

Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests.

Año de edición: 2007

Organismo: International Electrotechnical Commission.

Normas que reemplaza: IEC 60034-2 (1972) con las enmiendas A1 (1995) y A2 (1996).

El procedimiento para la determinación del circuito equivalente es prácticamente igual a la norma americana IEEE Std 112 (año 2004): IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators.

#### **3.1.2. Consideraciones respecto a las medidas a efectuar**

Con respecto a las mediciones:

- Tensión aplicada: se toma la media aritmética de las tensiones de línea medidas.
- Corriente absorbida: se toma la media aritmética de las corrientes de línea medidas.
- Resistencia: se toma la media aritmética de las resistencias medidas.
- Frecuencia aplicada: se admite una tolerancia del 0,3% respecto la frecuencia nominal.

Respecto a los aparatos de medida:

- Precisión de los aparatos de medida: 0,2%.
- Precisión de los transformadores de medida: 0,3%.
- Precisión en las medidas de par: 0,2%.
- Precisión en las medidas de frecuencia: 0,1%
- Precisión en las medidas de resistencia: 0,2%
- Precisión en las medidas de velocidad: 0,1% o 1 rpm.
- Precisión en las medidas de temperatura: 1°C.

### 3.1.3. Ensayos para la medida de la resistencia

Se mide la resistencia entre los bornes de línea de conexión del motor. Según la conexión, la resistencia de fase será:

- Conexión estrella:  $R_{\text{fase}} = 0,5 R_{\text{medida}}$
- Conexión triángulo:  $R_{\text{fase}} = 1,5 R_{\text{medida}}$

La resistencia medida debe referirse a la temperatura de referencia de 25°C.

Para determinar la temperatura de funcionamiento a la que debe referirse la resistencia, debe usarse alguno de los métodos siguientes:

- Temperatura determinada en el ensayo de resistencia a plena carga.
- Temperatura medida directamente mediante sonda o termopar.
- Asumiendo la temperatura según la clase de aislamiento:
  - Clase B 95°C
  - Clase F 115°C
  - Clase H 135°C

### 3.1.4. Ensayo de vacío

Por medio de este ensayo se podrán determinar las pérdidas en el hierro ( $P_{\text{fe}}$ ) y las pérdidas por rozamientos-ventilación ( $P_{\text{freg}}$ ).

Se obtienen a partir del ensayo en vacío como mínimo a 7 tensiones diferentes, incluida la tensión nominal:

- Como mínimo 4 de estas tensiones deben estar entre el 125% y el 60% de la tensión nominal.
- Como mínimo 3 de estas tensiones deben estar entre el 50% y el 20% de la tensión nominal.
- Debe realizarse el ensayo en orden descendiente de tensiones, desestimando las medidas en el caso de que la corriente aumente.
- Medir la resistencia al finalizar el ensayo.

Se calculan las pérdidas por rozamientos-ventilación ( $P_{\text{freg}}$ ) representando en una gráfica las pérdidas constantes en función de la tensión aplicada en el ensayo de vacío al cuadrado ( $U_0^2$ ). Las pérdidas buscadas corresponden al punto de corte con el eje de ordenadas de la recta de regresión que se obtiene, tal como se indica en la figura 3.1.

Las pérdidas constantes se calculan a partir de:

$$P_{ctn} = P_{abo} - P_{j10}$$

Con:

$$P_{j10} = 3 \cdot R_{fase} \cdot I_{f02}$$

Donde:

$I_{f0}$ , es la corriente de fase durante el ensayo en vacío.

$R_{fase}$ , es la resistencia de fase a la temperatura del ensayo en vacío.

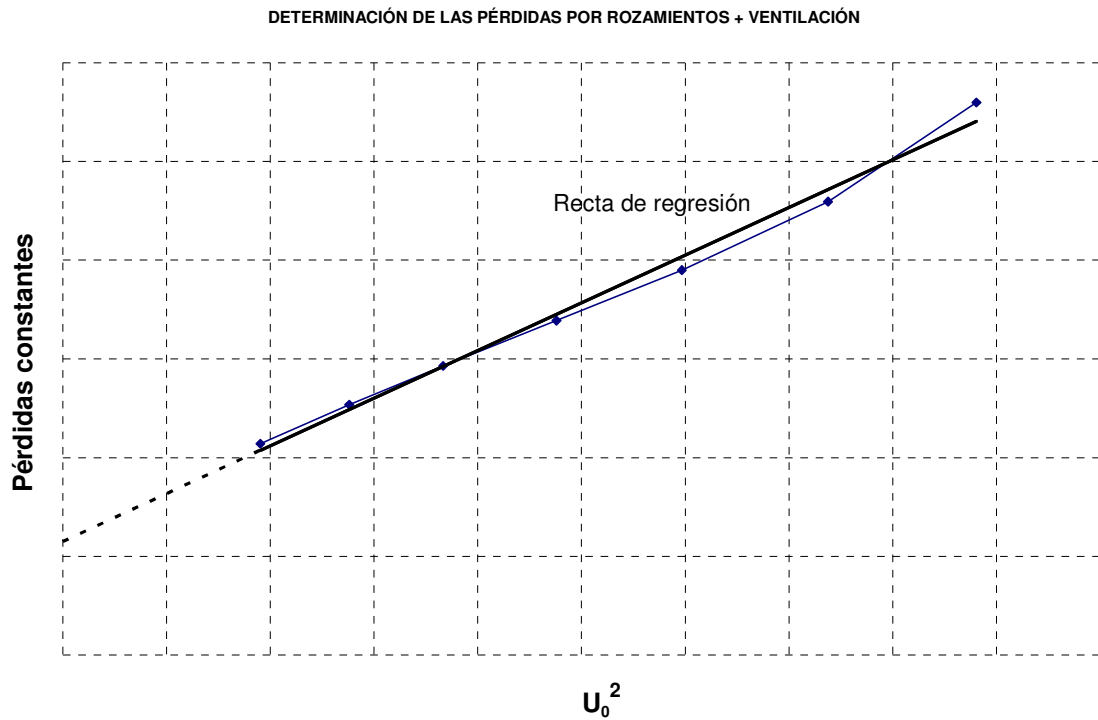


Figura 3.1: Pérdidas constantes a partir del ensayo de vacío.

Para el cálculo de las pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ) debe representarse en primer lugar, a partir del ensayo de vacío, las pérdidas obtenidas ( $P_{fe} = P_{ctn} - P_{freg}$ ) en función de la tensión aplicada ( $U_0$ ), tal como se indica en la figura 3.2.

#### DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN EL HIERRO

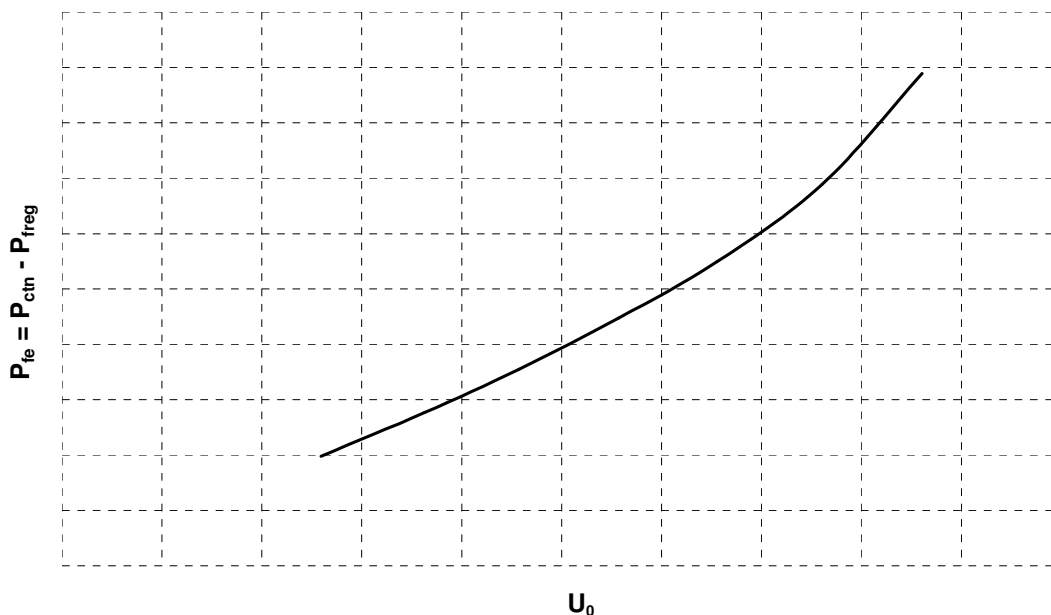


Figura 3.2: Pérdidas en el hierro a partir del ensayo de vacío.

### 3.1.5. Ensayo con el rotor bloqueado

Manteniendo el rotor bloqueado, aplicar la corriente nominal a 3 frecuencias diferentes:

- Una frecuencia alrededor del 25% de la frecuencia nominal.
- Dos frecuencias entre el 25% y el 50% de la frecuencia nominal.
- Durante el ensayo, la temperatura no debe incrementar más de 5K.
- Si no es posible disponer de variador de frecuencia, realizar el ensayo a la frecuencia nominal.

### 3.1.6. Determinación del circuito equivalente

Requiere la realización del ensayo de vacío para determinar las pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ) y las pérdidas por rozamientos-ventilación ( $P_{freg}$ ). Para el cálculo final del rendimiento, si se quieren considerarse las pérdidas adicionales en carga, deben determinarse por alguno de los métodos incluidos en la norma.

#### 3.1.6.1. Determinación de los parámetros del circuito equivalente.

Se calculan los diferentes parámetros del circuito equivalente por fase, según la denominación siguiente:

$R_1$  = resistencia del estator.

$R'_2$  = resistencia del rotor referida al estator.

$X_{d1}$  = reactancia de dispersión del estator.

$X'_{d2}$  = reactancia de dispersión del rotor referida al estator.

$R_{fe}$  = resistencia de pérdidas en el hierro.

$X_{\mu}$  = reactancia magnetizante.

Deben asumirse inicialmente valores para las relaciones  $X_{d1}/X'_{d2}$  (según la clase de motor) y para  $X_{d1}/X_{\mu}$  (habitualmente entre 0,04 y 0,08).

Se calcula  $X_{d1}$  a partir de:

$$X_{d1} = \frac{Q_{cc}}{3 \cdot I_{1n}^2 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{X_{d1}}{X'_{d2}} \right) + \left( \frac{X_{d1}}{X_{\mu}} \right) \right]} \cdot \left[ \left( \frac{X_{d1}}{X'_{d2}} \right) + \left( \frac{X_{d1}}{X_{\mu}} \right) \right]$$

Con:

$Q_{cc}$  = potencia reactiva en el ensayo en cortocircuito.

$I_{1n}$  = corriente de fase nominal.

Posteriormente se calcula  $X_{\mu}$ :

$$X_{\mu} = \frac{3 \cdot V^2}{Q_0 - (3 \cdot X_{d1} \cdot I_{10}^2)} \cdot \frac{1}{\left( 1 + \frac{X_{d1}}{X_{\mu}} \right)^2}$$

Con:

$Q_0$  = potencia reactiva en el ensayo en vacío.

$I_{10}$  = corriente de fase en vacío.

$V$  = tensión de fase nominal.

Si el ensayo de cortocircuito se ha realizado a una frecuencia diferente de la nominal, se recalcula  $X_{d1}$ :

$$X_{d1} = X_{d1}(\text{inicial}) \cdot \frac{f_{\text{nominal}}}{f_{\text{ensayo}}}$$

Se calcula  $X'_{d2}$ :

$$X'_{d2} = \frac{X_{d1}}{X_{d1}/X'_{d2}}$$

Este proceso de cálculo para las reactancias se realiza de forma iterativa hasta que el resultado obtenido no difiere en un 0,1% respecto de los valores asumidos inicialmente.

Se calcula  $R_{fe}$  como sigue:

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot V^2}{P_{fe} \cdot \left(1 + \frac{X_{d1}}{X'_{d2}}\right)^2}$$

Finalmente se calcula  $R'_2$ :

$$R'_2 = \left(\frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{1n}^2} - R_1\right) \cdot \left(1 + \frac{X'_{d2}}{X_\mu}\right)^2 - \left(\frac{X'_{d2}}{X_{d1}}\right)^2 \cdot \left(\frac{X_{d1}^2}{R_{fe}}\right)$$

Con:

$P_{cc}$  = potencia activa en el ensayo en cortocircuito.

Los valores de  $R_1$  y de  $R'_2$  deben referirse a la temperatura de referencia. Si se ha efectuado el ensayo de cortocircuito a diferentes frecuencias, representar gráficamente  $R'_2$  en función de la frecuencia, tomando como valor de  $R'_2$  el punto de corte de la recta de regresión con el valor de frecuencia 0.

### 3.1.6.2. Resolución del circuito equivalente.

Para el punto de carga que desea analizarse, se calcula la impedancia que presenta el motor para el valor del deslizamiento correspondiente:

$$Z_{rotor} = \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'^2_{d2}}$$

$$Y_g = \sqrt{\left(\frac{R'_2/s}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X'_{d2}}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{X_\mu}\right)^2}$$

El paralelo de la rama de vacío con el rotor queda:

$$R_p = \frac{\frac{R'_2/s}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{R_{fe}}}{Y_g^2}$$

$$X_p = \frac{\frac{X'_{d2}}{Z_{rotor}^2} + \frac{1}{X_\mu}}{Y_g^2}$$

Siendo por tanto la impedancia total:

$$Z_{total} = \sqrt{R_{total}^2 + X_{total}^2} \quad \text{con} \quad R_{total} = R_1 + R_p ; \quad X_{total} = X_{d1} + X_p$$

### 3.1.6.3. Cálculo del rendimiento.

Se calcula la corriente del estator ( $I_1$ ) y del rotor referida al estator ( $I'_2$ ):

$$I_1 = \frac{V}{Z_{total}}$$

$$I'_2 = \frac{I_1}{Y_g \cdot Z_{rotor}}$$

A partir de las corrientes se calcula la potencia síncrona ( $P_s$ ) y los diferentes tipos de pérdidas:

$$P_s = 3 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I'^2_2$$

$$P_{fe} = \frac{3 \cdot I^2_1}{Y_g^2 \cdot R_{fe}}$$

$$P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I^2_1$$

$$P_{j2} = 3 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2$$

Para el cálculo de las pérdidas adicionales ( $P_{ad}$ ), se procede como sigue:

$$P_{ad} = P_{ad,n} \cdot \left( \frac{I'_2}{I'_{2n}} \right)^2$$



Con:

$P_{ad,n}$  = pérdidas adicionales en condiciones nominales (obtenidas por alguno de los métodos propuestos en la norma).

$I'_{2n}$  = corriente del rotor referida al estator en condiciones nominales.

$P_{ad}$  = pérdidas adicionales en el punto de trabajo a analizar.

$I'_{2n}$  = corriente del rotor referida al estator en el punto de trabajo a analizar.

Se determina finalmente las pérdidas totales ( $P_{perd,T}$ ), la potencia absorbida ( $P_{ab}$ ), la potencia útil ( $P_{util}$ ) y el rendimiento ( $\eta$ ):

$$P_{perd,T} = P_{j1} + P_{j2} + P_{fe} + P_{freg} + P_{ad}$$

$$P_{ab} = 3 \cdot R_{total} \cdot I_1^2$$

$$P_{util} = P_{ab} - P_{perd,T}$$

$$\eta = \frac{P_{util}}{P_{ab}}$$

### 3.1.7. Asignación de pérdidas adicionales

Si quieren incluirse las pérdidas adicionales, deben determinarse a partir de ensayos, tal como indica la norma, o bien pueden asignarse directamente, siguiendo también las indicaciones de la norma (método más directo).

#### 3.1.7.1. IEC 60034-2-1

Se determinan las pérdidas adicionales a plena carga en % respecto a la potencia absorbida, según la gráfica de la figura 3.3 ( $P_1$  = potencia absorbida,  $P_2$  = potencia útil,  $P_{LL}$  = pérdidas adicionales a plena carga):

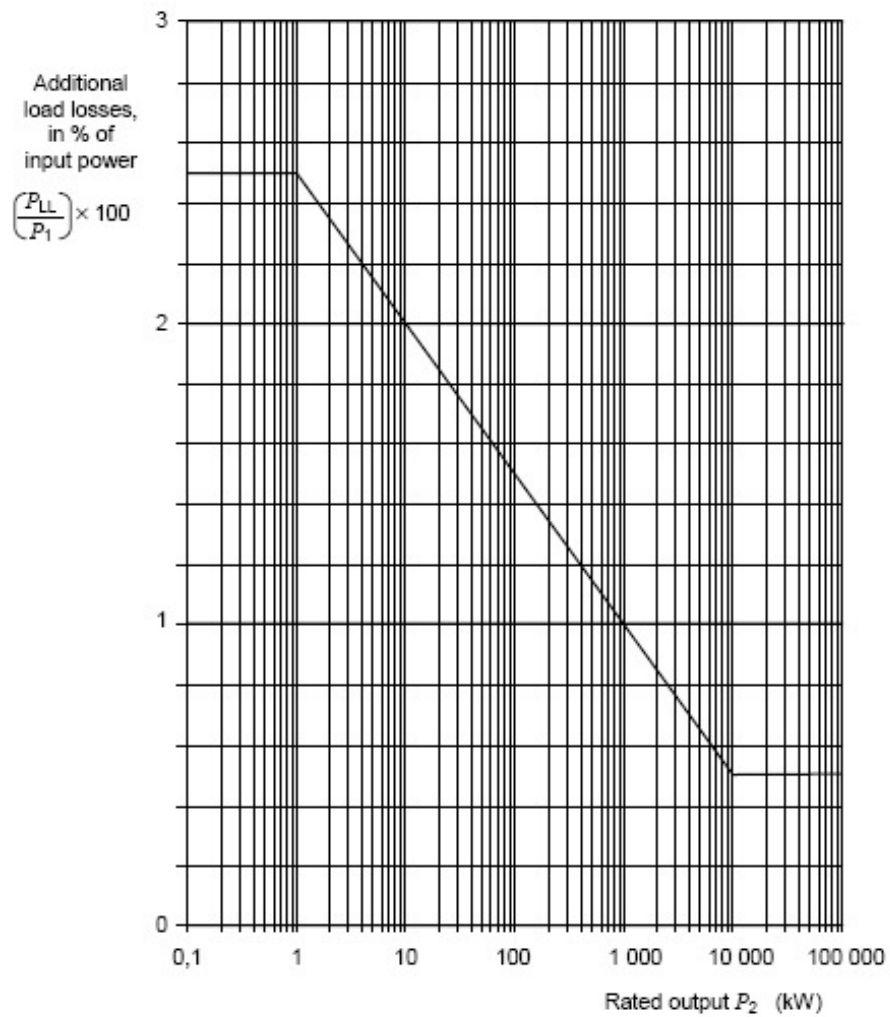


Figura 3.3: Pérdidas adicionales según potencia útil

Los tres tramos de la curva de la figura responden a las relaciones siguientes:

for  $P_2 \leq 1$  kW

$$P_{LL} = P_1 \times 0,025$$

for  $1 \text{ kW} < P_2 < 10\,000$  kW

$$P_{LL} = P_1 \times \left[ 0,025 - 0,005 \log_{10} \left( \frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right]$$

for  $P_2 \geq 10\,000$  kW

$$P_{LL} = P_1 \times 0,005$$

La corrección de estas pérdidas adicionales para puntos de carga diferentes del nominal ( $P'_{LL}$ ), se realiza a partir de la ecuación siguiente, donde  $I_0$  es la corriente de vacío:

$$P'_{LL} = P_{LL} \cdot \left( \frac{\sqrt{I_1^2 - I_0^2}}{\sqrt{I_{1n}^2 - I_0^2}} \right)^2$$

### 3.1.7.2. IEEE 112

Se determinan las pérdidas adicionales a plena carga a partir de la tabla siguiente:

Machine rating kW	Stray-load loss percent of rated load
1–90	1.8%
91–375	1.5%
376–1850	1.2%
1851 and greater	0.9%

La corrección de estas pérdidas adicionales para puntos de carga diferentes del nominal se realiza igual que en el caso anterior.

## Capítulo 4. Hojas de cálculo para la determinación del circuito equivalente

### 4.1. Introducción

Las hojas de cálculo desarrolladas en este proyecto permiten de una forma rápida y sencilla obtener los parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción y a su vez 4 de sus curvas características más importantes con las cuales predecir el comportamiento de dichos motores.

### 4.2. Ejecución de la hoja de cálculo

Para poder utilizar este método y aplicarlo a cualquier otro motor debemos cumplir con algunos requisitos a nivel de software, básicamente por dos razones:

- Deberíamos de tener el complemento Solver de Microsoft Excel instalado en nuestro sistema. De no ser así no podremos efectuar el cálculo ya que nos basamos en este programa para dicha tarea. En caso de tener que instalarlo, el complemento viene en el Cd de Microsoft Office y es muy sencillo de instalar.
- Tendremos que tener nuestro Excel con las macros habilitadas. Este proceso de cálculo fue preparado para que lleve el menor tiempo posible. Para tal fin se ha recurrido a la creación de algunas macros que permiten hacer las tareas más repetitivas de manera casi automática. Por defecto el Excel deshabilita estas macros por razones de seguridad. Necesitaremos entonces habilitar esta opción primero.

### 4.3. Contenido

Cada fichero contiene diferentes pestañas que corresponden a:

- Resultados: En esta hoja podemos ver los resultados finales y es donde se hacen los cálculos.
- Cálculos: Esta hoja solo realiza los cálculos sin parametrizar con el fin de comprar luego los resultados obtenidos con los iniciales.
- M-n: Esta hoja nos muestra la curva Par-Velocidad de nuestro motor.
- M-n (acotado): Esta hoja nos muestra la curva Par-Velocidad en la zona de trabajo del motor.
- I-n: Esta hoja nos muestra la curva Corriente-Velocidad de nuestro motor.
- Fdp-PuPn: Esta hoja nos muestra la curva Factor de potencia-Índice de carga de nuestro motor.

- Rendimiento-PuPn: Esta hoja nos muestra la curva Rendimiento-Índice de carga de nuestro motor.

#### **4.4. Consideraciones previas**

Antes de empezar a trabajar con los cálculos tenemos que saber que:

- Solo tendremos que rellenar el área asignada como Datos del Motor.
- Si fuera el caso que es nuestro primer motor a calcular verificar que los datos introducidos en el área asignada como “Datos iniciales del circuito equivalente” sean los mismos que están en el área designada como “Resultados”
- En esta misma área establecer márgenes iniciales a partir del 70% para realizar el primer cálculo.
- Debido a que es un sistema que se basa en resolver sistemas a base de iteraciones, es importante que los datos iniciales del primer motor sean lo más precisos posibles. De lo contrario corremos el riesgo de que nos de resultados erróneos o que no los encuentre por falta de tiempo.
- Una vez encontrados los resultados de nuestro circuito equivalente, hay que revisar las gráficas por si es necesario realizar algún ajuste, ya que no se ajustan a la zona de trabajo automáticamente.

# Capítulo 5. Protocolo para el cálculo del circuito equivalente mediante las hojas de cálculo

## 5.1. Introducción

Este capítulo presenta una explicación detallada de los pasos a seguir para poder conseguir calcular los parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción cualquiera.

Estas explicaciones estarán basadas en las hojas de cálculo desarrolladas para este proyecto, pero no quiere decir que en algún momento se pueda agregar alguna función para mejorar la autonomía de dicho método.

Se tomará para este ejemplo uno de los motores que se han adaptado mejor a este proceso, por lo que el mismo puede variar en complejidad y tiempo con el resto de motores. En este caso será el motor de ABB de 1,5 kW, 4 polos y EFF2.

## 5.2. Definición del sistema

La siguiente información obtenida de los catálogos es necesaria para determinar los parámetros del circuito equivalente:

- Potencia nominal ( $P_n$ )
- Tensión nominal ( $V_l$ )
- Corriente nominal ( $I_n$ )
- Velocidad síncrona ( $n_s$ )
- Frecuencia ( $f$ )
- Rendimiento ( $\eta$ )
- Factor de potencia ( $\cos\phi$ )
- Corriente de arranque/Corriente nominal ( $I_a/I_n$ )
- Par de arranque/Par nominal ( $M_a/M_n$ )
- Par máximo/Par nominal ( $M_{\max}/M_n$ )

Además de la información obtenida del catálogo son necesarios valores iniciales de los parámetros del circuito equivalente que sean del mismo orden de magnitud que del motor a parametrizar.

Como hemos visto en el Capítulo 1, un sistema de programación no lineal necesita de una celda u operación a maximizar. En este caso el objetivo a encontrar o lograr será:

$$P_n (\text{catálogo}) = P_{\text{útil}} (\text{calculada})$$

A su vez sujeto el sistema a estas restricciones:

$$\text{Cos}\varphi_n + x_1 \geq \mathbf{Cos}\varphi_t \geq \text{Cos}\varphi_n - x_1$$

$$I_n + x_1 \geq \mathbf{I}_{Lt} \geq I_n - x_1$$

$$\eta_n + x_1 \geq \mathbf{\eta} \geq \eta_n - x_1$$

$$Ia/I_n + x_1 \geq \mathbf{Ia/I_n} \geq Ia/I_n - x_1$$

$$Ma/Mn_n + x_1 \geq \mathbf{Ma/Mn} \geq Ma/Mn_n - x_1$$

$$Mmax/Mn_n + x_1 \geq \mathbf{Mmax/Mn} \geq Mmax/Mn_n - x_1$$

$$R_{1i} + x_2 \geq \mathbf{R_{1f}} \geq R_{1i} - x_2$$

$$R'_{2i} + x_3 \geq \mathbf{R'_{2f}} \geq R'_{2i} - x_3$$

$$X_{d1i} + x_4 \geq \mathbf{X_{d1f}} \geq X_{d1i} - x_4$$

$$R_{fei} + x_5 \geq \mathbf{R_{fef}} \geq R_{fei} - x_5$$

$$X_{\mu i} + x_6 \geq \mathbf{X_{\mu f}} \geq X_{\mu i} - x_6$$

$$P_{freg i} + x_7 \geq \mathbf{P_{freg f}} \geq P_{freg i} - x_7$$

$$P_{adi} + x_8 \geq \mathbf{P_{adf}} \geq P_{adi} - x_8$$

Dónde:

- Los valores en negrita son los resultantes de la parametrización, o sea, los resultados.
- Los valores que no están en negrita son los valores iniciales.
- $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$  y  $x_8$  son los valores en porcentaje del error permitido.

Así, una vez definido todos los datos y restricciones, el programa comienza el proceso de cálculo con la estructura que se muestra en la figura 5.1:

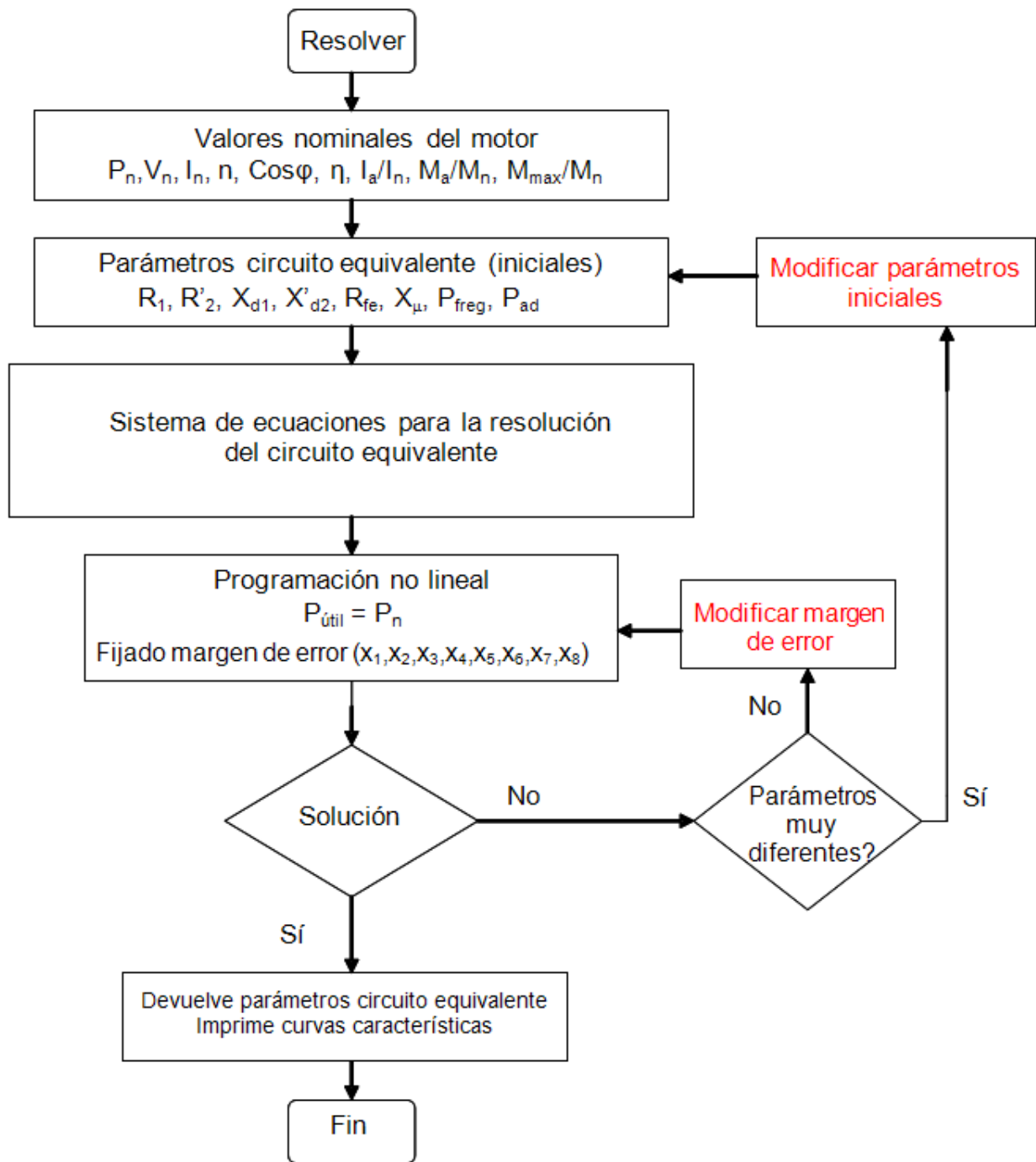


Figura 5.1: Estructura del programa no lineal para la parametrización del circuito equivalente

Donde las acciones marcadas en color rojo las realiza el usuario y no son realizadas automáticamente por el programa.





### 5.3.2. Introducción de datos

El siguiente paso es la introducción de las características nominales y los valores iniciales del motor a analizar. En este caso, para este ejemplo, introduciremos los datos del motor mencionado anteriormente. Por tanto una vez rellenada esta ficha quedaría como queda reflejado en la figura 5.3.

Dades del motor			
Motor	ABB 1,5 kW - Clase B - EFF2		
Nº fases	3		
Tensions	400	V	
Corrent	3,45	A	
Potència	1500	W	
Velocitat	1420	rpm	
Freqüència	50	Hz	
$X_{d1}/X'_{d2}$	0,67		
		Marge Sup.	Marge Inf.
Rendiment	0,803	0,819	0,787
Cos $\varphi$	0,79	0,806	0,774
$I_a/I_n$	5	5,100	4,900
$M_a/M_n$	2,4	2,448	2,352
$M_{max}/M_n$	2,9	2,958	2,842
$I_n$	3,45	3,519	3,381

Figura 5.3: Introducción de datos nominales del motor

En este punto cabe aclarar que solo deberemos de rellenar las columnas que anteriormente estaban con valor 1. Las columnas de Márgenes no se deberán tocar ya que sus valores se generan automáticamente al introducir los datos. También decir que, en este proyecto se han trabajado con motores de clase B únicamente, en caso de querer introducir otro tipo de clase solo deberíamos de cambiar la casilla destinada a tal fin ( $X_{d1}/X'_{d2}$ ).

A continuación deberemos introducir los valores iniciales de cálculo (aproximados) del circuito equivalente. Esto lo efectuaremos en la otra ficha de entrada de datos como vemos en la figura 5.4.

Dades inicials del circuit equivalent				
		Marge Sup.	Marge Inf.	Marge
R1	27,367	51,9968	2,7367	90
R'2n	19,210	36,4981	1,9210	90
$X_{d1}$	16,906	32,1216	1,6906	90
$X'_{d2n}$	25,233	47,9426	2,5233	90
Rfe	6420,887	12199,6853	642,0887	90
$X_{\mu}$	482,826	917,3698	48,2826	90
Pfreg n	6037,593	11471,4263	603,7593	90
Pad n	7043,525	13382,6974	704,3525	90

Figura 5.4: Introducción de datos iniciales del circuito equivalente

En este punto cabe hacer algunas aclaraciones:

- Solo se deberán de rellenar las casillas desde  $R_1$  a  $X_\mu$ , ya que las otras dos ( $P_{fregn}$  y  $P_{adn}$ ) se ajustarán de forma automática.
- Por la naturaleza del proceso de cálculo es recomendable que estos valores iniciales sean lo más parecidos, en orden de magnitud, a la realidad posible.
- En la columna “Marge” definiremos el margen inicial en 90 (90%). Al hacer esto veremos que las columnas “Marge Sup.” y “Marge Inf.”, se ajustan automáticamente.

Por último, para terminar con la introducción de datos, el proceso de cálculo nos exige tener en la tabla de resultados algunos datos de partida con los que iniciar el proceso. Por tanto, asignaremos los mismos valores de partida a la tabla de resultados que los que asignamos al circuito equivalente. Esto solo lo tendremos que hacer una sola vez, la primera. En la figura 5.5 se muestra como quedaría la tabla de resultados.

Resultats	
R1	27,367
R'2	19,210
Xd1	16,906
X'd2	25,2330
Rfe	6420,887
X $\mu$	482,826
Pfreg	11,830
Pad	13,468
Vfase	400,0000
f	50,0000
p	2,0000
Inom	2,2888
Ld1	0,0538
L'd2	0,0803
L $\mu$	1,5369

Figura 5.5: Tabla de resultados al iniciar el proceso

### 5.3.3. Iniciando el proceso

Una vez ingresados todos los valores con los que el programa trabajará, podemos adentrarnos en el proceso de cálculo propiamente dicho.

Para esto se han diseñado unas macros (acciones repetitivas que se harán de forma automática) que son las que pasaremos a explicar antes que nada.

Para ingresar a las macros en Microsoft Excel debemos presionar la combinación ALT+F8. Una vez abierta la ventana de macros nos encontramos con lo siguiente:

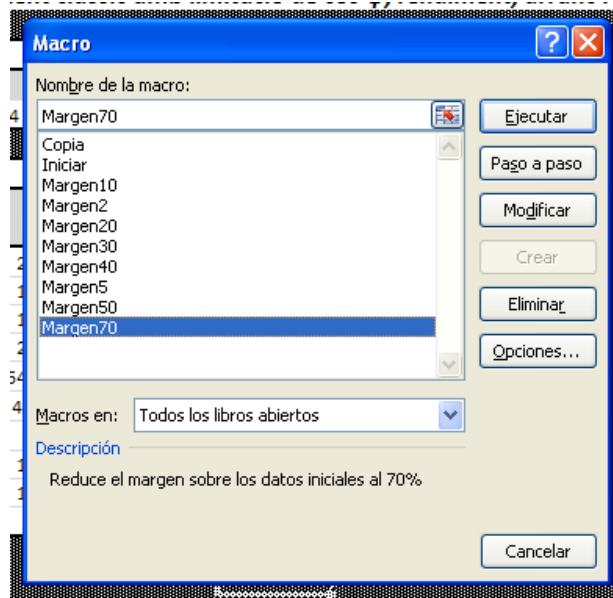


Figura 5.6: Ventana de macros

Donde:

- Copia: Realiza una copia de los valores introducidos a la hoja de Cálculos
- Iniciar: Copia los Resultados obtenidos en un cálculo a los valores iniciales del circuito equivalente para realizar el cálculo con el motor siguiente
- Margen2: Aplica un margen de error del 2% a los valores nominales del motor
- Margen5: Aplica un margen de error del 5% a los valores nominales del motor
- Margen10: Aplica un margen de error del 10% a los valores nominales del motor
- Margen20: Aplica un margen de error del 20 % a los valores nominales del motor
- Margen30: Aplica un margen del 30% a los valores iniciales del circuito equivalente
- Margen40: Aplica un margen del 40% a los valores iniciales del circuito equivalente
- Margen50: Aplica un margen del 50% a los valores iniciales del circuito equivalente
- Margen70: Aplica un margen del 70% a los valores iniciales del circuito equivalente

Una vez que ya sabemos cómo funcionan las macros ya estamos listos para iniciar el proceso.

#### 5.3.4. Evolución del proceso

En este punto, estando en el mismo proceso, el objetivo es llegar a obtener los resultados de los parámetros del circuito equivalente con un margen de error aplicado (tanto sobre valores iniciales como sobre datos nominales) lo mas inferior posible.

Por tanto, seguiremos la estructura mostrada en la figura 5.1 y ajustando márgenes de error hasta el punto en que dichos márgenes ya no puedan ser reducidos. Sin embargo es importante establecer prioridades en el reajuste de márgenes. Por este motivo, a continuación, se mostrará una lista en la cual detallaremos en orden de prioridad los márgenes que se han de ajustar primero y que es la metodología que se ha aplicado para este proyecto.

Esta lista se basa en hechos experimentales y surge como consecuencia de las reiteradas pruebas que se le han ido haciendo al programa, con lo cual no quiere decir que sea una guía infalible a llevar a cabo.

Entonces, con el fin de llegar a la mejor solución posible introducimos la siguiente guía:

1. Establecer márgenes sobre datos de catálogo al 2% y sobre valores iniciales al 70%
2. En caso de hallar solución ir reduciendo márgenes sobre valores iniciales (en orden descendente de la tabla), dando prioridad a  $P_{\text{freg}}$  y  $P_{\text{ad}}$ .
3. En caso de no lograr rebajar los márgenes sobre valores iniciales al 50% y sobre  $P_{\text{freg}}$  y  $P_{\text{ad}}$  al 20%, ampliaremos directamente el margen sobre los datos de catálogo al 5% y repetimos el paso anterior.
4. En caso de poder rebajar los márgenes sobre los valores iniciales al 50% y sobre  $P_{\text{freg}}$  y  $P_{\text{ad}}$  al 20%, intentaremos seguir reduciendo pero a partir de aquí ya podríamos dar por válido el resultado.
5. Repetiremos los pasos 2 y 3, ó 4 según el caso, hasta hallar la solución.
6. Si no logramos hallar la solución tendremos que ir aumentando los márgenes sobre los datos de catálogo a 10% o 20% según haga falta.
7. Si, aumentado al 20% el margen sobre los datos de catálogo, seguimos sin encontrar solución, podremos aumentar hasta el 30% pero los resultados ya serán lo suficientemente distorsionados como para no estar seguros de la efectividad del método.
8. Una vez hallada la solución, se imprimirán las curvas características del motor en las pestañas diseñadas para ello.

## Capítulo 6. Resultados obtenidos

### 6.1. Introducción

Para el estudio y análisis de este proyecto se ha aplicado el mismo método de cálculo a una cantidad de 116 motores de diferentes potencias y firmas, con el objetivo de comparar y contrastar los resultados.

Se han seleccionado para este proyecto motores de un rango de potencias que va de los 1,1 kW hasta los 90 kW, todos de 400 V de tensión nominal. En algunos casos, y dependiendo del fabricante, no se ha llegado a los 90 kW ya que no los comercializan. Así mismo, solo se han tenido en cuenta para este estudio motores de 2 y 4 polos, y las clases de eficiencias EFF1 y EFF2 [7].

Los datos de partida de los motores seleccionados han sido extraídos de sus respectivos catálogos proporcionados directamente por el fabricante. Por este motivo, dado los datos iniciales que se necesitaban, se ha trabajado con motores SIEMENS [8] y ABB [9].

### 6.2. Resultados generales

En el total de los 116 motores en los que se ha trabajado se han obtenido diferentes resultados en cuanto al margen aplicado sobre los datos de catálogo, según lo expuesto en el Capítulo 5. En la Figura 6.1 podemos ver la distribución de los motores en cuanto a esto. Cabe aclarar que para esta distribución se han tenido en cuenta todos los motores, sin clasificar por la cantidad de polos ni por el tipo de eficiencia.

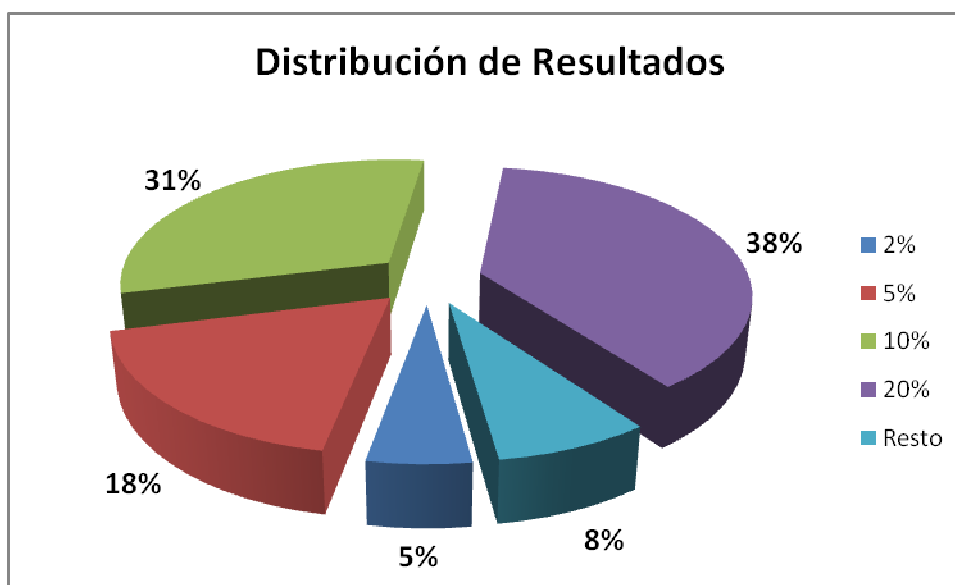


Figura 6.1: Distribución de resultados.

La porción correspondiente al “Resto”, son aquellos motores en los cuales se ha tenido que superar un margen del 20% en los datos de catálogo. Se ha considerado calificarlo de esta manera ya que no son muchos los motores que han superado este margen.

Si nos fijamos en la distribución de resultados según el número de polos vemos que se distribuyen según las figura 6.2 y 6.3. En este caso cabe aclarar que la cantidad de motores de 2 polos es igual a la cantidad de motores de 4 polos calculados, siendo en ambos casos de 58 motores.

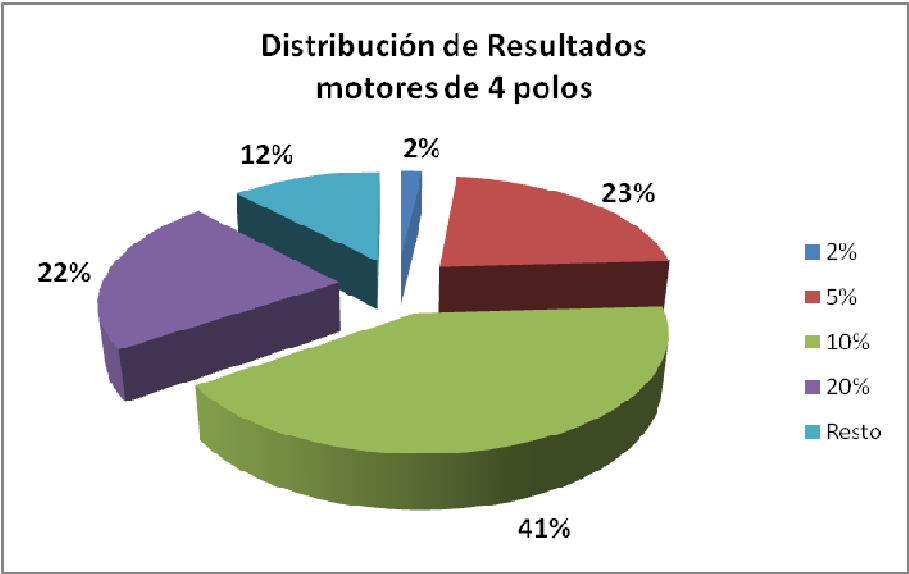


Figura 6.2: Distribución de resultados para motores de 4 polos

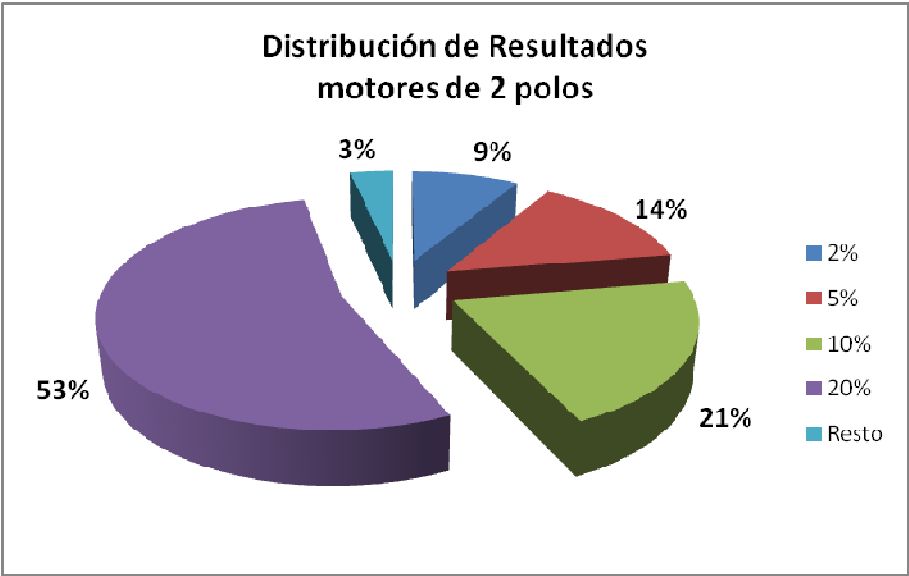


Figura 6.3: Distribución de resultados para motores de 2 polos

También y como complemento a lo anterior podemos ver como se distribuyen los resultados de acuerdo a la clase de eficiencia. Por tanto se ha hecho una separación y clasificación de resultados sin tener en cuenta el número de polos. Por tanto, en la figura 6.4, no se discrimina entre motores de 4 polos y de 2 polos, sino por EFF1 y EFF2.

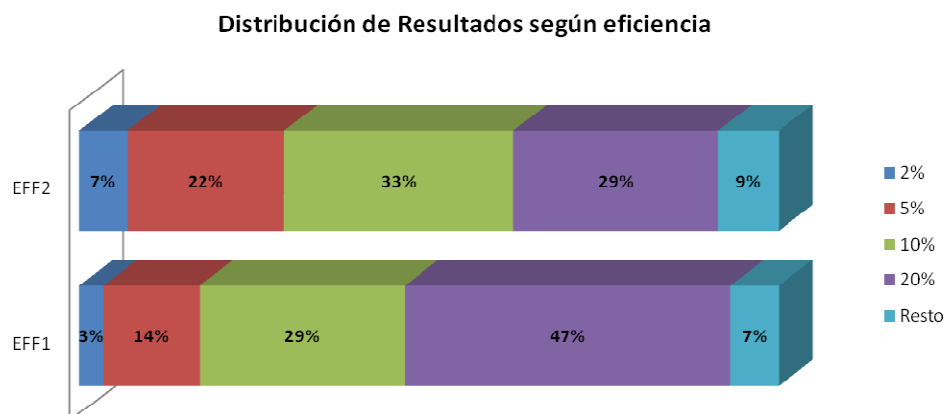


Figura 6.4: Distribución de resultados según eficiencia

Por último y para tener una visión general de estos resultados se ha hecho una clasificación por número de polos y eficiencia. En esta comparación ya tenemos un panorama general y más específico de cómo se han resuelto los diferentes circuitos equivalentes y por tanto podemos ser más correctos a la hora de dar algún tipo de valoración.

Así entonces, en la figura 6.5 podemos ver esta comparación más específica.

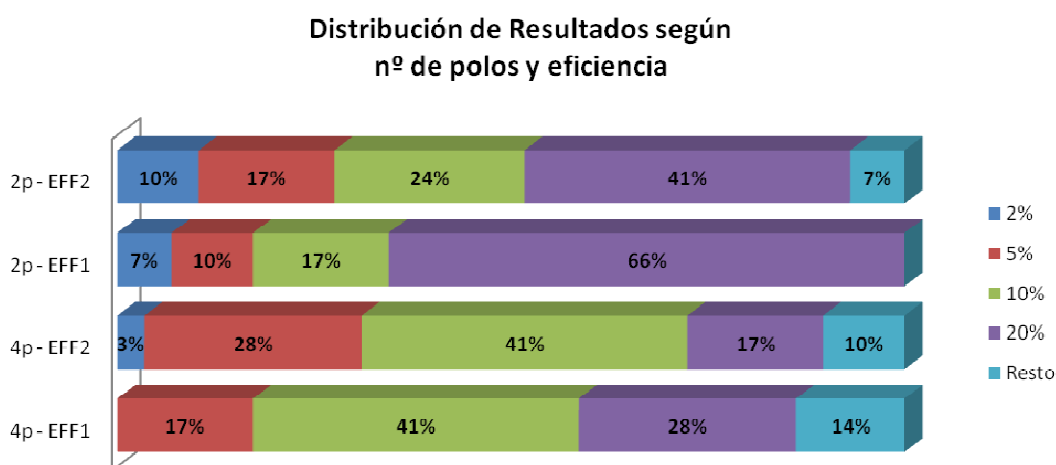


Figura 6.5: Distribución de resultados según nº de polos y eficiencia

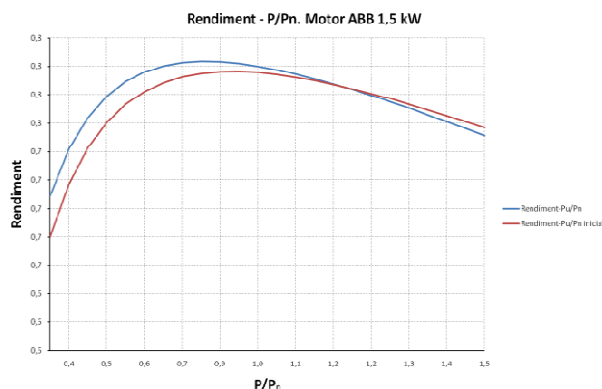
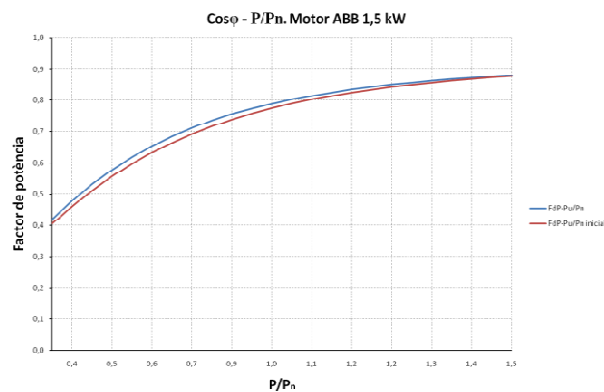
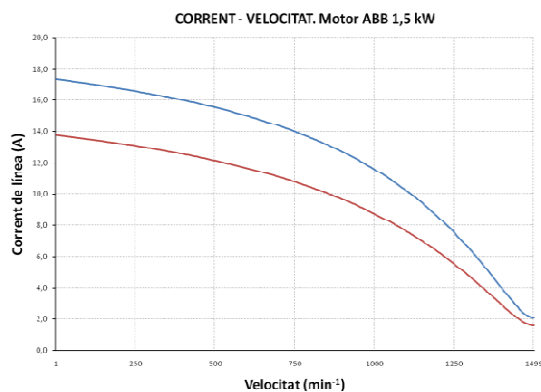
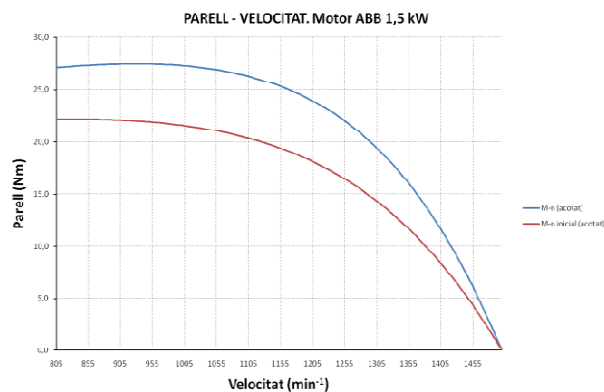
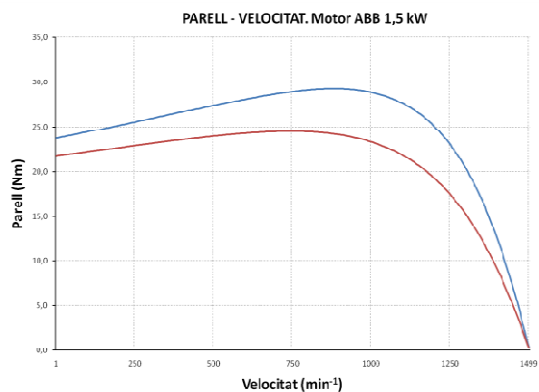


### 6.3. Resultados individuales

A continuación veremos los resultados obtenidos para un motor en particular. Con estos resultados podremos darnos una idea de los resultados que se pueden llegar a obtener en el resto de motores, ya que si bien difieren en número de polos y eficiencia, las curvas características son muy similares, dependiendo de cada motor en particular los valores de dichas gráficas.

El resto de curvas características obtenidas de los 116 motores a los que les hemos aplicado este proceso se encuentran en el Anexo I de este proyecto.

Para este caso en particular tomaremos como ejemplo el motor de ABB de 1,5 kW, 4 polos y EFF2. Por tanto las curvas características obtenidas se muestran en las figuras siguientes, siendo el color azul correspondiente a los resultados obtenidos y el color rojo correspondiente a los valores iniciales con los que se inicia el cálculo.

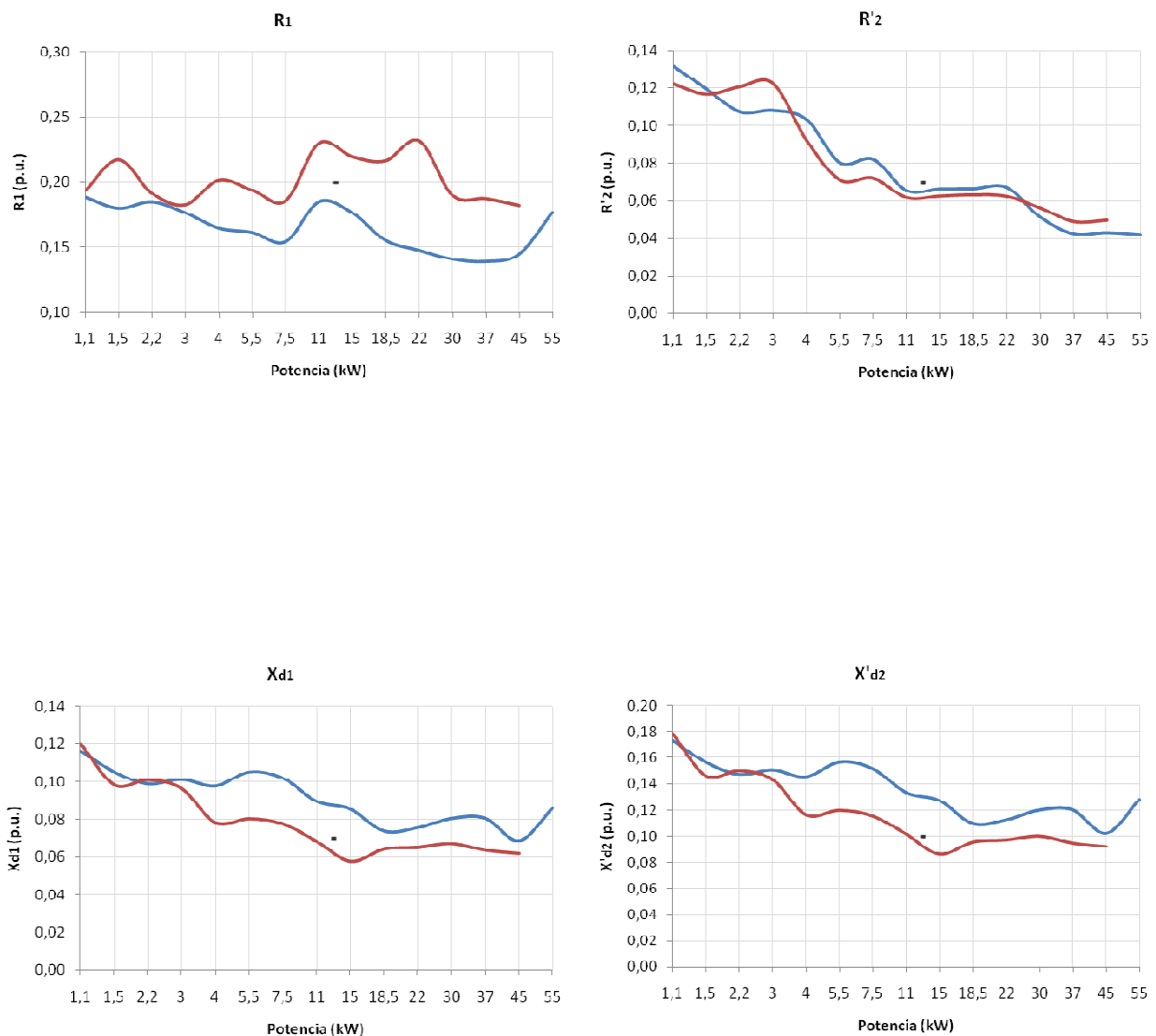


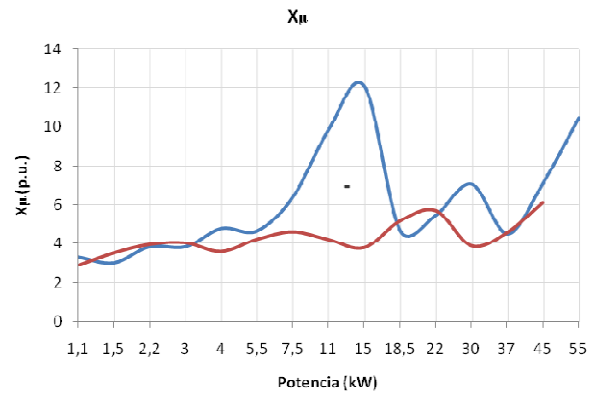
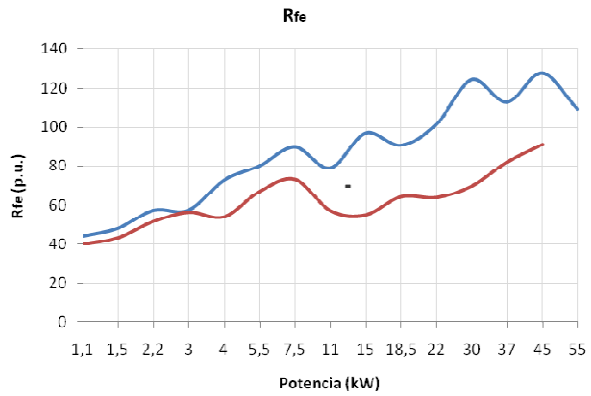
## 6.4. Parámetros del circuito equivalente

En este apartado veremos los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros calculados del circuito equivalente.

Vale puntualizar antes de entrar en los propios resultados que para una mejor comprensión de los mismos se han expresado en valores p.u., ya que las magnitudes varían según la potencia de cada motor y nos sería imposible compararlos.

En este caso nos centraremos en los resultados de los motores de 4 polos y eficiencia EFF2, dejando la totalidad de los resultados plasmados en el Anexo II.





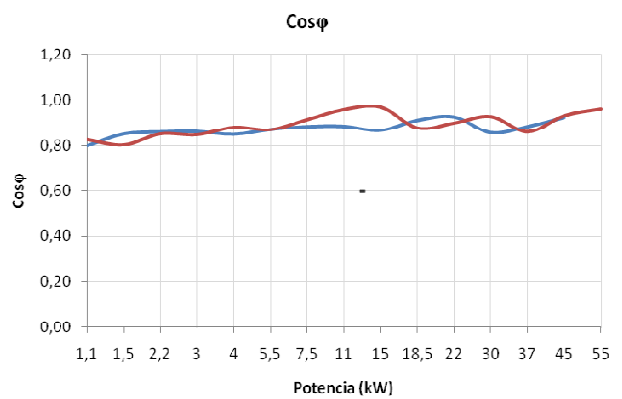
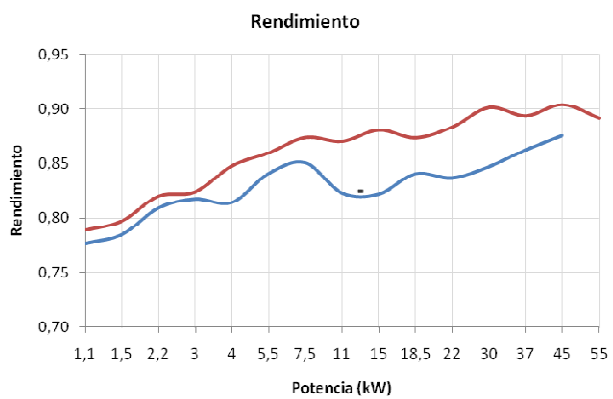
— ABB  
— Siemens

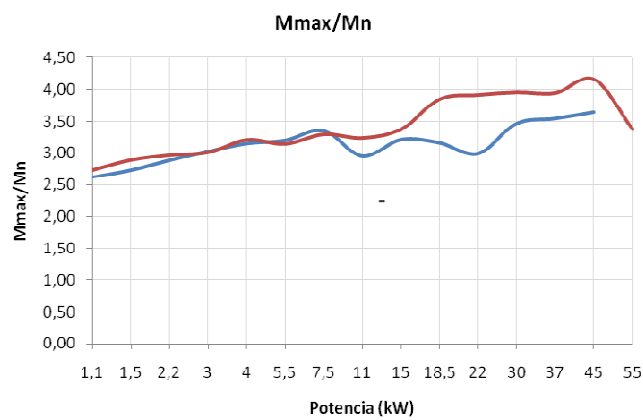
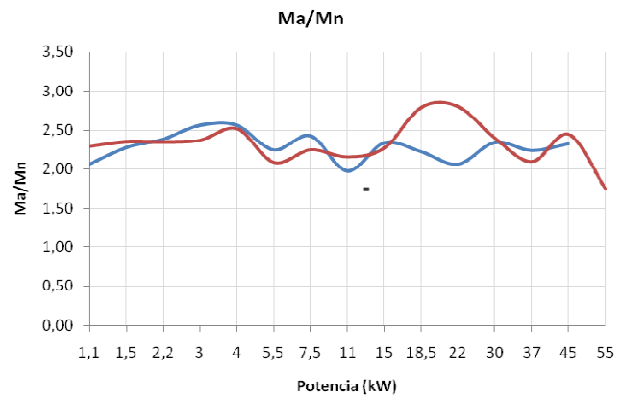
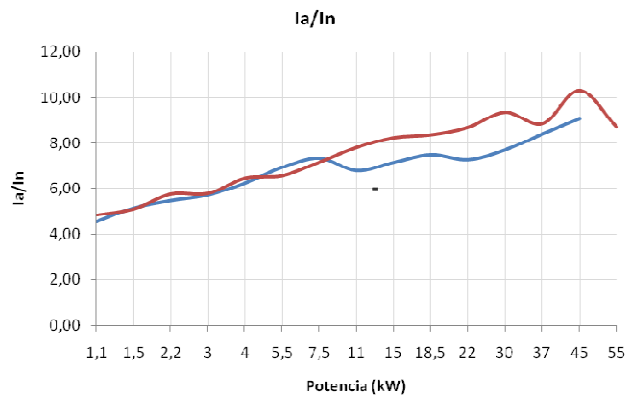
## 6.5. Datos de catálogo

Además de los resultados en los parámetros del circuito equivalente que vimos anteriormente, también son importantes en este estudio los valores obtenidos en el cálculo de aquellos parámetros del motor que se indican en sus catálogos.

Por este motivo a continuación podemos ver estos resultados para los motores de 4 polos y eficiencia EFF2, de los dos fabricantes.

El resto de las gráficas las adjuntamos en el Anexo II.





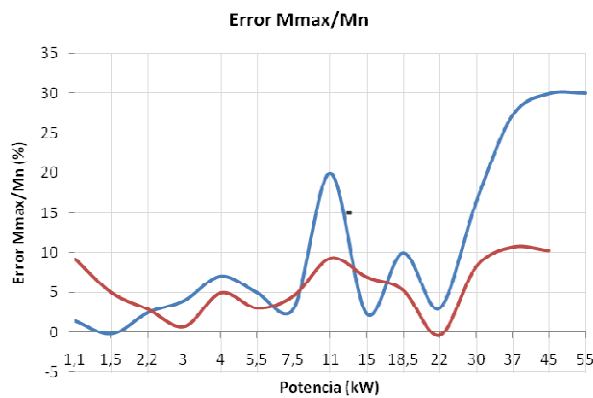
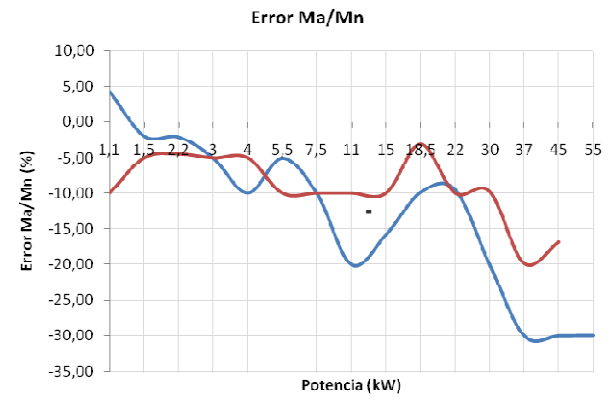
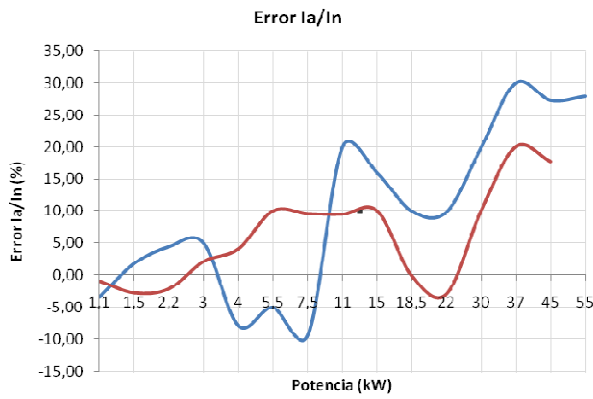
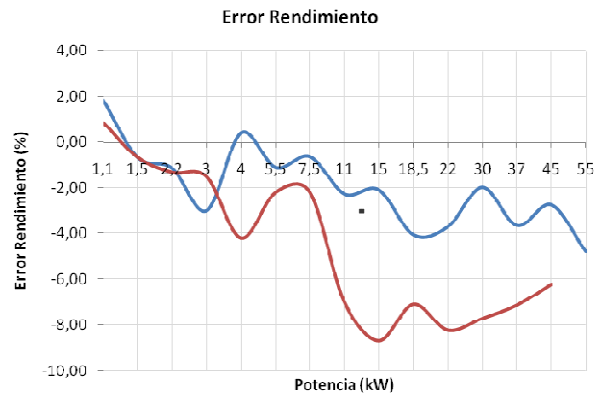
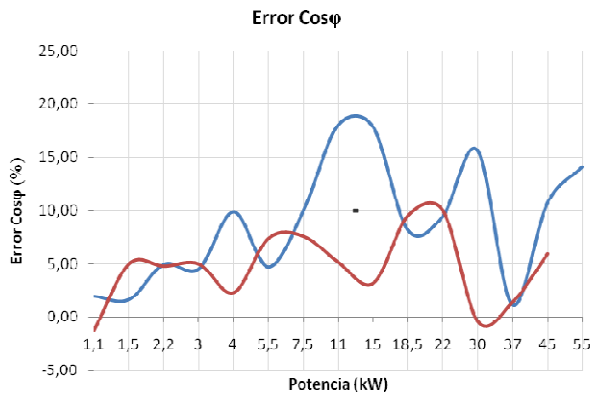
— Siemens  
— ABB

## 6.6. Error cometido

Las gráficas que mostramos a continuación corresponden a la evolución del error cometido, en porcentaje respecto a los datos extraídos del catálogo, en el cálculo de los parámetros del circuito equivalente.

Los datos de catálogo que se analizan a continuación corresponden a los explicados en el Capítulo 5. Así mismo, recordamos que son extraídos del análisis de los motores de 4 polos y eficiencia EFF2.

El resto de las gráficas las podremos ver en el Anexo II.



— ABB  
— Siemens

## 6.7. Separación de pérdidas

Otro de los puntos a tener en cuenta en el cálculo de los parámetros del circuito equivalente en que se basa este proyecto, es la separación de pérdidas.

Como ya hemos comentado en diversos puntos de este documento hay ciertos tipos de pérdidas que son difíciles de determinar con exactitud, haciendo que este proceso se base en otros estudios que se centran específicamente en este tipo de pérdidas.

Entre estas pérdidas estamos hablando de las pérdidas por rozamiento-ventilación ( $P_{\text{fric}}$ ) y las pérdidas adicionales ( $P_{\text{ad}}$ ). Además, este tipo de pérdidas son uno de los parámetros más determinantes a la hora de comenzar el cálculo, tal y como vimos en el Capítulo 5 y analizaremos más en profundidad en las conclusiones.

Con el fin de que este tipo de pérdidas sean lo más correctas posibles, nos hemos basado en un estudio para motores de 4 polos realizado por el SEEEM [10]. En este estudio quedan representadas los diferentes tipos de pérdidas según la potencia nominal del motor.

Cabe destacar que los valores están en porcentaje referidos al total de las pérdidas de cada motor, que vienen definidas por esta ecuación:

$$\sum \text{Pérdidas} = P_{ab} - P_u$$

Dicho esto, el mencionado estudio nos deja como referencia la figura 6.4 y en la cual nos basamos para determinar este tipo de pérdidas en este proyecto.

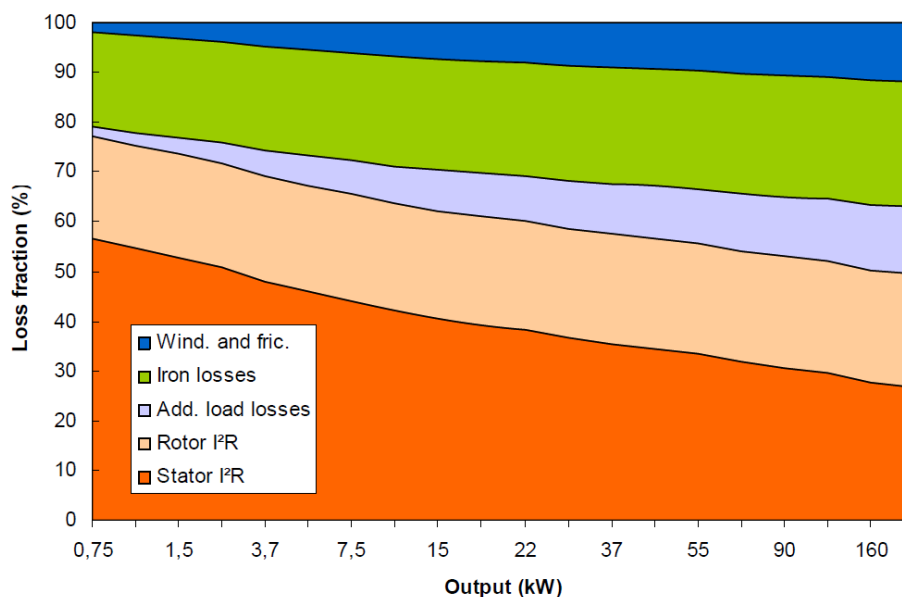
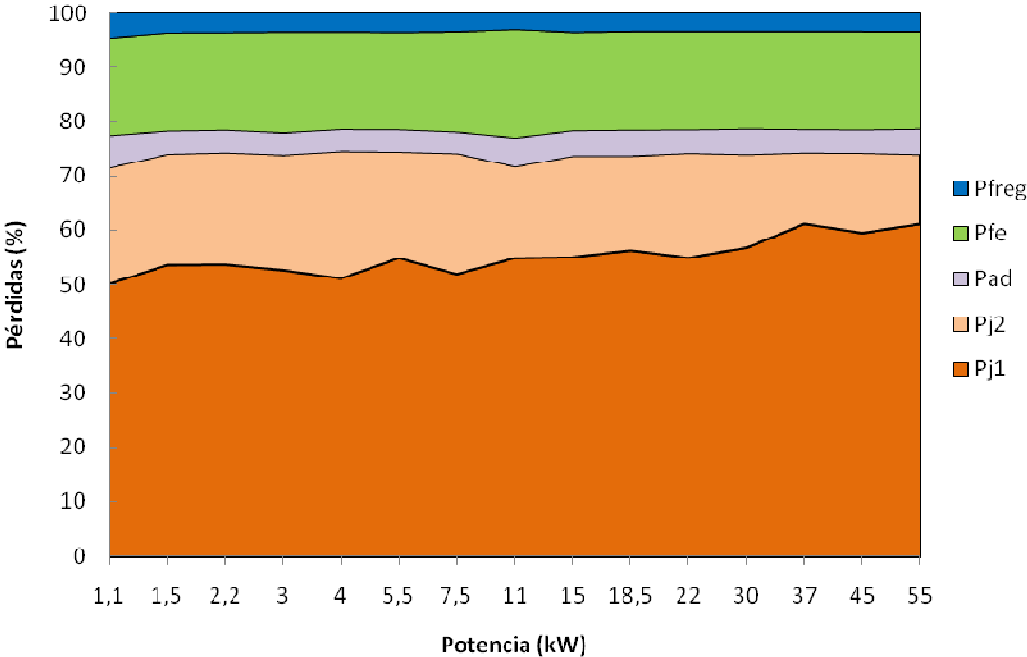


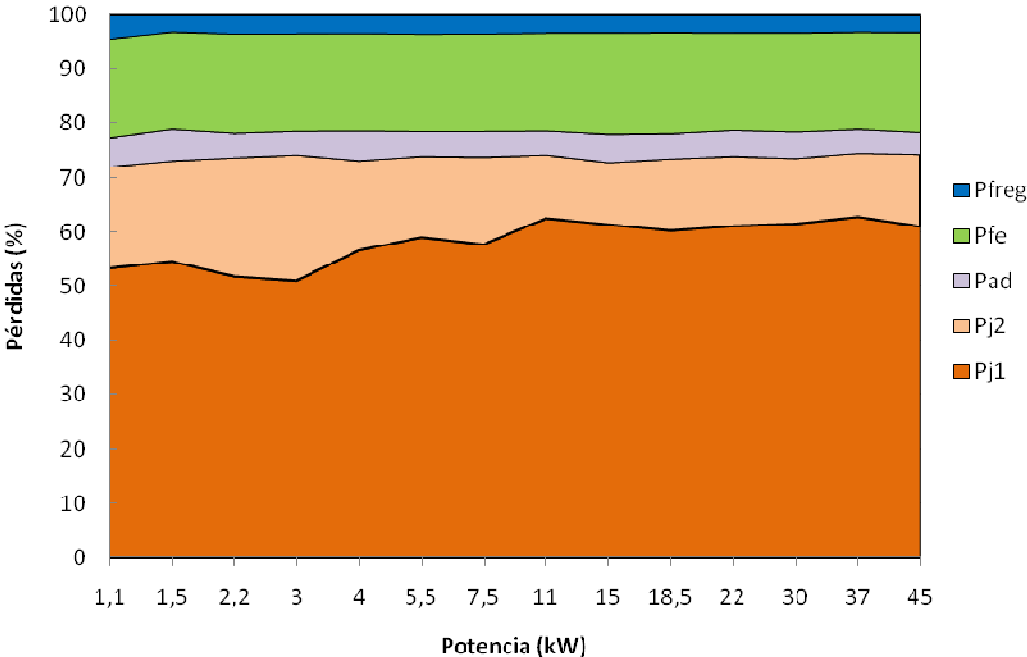
Figura 6.4: Proporción de pérdidas en motores de 4 polos (Martin Doppelbauer, 2006)

A continuación, podemos ver los resultados obtenidos en la separación de pérdidas de los motores calculados de 4 polos y eficiencia EFF2 según el nombre del fabricante.

### ABB



### SIEMENS



## Capítulo 7. Estudio económico

### 7.1. Introducción

El presente estudio económico se basa en la realización de los ensayos especificados en el Capítulo 3.

El objetivo de este capítulo, por tanto, es dar a conocer la inversión económica que se tendría que hacer en caso de no disponer de un software que calcule los parámetros del circuito equivalente de un motor y por consiguiente su posible comportamiento.

Por otro lado, en este estudio económico no se contemplan gastos (o disminución de ganancias) por el cese de las actividades que el motor pueda estar realizando.

Los precios descritos en este estudio contemplan en I.V.A. en todos sus componentes.

### 7.2. Estudio para el ensayo directo

El presupuesto que presentamos a continuación esta agrupado por potencias. Por tanto, los instrumentos a utilizar de cada grupo son útiles para la menor potencia como para la mayor de ese grupo.

A continuación se detalla cada uno.

#### 7.2.1. Motores de potencia nominal de 0,75 kW a 7,5 kW

Marca	Descripción	Precio Unitario (€)	Unidades	Precio total (€)
RS	Medidor de resistencia	695	1	695
Zes Zimmer	Medidor de potencia	5,190	1	5,190
Magtrol	Freno	18,093	1	18,098
Magtrol	Medidor par-velocidad	6,400	1	6,400
Pronedya	Banco de ensayo	3,725	1	3,725
Ait eche	Transformador de intensidad	15	3	45
Magtrol	Fuente de alimentación	2,940	1	2,940
TES	Sonda de temperatura	120	1	120
				<b>37,213</b>



### 7.2.2. Motores de potencia nominal de 9,2 kW a 30 kW

Marca	Descripción	Precio Unitario (€)	Unidades	Precio total (€)
RS	Medidor de resistencia	695	1	<b>695</b>
Zes Zimmer	Medidor de potencia	5,190	1	<b>5,190</b>
Magtrol	Freno	19,120	1	<b>19,120</b>
Magtrol	Medidor par-velocidad	6,400	1	<b>6,400</b>
Promedya	Banco de ensayo	4,610	1	<b>4,610</b>
Alt eche	Transformador de intensidad	15	3	<b>45</b>
Magtrol	Fuente de alimentación	3,310	1	<b>3,310</b>
TES	Sonda de temperatura	120	1	<b>120</b>
				<b>39,490</b>

### 7.2.3. Motores de potencia nominal de 37 a 90 kW

Marca	Descripción	Precio Unitario (€)	Unidades	Precio total (€)
RS	Medidor de resistencia	695	1	<b>695</b>
Zes Zimmer	Medidor de potencia	5,190	1	<b>5,190</b>
Magtrol	Freno	27,159	1	<b>27,159</b>
Magtrol	Medidor par-velocidad	6,400	1	<b>6,400</b>
Promedya	Banco de ensayo	4,610	1	<b>4,610</b>
Ait eche	Transformador de intensidad	20	3	<b>60</b>
Magtrol	Fuente de alimentación	3,310	1	<b>3,310</b>
TES	Sonda de temperatura	120	1	<b>120</b>
				<b>47,544</b>

## Capítulo 8. Conclusiones y perspectivas

### 8.1. Introducción

Debido a que en el Capítulo 6 se han puesto todas las gráficas y resultados obtenidos, en este capítulo pondremos las conclusiones basadas en estas gráficas y por tanto se hará referencia a ellas.

Así cómo los resultados son variados, las conclusiones también lo son, ya que no hay una sola valoración a este trabajo, o por lo menos con una sola valoración no sería suficiente.

En el transcurso de este proyecto se han ido cambiando las tácticas y las metodologías con el fin de encontrar una que sea la que menos errores nos aporte y más resultados satisfactorios obtenga. Como resultado de ese variado abanico de metodologías surgen unas valoraciones que son las que trataremos de plasmar a continuación.

Cabe decir también que mucho de lo que se ha hecho en este trabajo no ha quedado plasmado en forma gráfica ya que se han ido haciendo modificaciones sobre la marcha, con una metodología de prueba y error totalmente empírica. Lo que ha quedado plasmado son los resultados finales obtenidos que son los mejores y más precisos de todos, obviando los primeros ensayos en donde se han cometido errores y se han visto posibilidades de mejoría.

Por eso a continuación valoraremos este proyecto desde diferentes puntos de vista, comenzando por aquellas cosas que no han sido reflejadas en otra parte de este documento.

### 8.2. Valores iniciales y tensión nominal

Uno de los primeros inconvenientes que nos hemos encontrado a la hora de implantar la parametrización de los motores mediante programación no lineal, fue la determinación de los valores iniciales.

Hemos comprobado que para que este método sea eficaz y correcto los valores iniciales que le debemos introducir al programa tienen que ser muy exactos. Cuando hablamos de exactos nos referimos a que tiene que estar dentro de un margen de error que no supere el 100% de su valor inicial. Es decir, que si introducimos una resistencia de  $25\Omega$ , solo será eficaz el método si como mucho la verdadera resistencia está en 0 y  $50\Omega$ . Esto es aplicable a todos los demás parámetros iniciales y aun más con las  $P_{freg}$  y  $P_{ad}$ , que veremos en otro apartado con más detenimiento.

Esto ocasiona que no podamos iniciar el proceso sin tener nociones de los valores aproximados de los parámetros de un motor de una potencia determinada. Cosa que dificulta e impide que el método sea del todo eficaz, ya que de una u otra manera tendremos que recurrir a mediciones y ensayos sobre un motor de similar potencia.

Por otro lado, nos encontramos con la peculiaridad de la tensión nominal del motor. Todo el trabajo realizado en este proyecto se ha hecho con motores trifásicos y de 400 V de tensión de línea. A raíz de esto, podemos decir que no es posible introducir valores iniciales que correspondan a motores de igual potencia pero de 220 V de tensión de línea. Esto es debido a que los parámetros de un circuito equivalente de un motor de 400 V y uno de 200 V son lo suficientemente diferentes en magnitud como para que el programa no sea capaz de encontrar puntos en común.

Por tanto, podemos decir que esto es un punto negativo ya que necesitamos unos valores iniciales bastante exactos para poder modelar un motor con unos errores, con respecto al original, admisibles.

### **8.3. Pérdidas por rozamiento y pérdidas adicionales**

En este punto también hemos tenido que recurrir a varias propuestas con el fin de definir este tipo de pérdidas.

Antes que nada cabe mencionar que tanto las pérdidas por rozamiento-ventilación como las pérdidas adicionales son difíciles de determinar y existen numerosos estudios que se centran en la determinación específica de este tipo de pérdidas.

En el comienzo del planteamiento de este proyecto se había acordado adoptar las pérdidas adicionales según la norma IEC 60034-2-1, vista en el Capítulo 3, y concretamente según la tabla que se muestra en el apartado 3.1.7.1, figura 3.3.

Con respecto a las pérdidas por rozamiento se habían obtenido, en primera instancia, a través de una hoja de cálculo donde se presentaba el análisis del circuito equivalente con resistencias de pérdidas y luego de hacer varios cálculos se desestimó que no ofrecía buenos resultados.

Por tanto se procedió a aproximar una ecuación para el gráfico del SEEEM, expuesto en el Capítulo 6, con el fin de especificar unas pérdidas más reales (tanto para las  $P_{\text{freg}}$  como para las  $P_{\text{ad}}$ ).

Al final, se logró con bastante éxito aunque hay algunas diferencias con la gráfica original. Este paso fue fundamental para obtener unos buenos resultados generales.

Con lo cual podemos ver que el peso de las  $P_{\text{freg}}$  y las  $P_{\text{ad}}$  en la obtención de los parámetros del circuito equivalente es importante y uno de los factores más determinantes.

### **8.4. Conclusiones finales**

El objetivo de este proyecto era intentar obtener el circuito equivalente del motor de inducción mediante herramientas de programación no lineal. La cual cosa podemos decir que hemos conseguido, siempre pensando que hay cosas que se pueden mejorar para obtener mejores resultados, tras analizar un total de

116 motores y haber conseguido en un 92% de los motores no superar un margen del 20% de error en sus características nominales.

Por lo tanto, y a la vista del estudio económico, podemos decir que podríamos utilizar este método para saber el comportamiento de un motor de inducción sin tener que someterlo a ensayos, que además de ser muy elevado el coste económico tendríamos que pensar en parar toda actividad que dicho motor este realizando o, en caso de no disponer del motor, vernos obligados a ensayar alguno parecido.

Para concluir, habría que mencionar que el método no es del todo óptimo. Hay muchos aspectos que se pueden mejorar como la automatización a partir de algún software o mediante programación, otros mediante el cambio en el circuito equivalente utilizado ya que hay otros que nos pueden ofrecer mejores respuestas [10] y aun mediante la misma programación y planteamiento del sistema no lineal que hemos utilizado. Pero más allá de esto se puede decir que el objetivo de este proyecto se puede dar por satisfactorio ya que se ha conseguido el objetivo planteado al inicio del mismo.

## Bibliografía

- [1] European Copper Institute. Energy Efficient Motor Driven Systems. Brussels, Belgium. April 2004.
- [2] Catálogo de Motores de AEG. Diciembre de 2001.
- [3] J. Pedra and F. Corcoles, "Estimation of induction motor double-cage model parameters from manufacturer data", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no.2, pp. 310-317, Jun. 2004.
- [4] J. Pedra, "Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation", *Inst. Elect. Eng, Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 153, no. 2. pp. 137-146. Mar. 2006.
- [5] M. Akbaba. M. Taleb, and A. Rumeli, "Improved estimation of induction machine parameters", *Electric PowerSyst. Res.*, vol. 34, pp. 65-73. 1995.
- [6] J. E. Brown and C. Grantham, "Determination of the parameters and parameter variations of a 3-phase induction motor having a current displacement rotor", *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 122, no. 9, pp. 919-921, Sep. 1975.
- [7] CEMEP (European Committee of manufactures of Electrical Machines an Power Electronics). Motores eléctricos eficientes. London.
- [8] SIEMENS. Motores Eléctricos. Catálogo. 2005
- [9] ABB. Motores Eléctricos. Catálogo. 2007
- [10] M. H. Haque, "Determination of NEMA design induction motor parameters from manufacturer data", *IEEE transactions of energy conversion*, Vol. 23, NO. 4. December, 2008.
- [11] Chapman, Stephen J. "Máquinas eléctricas". Mc GrawHill. 2005.
- [12] Artículo. Estudio del Comportamiento del motor de Inducción en base a los datos de catálogo. Gloria Ciumbulea, Xose M. Lopez-Fdez, Neculai Galan, Ángel Costa.