

Francisco José Espejo Bernet

**ANÁLISIS DEL AHORRO DE ENERGÍA AÑADIENDO UN SEGUNDO MOTOR
DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN EL MISMO EJE MECÁNICO**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Dirigido por el Dr. Luis Guasch Pesquer

Grado de Ingeniería Eléctrica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2021



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA
Universitat Rovira i Virgili



**ANÁLISIS DEL AHORRO DE ENERGÍA AÑADIENDO UN SEGUNDO MOTOR
DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN EL MISMO EJE MECÁNICO**

1. ÍNDICE GENERAL

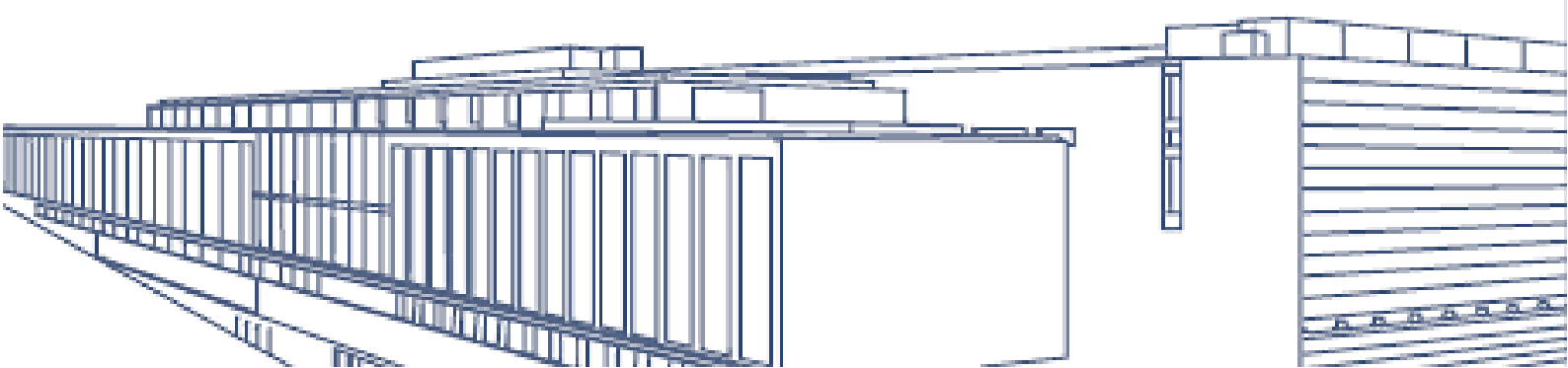
(DOCUMENTO 1 DE 3)

GRADO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOR: Francisco José Espejo Bernet

DIRECTOR: Luis Guasch Pesquer

CURSO: 2020-2021



Índice General

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | ÍNDICE GENERAL | 2 |
| 2. | MEMORIA | 5 |
| 2.1. | OBJETO | 8 |
| 2.2. | ALCANCE..... | 8 |
| 2.3. | ANTECEDENTES..... | 8 |
| 2.3.1. | Constitución de la MdI..... | 8 |
| 2.3.2. | Principio de Funcionamiento..... | 10 |
| 2.3.3. | Modelo Matemático y Circuito Equivalente del Motor Asíncrono | 11 |
| 2.3.4. | Característica Mecánica del Motor de Inducción..... | 13 |
| 2.4. | NORMAS Y REFERENCIAS..... | 14 |
| 2.4.1. | Disposiciones Legales y Normativa Aplicable | 14 |
| 2.4.2. | Programas Informáticos y Programas de Cálculo | 14 |
| 2.4.3. | Plan de Gestión de la Calidad Aplicado durante la Redacción del Proyecto..... | 14 |
| 2.4.4. | Bibliografía..... | 14 |
| 2.4.5. | Otras Referencias..... | 14 |
| 2.5. | DEFINICIONES Y ABREVIATURAS..... | 15 |
| 2.6. | REQUISITOS DE DISEÑO..... | 16 |
| 2.6.1. | Análisis del Ahorro Energético y Económico..... | 16 |
| 2.6.2. | Simulación..... | 17 |
| 2.6.3. | Automatización..... | 18 |
| 2.7. | ANÁLISIS DE SOLUCIONES..... | 19 |
| 2.7.1. | Muestra de Resultados..... | 19 |
| 2.7.2. | Comparación de los Resultados..... | 26 |
| 2.7.3. | Análisis de Posibles Variables de Referencia | 26 |
| 2.8. | RESULTADOS FINALES..... | 31 |
| 2.8.1. | Selección de Motores..... | 31 |
| 2.8.2. | Eficiencia de los Motores | 32 |
| 2.8.3. | Clase de Servicio y Ciclos de Trabajo..... | 36 |
| 2.8.4. | Consumo y Ahorro Energético | 36 |
| 2.8.5. | Ahorro Económico | 38 |
| 2.8.6. | Tiempo de Amortización..... | 39 |
| 2.8.7. | Representación Gráfica de los Resultados | 40 |
| 2.8.8. | Simulación de los Transitorios | 46 |
| 2.8.9. | Resultado Final de la Automatización | 62 |
| 2.9. | PLANIFICACIÓN..... | 66 |
| 2.10. | ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS..... | 66 |
| 3. | ANEXOS | 67 |
| 3.1. | RESULTADOS DE CONSUMO Y AHORRO ENERGÉTICO..... | 69 |
| 3.1.1. | Motor 160 kW..... | 69 |
| 3.1.2. | Motor 200 kW..... | 70 |
| 3.1.3. | Motor 250 kW..... | 71 |
| 3.1.4. | Motor 315 kW..... | 71 |
| 3.1.5. | Motor 355 kW..... | 72 |
| 3.1.6. | Motor 400 kW..... | 73 |
| 3.2. | PROGRAMACIÓN EN MATLAB..... | 74 |
| 3.2.1. | Matrices Utilizadas | 74 |
| 3.2.2. | Código en Matlab..... | 76 |
| 3.3. | SIMULACIÓN EN PSIM | 80 |
| 3.3.1. | Cálculo de los Parámetros | 80 |

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2. | <i>Implementación del Modelo de Simulación</i> | 82 |
| 3.3.3. | <i>Resultados Numéricos de las Simulaciones</i> | 85 |
| 3.4. | PROGRAMACIÓN EN ZELIOSOFT2 | 87 |
| 3.4.1. | <i>Cálculo del Valor de la Variable de Referencia</i> | 87 |
| 3.4.2. | <i>Elementos del Circuito Lógico</i> | 89 |
| 3.5. | CATÁLOGO ABB | 92 |
| 3.6. | TARIFAS ABB | 93 |



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA
Universitat Rovira i Virgili



**ANÁLISIS DEL AHORRO DE ENERGÍA AÑADIENDO UN SEGUNDO MOTOR
DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN EL MISMO EJE MECÁNICO**

2. MEMORIA

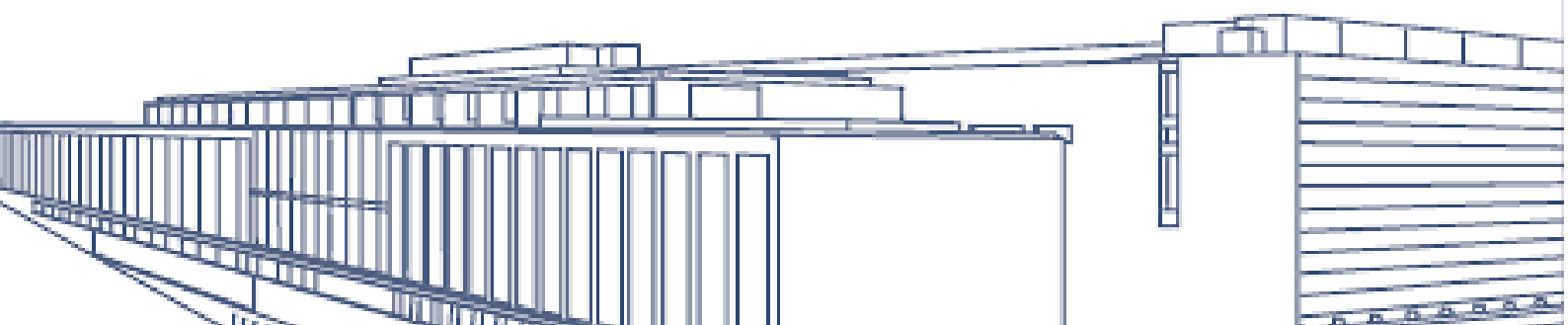
(DOCUMENTO 2 DE 3)

GRADO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOR: Francisco José Espejo Bernet

DIRECTOR: Luis Guasch Pesquer

CURSO: 2020-2021



Índice

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 2. MEMORIA | 5 |
| 2.1. OBJETO..... | 8 |
| 2.2. ALCANCE..... | 8 |
| 2.3. ANTECEDENTES..... | 8 |
| 2.3.1. Constitución de la MdI..... | 8 |
| 2.3.2. Principio de Funcionamiento..... | 10 |
| 2.3.3. Modelo Matemático y Circuito Equivalente del Motor Asíncrono | 11 |
| 2.3.4. Característica Mecánica del Motor de Inducción..... | 13 |
| 2.4. NORMAS Y REFERENCIAS..... | 14 |
| 2.4.1. Disposiciones Legales y Normativa Aplicable | 14 |
| 2.4.2. Programas Informáticos y Programas de Cálculo | 14 |
| 2.4.3. Plan de Gestión de la Calidad Aplicado durante la Redacción del Proyecto..... | 14 |
| 2.4.4. Bibliografía..... | 14 |
| 2.4.5. Otras Referencias..... | 14 |
| 2.5. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS..... | 15 |
| 2.6. REQUISITOS DE DISEÑO..... | 16 |
| 2.6.1. Análisis del Ahorro Energético y Económico..... | 16 |
| 2.6.1.1. Motores Estudiados..... | 16 |
| 2.6.1.2. Cargas Consideradas..... | 17 |
| 2.6.1.3. Clase de Servicio y Ciclos de Trabajo | 17 |
| 2.6.1.4. MATLAB..... | 17 |
| 2.6.2. Simulación..... | 17 |
| 2.6.3. Automatización..... | 18 |
| 2.6.3.1. Software Schneider Zelio Soft 2..... | 18 |
| 2.7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES..... | 19 |
| 2.7.1. Muestra de Resultados..... | 19 |
| 2.7.1.1. Resultados de Consumo y Ahorro Energético | 19 |
| 2.7.2. Comparación de los Resultados..... | 26 |
| 2.7.3. Análisis de Posibles Variables de Referencia | 26 |
| 2.8. RESULTADOS FINALES..... | 31 |
| 2.8.1. Selección de Motores..... | 31 |
| 2.8.1.1. Selección del Motor de Referencia | 32 |
| 2.8.1.2. Selección de los Motores Comparativos | 32 |
| 2.8.2. Eficiencia de los Motores..... | 32 |
| 2.8.3. Clase de Servicio y Ciclos de Trabajo..... | 36 |
| 2.8.4. Consumo y Ahorro Energético | 36 |
| 2.8.5. Ahorro Económico | 38 |
| 2.8.5.1. Tarifa 6.1A..... | 38 |
| 2.8.6. Tiempo de Amortización..... | 39 |
| 2.8.7. Representación Gráfica de los Resultados | 40 |
| 2.8.7.1. Resultados Finales del Ahorro Energético | 41 |
| 2.8.7.2. Resultados Finales del Ahorro Económico | 42 |
| 2.8.7.3. Resultados Finales del Tiempo de Amortización | 43 |
| 2.8.8. Simulación de los Transitorios | 46 |
| 2.8.8.1. Caracterización de los Motores | 46 |
| 2.8.8.2. Resultados de las Simulaciones..... | 48 |
| 2.8.8.3. Conclusiones de las Simulaciones | 62 |
| 2.8.9. Resultado Final de la Automatización | 62 |
| 2.8.9.1. Elección de la Variable de Referencia | 62 |
| 2.8.9.2. Valor de la Variable de Referencia | 62 |
| 2.8.9.3. Software de la Automatización | 64 |
| 2.8.9.4. Funcionamiento del Circuito Lógico | 65 |

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| 2.8.9.5. Hardware de la Automatización..... | 65 |
| 2.9. PLANIFICACIÓN..... | 66 |
| 2.10. ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS..... | 66 |

2.1. Objeto

En el presente TFG se procederá a analizar el ahorro de energía que se derivaría del hecho de usar dos motores de inducción trifásicos sobre el mismo eje mecánico.

El primer motor, de mayor potencia, sería el encargado de suministrar la potencia necesaria en los periodos de máxima carga mecánica. El segundo motor, de menor potencia, sería el que suministraría la potencia mecánica en los periodos de mínima carga mecánica, donde el rendimiento del primer motor es muy inferior respecto al del segundo motor.

2.2. Alcance

Las distintas tareas que se desarrollan a lo largo del presente Trabajo Final de Grado se mencionan a continuación:

- Seleccionar una familia de motores de inducción de un fabricante de motores de inducción trifásicos con potencias comprendidas entre 10 y 1.000 kW, y obtener los datos que proporciona dicho fabricante en el catálogo. Preferentemente se escogerá un catálogo donde el fabricante nos proporcione datos de rendimiento para el 25, 50, 75 y 100% de la carga.
- Seleccionar los tipos de servicio a analizar en la norma UNE-EN 60034-01 Máquinas eléctricas rotativas – Características asignadas.
- Escoger la/s bancada/s de motores a analizar.
- Modelizar matemáticamente el rendimiento de los motores a partir de los datos del fabricante.
- Calcular la energía eléctrica ahorrada entre ambos motores en los periodos de baja carga mecánica, así como calcular el tiempo que se tardaría en recuperar la inversión de la compra del segundo motor y determinar su rentabilidad económica.
- Simular mediante el programa PSIM los transitorios provocados por el cambio de motor.
- Programar mediante Zelio el circuito de control que asegure la maniobra de los motores en las condiciones deseadas.

2.3. Antecedentes

Los motores de inducción trifásicos son un tipo de motores los cuales cada vez son más usados en la industria. Por ello, es importante conocer la evolución de la eficiencia de estos en función de la carga mecánica para así poder obtener un mayor ahorro energético, y, por tanto, mayor ahorro económico.

El rendimiento de los motores de inducción se reduce contra menor sea la carga mecánica que tengan que mover. Este hecho se acentúa sobre todo cuando para mover dicha carga la potencia que tiene que desarrollar el motor de inducción es inferior al 50 % de su potencia nominal.

En el momento en que un motor trabaja al 50 % de su potencia nominal o por debajo, si para trabajar en dicho punto, instalásemos un motor de inducción de menor potencia, obtendríamos una mayor eficiencia y con ella un ahorro energético.

Por ello, en el presente TFG se pretende realizar un análisis del ahorro energético y económico que se obtendría al instalar un segundo motor de menor potencia en el mismo eje mecánico para que trabaje en los periodos de baja demanda mecánica donde el motor de mayor potencia presentaría un bajo rendimiento.

2.3.1. Constitución de la MdI

En lo referente a la constitución de la MdI, al igual que el resto de los motores eléctricos, diferenciamos dos elementos claves: el estator y el rotor.

El estator es la parte fija de la MdI y tiene forma de cilindro hueco. El estator está formado por un conjunto de chapas de acero y presenta ranuras en la cara interna por las cuales se enrolla el devanado trifásico, el cual está formado por 3 arrollamientos desfasados 120° entre sí.

Por estos devanados circulará una corriente alterna trifásica la cual nos permite obtener un flujo giratorio. En otras palabras, el estator es la parte mecánicamente fija de la MdI pero proporciona un campo magnético giratorio.

Por lo tanto, al trabajar como motor, el estator actúa como inductor. Es muy importante destacar que los polos magnéticos que se forman en el estator deberán de ser pares y tener como mínimo un par de polos (Norte y Sud).

Además, el estator se encuentra rodeado de una carcasa y esta lleva incorporadas patas de fijación y anillos de elevación y transporte en la parte superior. Todo lo que hemos comentado podemos apreciarlo en la *Figura 1*.

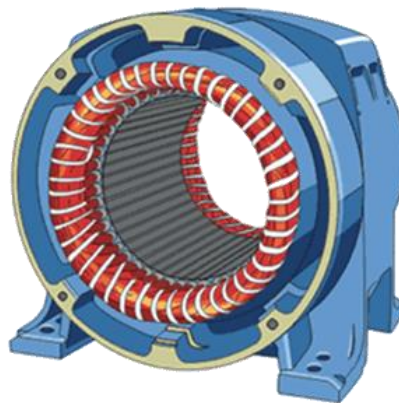


Figura 1 Estator y carcasa

Por otro lado, el rotor representa la parte mecánicamente móvil de la MdI. El rotor está formado por un conjunto de chapas de hierro con aislamiento de barniz entre sí, formando así un cilindro.

Se utilizan chapas de hierro con aislamiento de barniz en lugar de instalar directamente un cilindro de hierro para poder prevenir la aparición de corrientes parasitarias conocidas como corrientes de Foucault. El cilindro que se forma por la unión de las diferentes chapas presenta en su circunferencia exterior ranuras donde se colocan los devanados.

Cabe destacar que en los motores de inducción el rotor más común es el rotor de jaula de ardilla y este no incorpora devanados, sino que en su lugar presenta unas barras de cobre o aluminio las cuales están cortocircuitadas en ambos extremos entre sí por medio de dos anillos laterales. En la *Figura 2* se presenta la apariencia del rotor de jaula de ardilla.

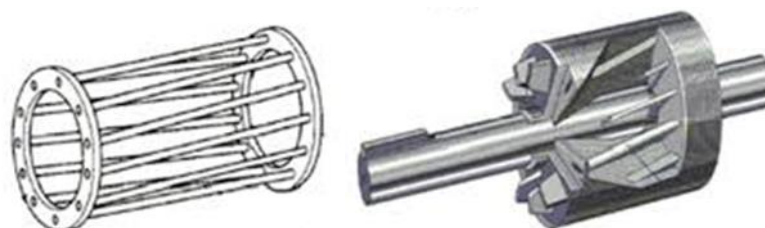


Figura 2 Rotor de jaula de ardilla

En los motores de mediana y gran potencia se incorpora un ventilador en el eje con la finalidad de producir una refrigeración forzada de la MdI. En la carcasa de la máquina también se instala la caja de bornes para realizar la conexión estrella o triángulo de acuerdo con lo que se indique en la placa de características.

En la *Figura 3*, se presenta la conjunción de todos los elementos de la MdI que hemos comentado.

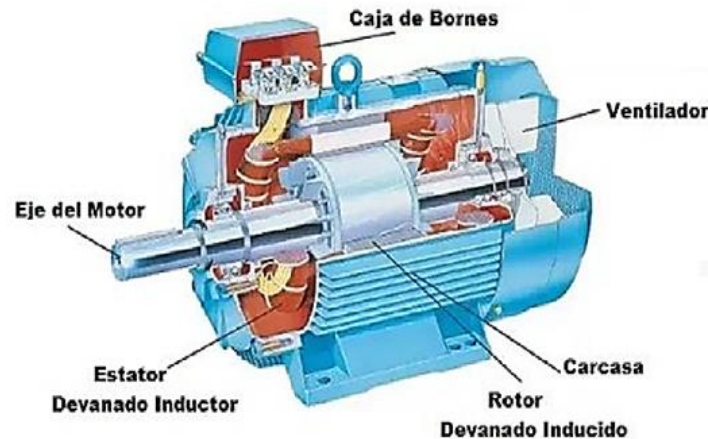


Figura 3 Constitución del motor de inducción

2.3.2. Principio de Funcionamiento

Tal y como hemos explicado en el apartado anterior, el devanado del estator está formado por 3 arrollamientos desfasados 120° entre sí. Al alimentar estos arrollamientos con una corriente alterna trifásica, se induce un campo magnético giratorio.

La velocidad con la que gira este campo magnético se conoce como *velocidad de sincronismo*.

Dicha velocidad viene definida por la siguiente expresión:

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

Siendo:

- n_s Velocidad de sincronismo [rpm]
- f Frecuencia de la red [Hz]
- p Par de polos

El campo magnético generado por el estator envuelve al núcleo ferromagnético del rotor y gira a su alrededor. Este hecho provoca que se induzca una f.e.m. en las barras de la jaula de ardilla, de acuerdo con la ley de inducción electromagnética de Faraday.

Recordamos que las barras de la jaula de ardilla forman un circuito cerrado al estar cortocircuitadas en sus extremos por medio de anillos. Este hecho constitutivo combinado con la aparición de una f.e.m en las propias barras, provoca la aparición de corrientes eléctricas en las barras.

Esta corriente inducida, a su vez, genera un campo magnético el cual interactuará con el flujo creado por los devanados del estator. Esta interacción provoca que el campo magnético generado por el rotor siga al campo magnético del estator.

Esto provoca la aparición de unas fuerzas mecánicas tangenciales en cada una de las barras del rotor con lo cual se consigue girar mecánicamente el rotor.

Como el campo magnético del rotor sigue al campo magnético del estator, se establece una relación entre la velocidad de sincronismo, la cual es la velocidad con la que gira el campo magnético creado por el estator, y la velocidad mecánica del motor, es decir, la velocidad mecánica del rotor.

Funcionando como motor, debe cumplirse siempre la siguiente condición:

$$n_s > n \quad (2)$$

Siendo:

n_s Velocidad de sincronismo [rpm]

n Velocidad mecánica [rpm]

La relación entre ambas velocidades se define como deslizamiento, se representa con la letra s y se define por medio de la siguiente expresión matemática:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

Tal y como podemos apreciar en la expresión (3), contra mayor sea la velocidad con la que gire el rotor, menor será el deslizamiento y viceversa. Aislando, podemos expresar la velocidad mecánica del rotor de la siguiente forma:

$$n = n_s(1 - s) \quad (4)$$

Por último, debemos definir también qué es el par motor. El par motor lo podemos entender como el momento de fuerza que un motor es capaz de ejercer sobre el eje. Además, cabe destacar que la potencia mecánica de la MdI se define de la siguiente forma:

$$P_{mec} = T \cdot \omega \quad (5)$$

Siendo:

P_{mec} Potencia mecánica desarrollada por la MdI [W]

T Par motor [N·m]

ω Velocidad angular del rotor [rad/s]

2.3.3. Modelo Matemático y Circuito Equivalente del Motor Asíncrono

El presente apartado irá dedicado a explicar cuál es el circuito equivalente de un motor de inducción. Cabe destacar que el circuito equivalente que se obtiene es por fase.

Además, para obtener dicho circuito equivalente se debe de contar con un sistema de tensiones equilibrado y con una forma de onda sinusoidal, de forma que lo que suceda en una fase es exactamente lo mismo que sucede en las otras dos, pero desfasado $\pm 120^\circ$

El procedimiento a seguir para obtener el circuito equivalente es muy similar al que se sigue en el caso de los transformadores. Por tanto, se deben reducir las magnitudes de un circuito al otro. Generalmente, se suelen reducir las magnitudes del rotor al del estator.

Esto significa que para obtener dicho circuito equivalente se sustituye el rotor real por un rotor equivalente de forma que las magnitudes del estator, así como las del campo magnético del entrehierro, no varían. Este rotor equivalente se denomina rotor reducido al estator.

Existen dos tipos de circuitos equivalentes para la MdI, los cuales reciben el nombre de *circuito equivalente "exacto"* y *circuito equivalente aproximado o en gamma*. La diferencia entre ambos radica en la ubicación del circuito magnético. Si lo ubicamos entre el rotor y el estator se utiliza el circuito equivalente exacto. En cambio, si lo ubicamos a la entrada, hablamos de circuito equivalente aproximado o en gamma

A continuación, mostramos el circuito equivalente exacto (*Figura 4*) y el circuito aproximado o en gamma (*Figura 5*):

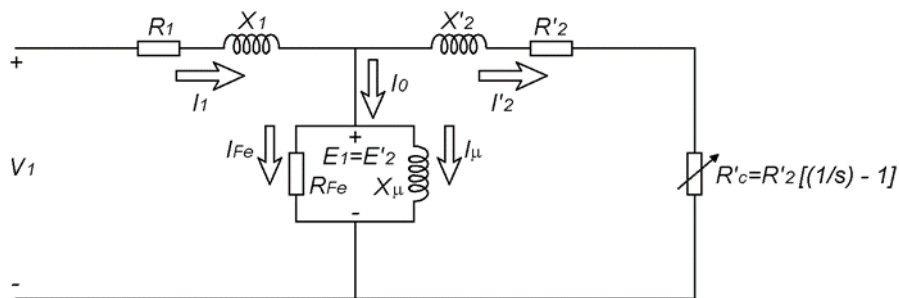


Figura 4 Circuito equivalente exacto

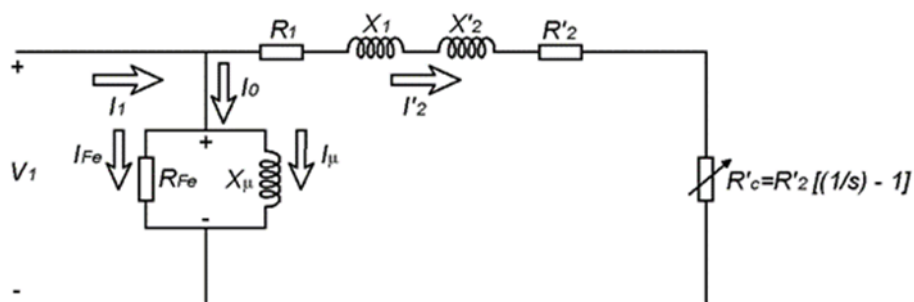


Figura 5 Circuito equivalente aproximado o en gamma

En ambos circuitos, encontramos dos resistencias en serie, R'_2 y R'_c , por lo que se pueden sumar entre sí. Por lo tanto, podemos sustituir ambas resistencias por la siguiente expresión:

$$R'_2 + R'_c = \frac{R'_2}{s} \quad (6)$$

2.3.4. Característica Mecánica del Motor de Inducción

En lo referente al par motor desarrollado por la MdI, este viene definido por la siguiente expresión matemática:

$$T = \frac{3 \cdot R'_2}{s \cdot \omega_s} \cdot I'^2_2 \quad (7)$$

Además, analizando el circuito de la *Figura 5* podemos calcular la corriente de la siguiente forma:

$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (8)$$

Por lo tanto, combinando las expresiones (7) y (8), se llega al siguiente resultado:

$$T = \frac{3 \cdot R'_2}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (9)$$

Donde el único valor que varía es el deslizamiento s . Sin embargo, como ya hemos comentado anteriormente, en el presente TFG únicamente nos interesa la MdI funcionando como motor, es decir, cuando el valor del deslizamiento está comprendido entre 0 y 1. Por lo tanto, a la hora de definir la característica mecánica de la MdI funcionando como motor, el deslizamiento tomará valores en dentro del rango asignado formando así la gráfica que representamos en la *Figura 6*.

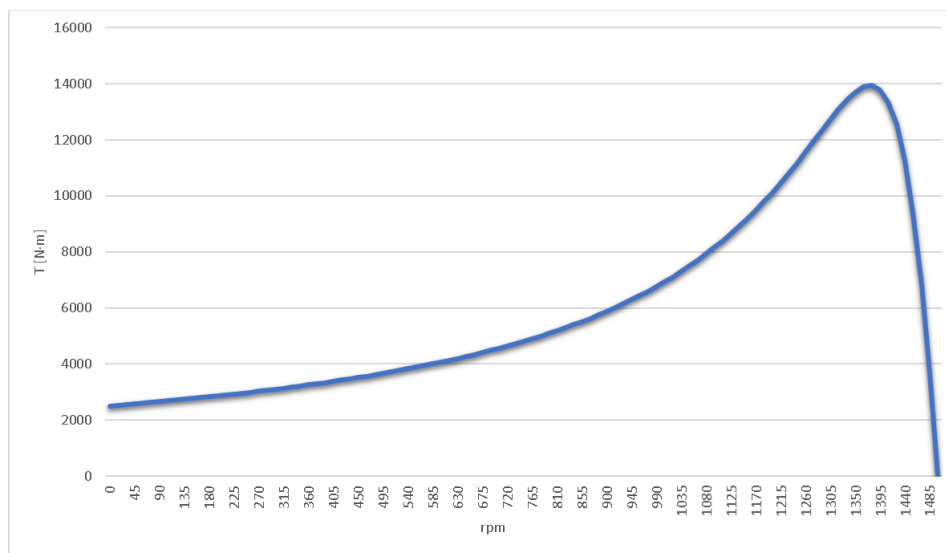


Figura 6 Ejemplo de característica mecánica del motor de inducción

2.4. Normas y Referencias

2.4.1. Disposiciones Legales y Normativa Aplicable

- Norma UNE-EN 60034 30-1:2014. Maquinas eléctricas rotativas. Parte 30-1: Clases de rendimiento para los motores trifásicos de inducción de jaula de velocidad única (código IE). Ratificada por AENOR en agosto de 2014.
- Norma UNE-EN 60034-1: 2005. Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento
- Norma UNE 157001. Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.

2.4.2. Programas Informáticos y Programas de Cálculo

Los distintos programas informáticos que hemos utilizado en el presente TFG son los siguientes:

- **PSIM.** En el presente TFG hemos utilizado el programa PSIM para simular los instantes de conmutación de los motores y así analizar los transitorios que se originan.
- **Microsoft Excel.** El programa Excel ha sido utilizado para modelizar matemáticamente la eficiencia de los motores en función de la potencia desarrollada y para calcular el consumo y el ahorro energético con la combinación de distintos motores, así como obtener unas gráficas preliminares.
- **Matlab.** Se trata de un programa que ofrece una gran capacidad de cálculo y versatilidad el cual hemos aplicado en el presente TFG para obtener las gráficas finales de ahorro energético, ahorro económico y tiempo de amortización de la inversión realizada.
- **Zelio Soft.** Se trata de un programa desarrollado por la compañía Schneider Electric el cual ha sido utilizado en el presente TFG para la elaboración del circuito de control que provoque las distintas maniobras entre los motores con las condiciones deseadas.

2.4.3. Plan de Gestión de la Calidad Aplicado durante la Redacción del Proyecto

No es de aplicación en este TFG.

2.4.4. Bibliografía

Las principales fuentes de información consultadas durante la redacción del presente TFG son las siguientes:

- Jesús Fraile Mora. *Máquinas eléctricas* (Octava edición) Publicado el año 2016. ISBN 978-84-1622-866-9
- Apuntes de la asignatura *Fundamentos de Máquinas Eléctricas*, perteneciente al segundo curso del grado de Ingeniería Eléctrica, impartida por el profesor Luís Guasch Pesquer.

2.4.5. Otras Referencias

A continuación, indicamos dos fuentes de información adicionales:

- Información sobre tarifas:
 - <https://www.aura-energia.com/tarifas-luz-industria-peninsula/>
- Información técnica y económica de los motores analizados en el presente estudio:
 - <https://new.abb.com/es>

2.5. Definiciones y abreviaturas

| | |
|------------|---------------------------------------------------------|
| MdI | Máquina de Inducción |
| n_s | Velocidad de sincronismo |
| n | Velocidad mecánica |
| s | Deslizamiento |
| R_1 | Resistencia del estator |
| X_1 | Reactancia del estator |
| R'_2 | Resistencia del rotor reducida al estator |
| X'_2 | Reactancia del rotor reducida al estator |
| R'_c | Resistencia de carga reducido al estator |
| X_m | Reactancia magnetizante o de magnetización |
| R_{Fe} | Resistencia de magnetización |
| I_1 | Corriente del estator |
| I'_2 | Corriente del rotor reducido al estator |
| I_0 | Corriente de magnetización |
| t_a | Tiempo de amortización |
| D | Ciclo de trabajo |
| CT | Centro de Transformación |
| MT | Media Tensión |
| AT | Alta Tensión |
| T_M | Periodo con mayor demanda mecánica |
| T_m | Periodo con menor demanda mecánica |
| T_F | Tiempo de funcionamiento considerado |
| E_{absM} | Energía consumida en periodos de mayor demanda mecánica |
| E_{absm} | Energía consumida en periodos de menor demanda mecánica |
| E_{abs} | Energía eléctrica total consumida |
| Q | Ahorro económico conseguido anualmente |

2.6. Requisitos de Diseño

Se desea estudiar el ahorro energético y económico cuando se acopla dos motores de inducción trifásicos en un mismo eje mecánico para que en los periodos de baja demanda mecánica trabaje el motor de menor potencia nominal en lugar de hacerlo el motor de mayor potencia, así como analizar los transitorios que se originan al cambiar de motor y automatizar dicho cambio y aportar un circuito de control para realizar las distintas conmutaciones.

2.6.1. Análisis del Ahorro Energético y Económico

En el presente apartado indicaremos todos los puntos de partida que se han tenido en cuenta para realizar el cálculo del ahorro energético y económico.

2.6.1.1. Motores Estudiados

El estudio se realizará con una serie de motores alimentados a 400V y 50 Hz del fabricante ABB. Además, los motores serán de rotor de jaula de ardilla simple, con 2 pares de polos, lo cual se traduce a que serán motores con una velocidad de sincronismo de 1.500 rpm, y todos ellos pertenecerán a la clase de eficiencia IE4.

La potencia nominal de nuestro motor de referencia será de 800 kW, es decir, analizaremos el ahorro que obtenemos al utilizar un motor de menor potencia en periodos de baja demanda mecánica en lugar de utilizar el motor de 800 kW.

En cuanto al resto de motores con los que compararemos el consumo, se utilizarán motores de potencias comprendidas entre un 20 % y un 50 % de la potencia nominal del motor de 800 kW, lo cual, según el catálogo de ABB, se traduce en un total de 6 motores.

Se decide no realizar el análisis del ahorro energético con motores que presenten una potencia nominal por encima del 50% de la del motor de referencia ya que se considera que cuando el motor de referencia trabaja a más del 50% de carga ya presenta un rendimiento muy elevado, de un 96,2% como mínimo.

A continuación, se presentan las potencias nominales y principales características técnicas de los motores que se han estudiado en el presente TFG:

| Motores | P_N [kW] | n [rpm.] | $\eta_{100\%}$ [%] | $\eta_{75\%}$ [%] | $\eta_{50\%}$ [%] | I_N [A] | T_N [N·m] | J [kg·m ²] |
|----------------|---------------|---------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------|----------------|-----------------------------|
| Motor 0 | 800 | 1491 | 96,7 | 96,7 | 96,2 | 1.388 | 5.121 | 23 |
| Motor 1 | 160 | 1490 | 96,6 | 96,8 | 96,4 | 278 | 1.026 | 3,9 |
| Motor 2 | 200 | 1491 | 96,7 | 96,8 | 96,4 | 345 | 1.282 | 5,9 |
| Motor 3 | 250 | 1490 | 96,7 | 96,9 | 96,8 | 432 | 1.601 | 5,5 |
| Motor 4 | 315 | 1490 | 96,7 | 96,8 | 96,5 | 554 | 2.017 | 7,2 |
| Motor 5 | 355 | 1491 | 96,7 | 96,9 | 96,5 | 616 | 2.274 | 8,4 |
| Motor 6 | 400 | 1490 | 96,7 | 96,7 | 96,3 | 700 | 2.563 | 8,4 |

Tabla 1 Características técnicas de los motores estudiados

2.6.1.2. Cargas Consideradas

En lo referente a las cargas que tienen que mover cada uno de los motores, se considera que dicha carga será el 93,75% de la potencia mecánica nominal del motor en cuestión.

Por lo tanto, las distintas cargas que se han considerado en el presente TFG para cada motor son las siguientes:

| | Cargas [kW] |
|---------------------|--------------|
| Motor 160 kW | 150 |
| Motor 200 kW | 188 |
| Motor 250 kW | 234 |
| Motor 315 kW | 295 |
| Motor 355 kW | 333 |
| Motor 400 kW | 375 |
| Motor 800 kW | 750 |

Tabla 2 Cargas consideradas

Además, todas las cargas que se estudian en el presente TFG presentan un par resistente constante.

2.6.1.3. Clase de Servicio y Ciclos de Trabajo

A la hora de realizar el análisis del ahorro energético, se considerará que el servicio consiste en dos cargas constantes diferentes, es decir, que se tendrán dos posibles puntos de trabajo por cada combinación de motores estudiado. Por lo tanto, de acuerdo con lo indicado en la norma UNE-EN 60034-1, en el presente TFG, se considera un servicio tipo S10.

El estudio se realizará para un total de 5 ciclos de trabajos distintos. En el presente TFG se denomina ciclo de trabajo a la fracción del tiempo total de funcionamiento en la que se conecta la carga mayor, es decir, la que suponga una mayor demanda mecánica.

El valor del ciclo de trabajo se presentará en pu y se identificará con la letra D. Dicho valor variará entre 0,5 y 0,1 reduciéndose en cada caso 0,1.

2.6.1.4. MATLAB

Para realizar correctamente el cálculo del ahorro económico, se debe de tener en cuenta un gran número de variables, tal y como comentaremos en el apartado 2.8.5.1 *Tarifa 6.1A*. Por ello se decide programar en Matlab lo cual nos da la posibilidad de realizar dicho calculo sin problema.

2.6.2. Simulación

Para analizar los transitorios que se originan cuando se produce el cambio de motor y de carga, se realizarán una serie de simulaciones con el programa PSIM. Se realizarán las simulaciones para analizar tanto el comportamiento de la corriente eléctrica trifásica, el par motor desarrollado y la velocidad mecánica del sistema.

Se decide realizar las simulaciones primero suponiendo que el primer motor en arrancar es el motor de referencia y en segundo lugar suponiendo que el primer motor en arrancar es el motor de menor potencia para así analizar todos los posibles casos.

Para realizar la simulación, nos encontramos con el inconveniente de que al modelizar los motores aplicando la técnica de Pedra, tal y como explicaremos en el apartado 2.8.8.1 *Caracterización de los Motores*, se produce un error considerable en cuanto al par de arranque de los motores y ninguno es capaz de arrancar con la carga que les corresponde.

Por ello se decide realizar un arranque directo de los motores en vacío y una vez que lleguen a su régimen estacionario, conectar la carga en cuestión que deban mover y posteriormente realizar las conmutaciones.

Por un lado, cuando el primer motor en arrancar es el motor de referencia, se arrancará el motor y se mantendrá en vacío hasta $t=3s$. En este instante, se conecta la carga que le corresponde mover a dicho motor. Una vez que llega al régimen estacionario, se conmutará de motor y de carga al mismo tiempo, lo cual ocurrirá para $t=4s$. Por último, para $t=5s$, se volverá a conmutar de motor y de carga. De esta forma, podremos ver los transitorios que se originaran al pasar del motor de mayor potencia al de menor potencia y viceversa.

Por otro lado, cuando el primer motor en arrancar es el motor de menor potencia, los tiempos de conmutación serán distintos que en el caso anterior a causa del tiempo que tarda cada motor en arrancar. En este segundo caso, se arrancará el motor y se mantendrá en vacío hasta $t=4.3s$. En este instante se conecta la carga correspondiente. Posteriormente, para $t=4.6s$, se conmutará de carga y motor al mismo tiempo. Finalmente, para $t=5.25s$, se volverán a conmutar motor y carga.

2.6.3. Automatización

Después de haber realizado el estudio sobre el ahorro energético y económico y la simulaciones para estudiar los transitorios, se procederá a elaborar un circuito de control por medio del programa Zelio Soft 2 para así automatizar el cambio de motores en el momento propicio.

Primeramente, antes de elaborar dicho circuito, se tendrá que elegir que variable mediremos y cuál es el valor que debe de tener dicha variable para dar la orden de conectar y desconectar cada motor. Las posibles variables que podemos escoger son la velocidad mecánica, la corriente eléctrica trifásica, la potencia activa absorbida y el par motor desarrollado. El análisis para decidir cuál es la variable que escogemos se explica posteriormente en el apartado 2.7.3 *Análisis de Posibles Variables de Referencia*.

Una vez que escojamos la variable, se procederá a calcular cual es el valor que debe provocar la conmutación del motor de referencia de 800 kW al motor de menor potencia y viceversa.

2.6.3.1. Software Schneider Zelio Soft 2

A la hora de programar en Zelio Soft 2, primeramente, debemos de seleccionar uno de los módulos que ofrece el propio programa. En nuestro caso, el módulo que escogemos es el que mostramos en la *Figura 7 Módulo de automatización*.

Tal y como podemos observar, se trata de un módulo que ofrece tanto entrada digitales como analógicas, pudiendo variar esta última de 0 a 10V. Dicho modulo se debe alimentar a 24 V DC y ofrece la posibilidad de poder programar en dos lenguajes: BDF (Diagrama de Bloques Funcionales o GRAFCET) y LD (Diagrama de Contactores). En nuestro caso, se decide programar en únicamente en BDF.

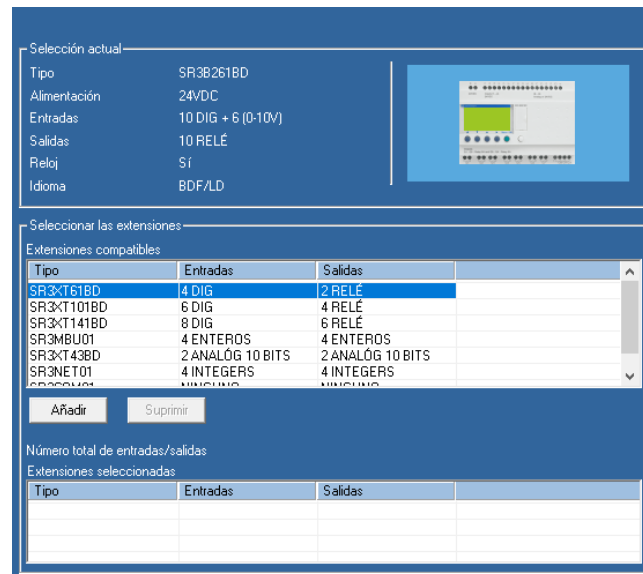


Figura 7 Módulo de automatización

2.7. Análisis de Soluciones

En el presente apartado pasaremos a comparar los distintos resultados que hemos obtenido al realizar el estudio con todos los criterios establecidos en el apartado anterior.

Comentaremos la evolución de los resultados del ahorro energético en función de la potencia nominal del motor que se incorpora al eje mecánico junto a nuestro motor de referencia y en función del valor del ciclo de trabajo D.

Después de la muestra de los resultados, pasaremos a comparar los distintos resultados que obtenemos para cada caso.

Además, también indicaremos el estudio que se ha realizado para determinar cuál es la variable a partir del valor de la cual se procederá a realizar las distintas conmutaciones.

2.7.1. Muestra de Resultados

El presente apartado mostraremos los distintos consumos y ahorros energéticos que se obtienen al incorporar un segundo motor de inducción en el mismo eje mecánico, así como la simulación correspondiente a cada caso.

2.7.1.1. Resultados de Consumo y Ahorro Energético

La energía consumida que se presenta es la energía que se consume por cada hora de servicio al combinar las distintas cargas en cuestión en función del ciclo de trabajo D.

La carga en los periodos de mayor demanda mecánica la cual moverá siempre el motor de 800 kW será en todos los casos de 750 kW. La carga en los periodos de baja demanda mecánica dependerá de cuál sea la potencia nominal del motor que se incorpora, de acuerdo con la *Tabla 2*.

2.7.1.1.1. Motor de 160 kW

Si el motor que se incorpora al eje mecánico junto con nuestro motor de referencia es de 160 kW y teniendo en cuenta las cargas que tienen que mover cada uno mostradas en la *Tabla 2*, obtenemos los siguientes resultados:

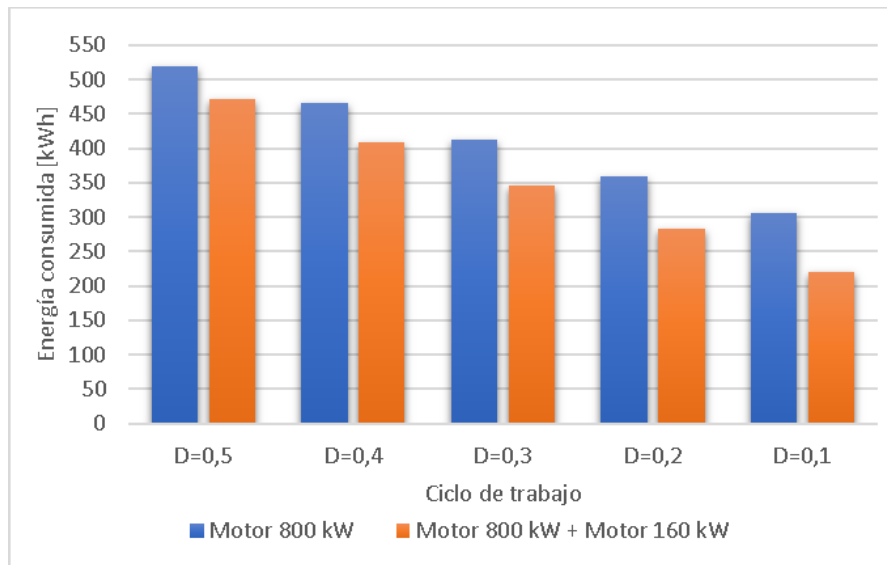


Figura 8 Consumos energéticos para motores de 800 kW y 160 kW

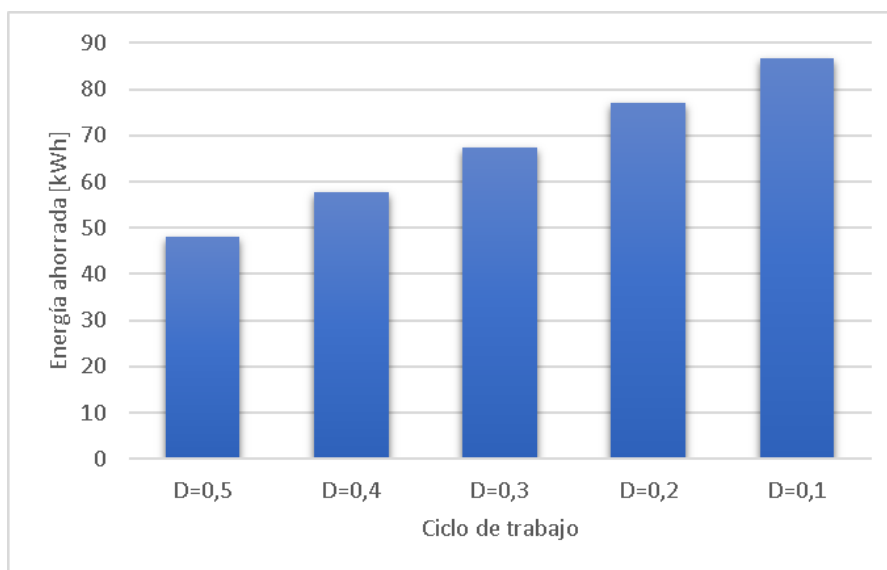


Figura 9 Ahorro energético incorporando un motor de 160 kW

2.7.1.1.2. Motor de 200 kW

Si incrementamos la potencia nominal del motor que conectamos y con ello también incrementamos la carga que tiene que mover la combinación de motores, obtenemos los siguientes resultados:

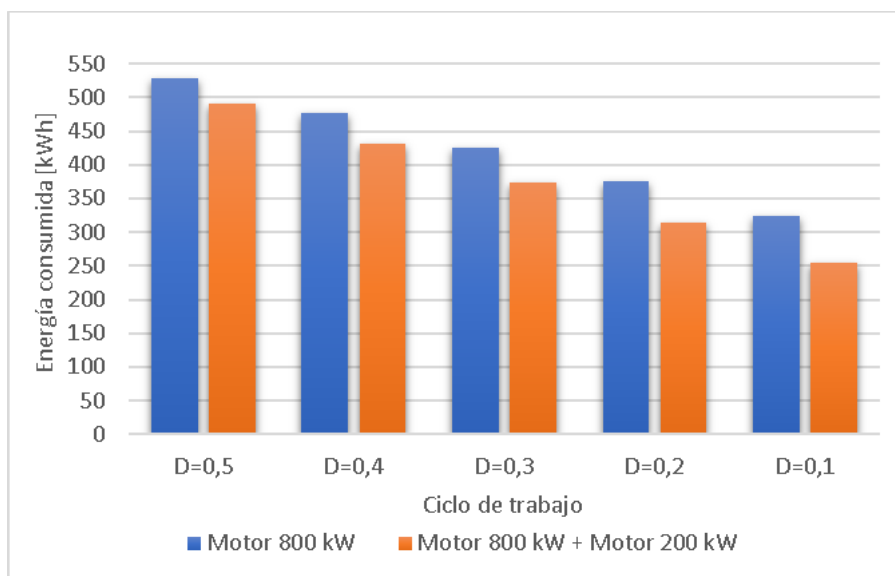


Figura 10 Consumos energéticos para motores de 800 kW y 200 kW

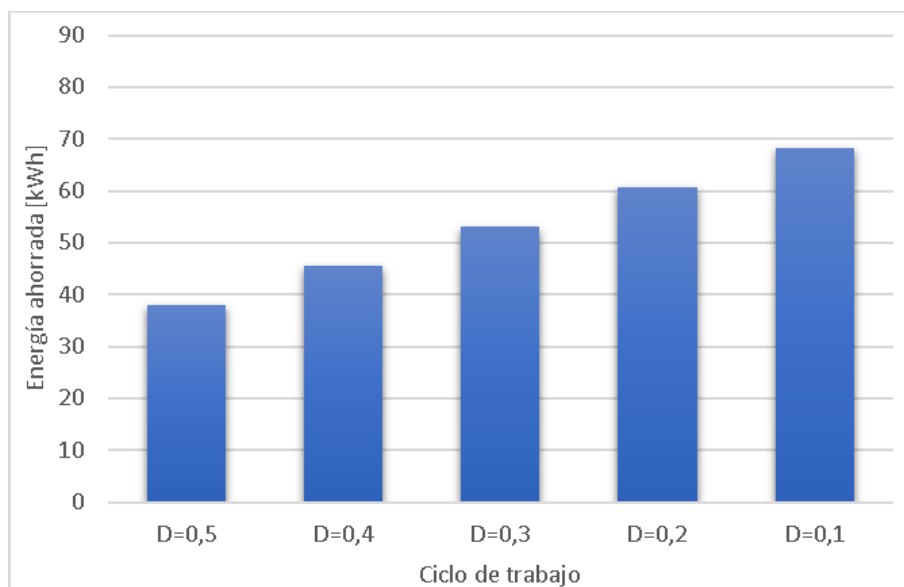


Figura 11 Ahorro energético incorporando un motor de 200 kW

2.7.1.1.3. Motor de 250 kW

Incorporando un motor de 250 kW y por lo tanto incrementando la carga en los periodos de baja demanda hasta 234 kW de acuerdo con la *Tabla 2*, obtenemos los resultados que mostramos a continuación:

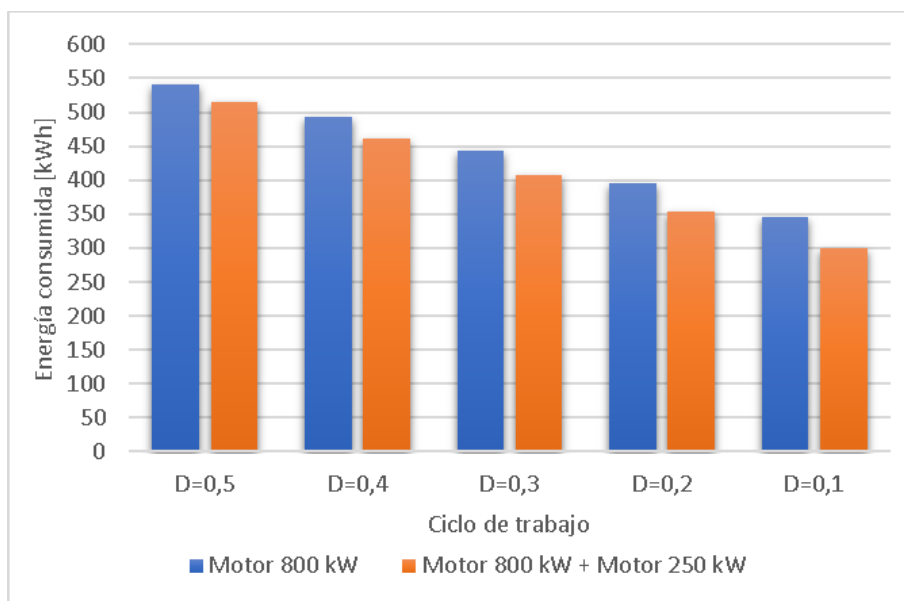


Figura 12 Consumos energéticos para motores de 800 kW y 250 kW

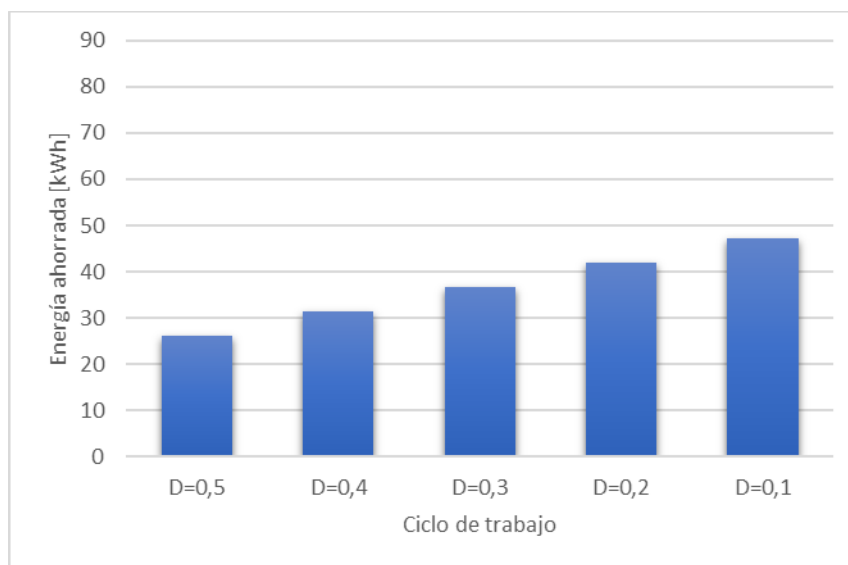


Figura 13 Ahorro energético incorporando un motor de 250 kW

2.7.1.1.4. Motor de 315 kW

Para la combinación de motores de 800 kW y 315 kW, obtenemos los siguientes resultados:

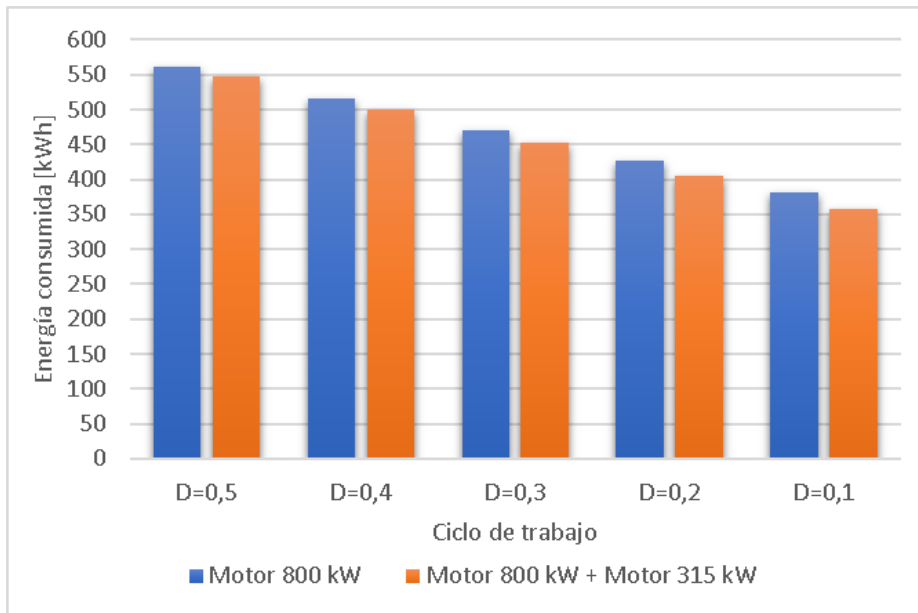


Figura 14 Consumos energéticos para motores de 800 kW y 315 kW

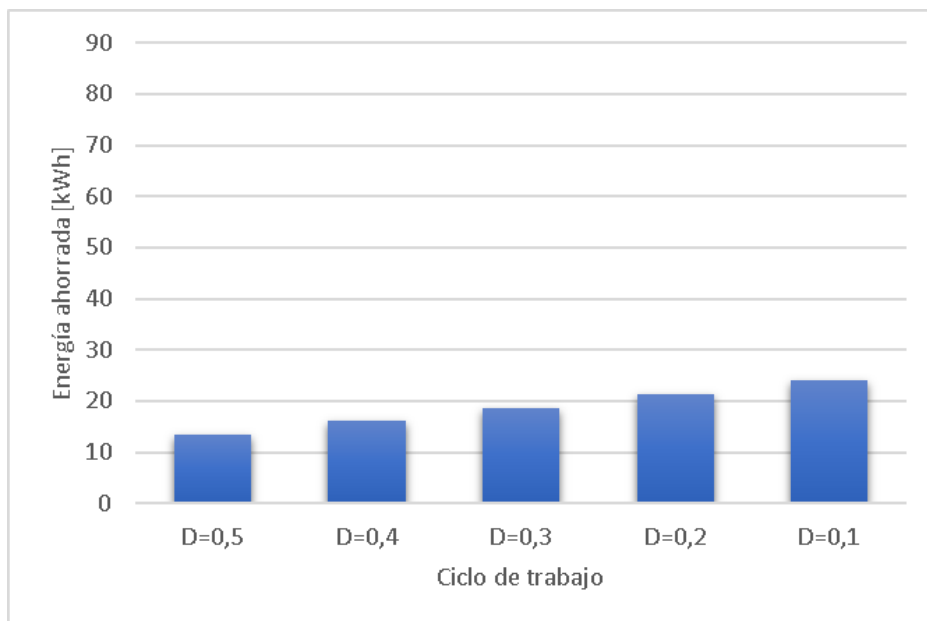


Figura 15 Ahorro energético incorporando un motor de 315 kW

2.7.1.1.5. Motor de 355 kW

Para este quinto caso, si incrementamos la potencia nominal del motor que acoplamos al mismo eje que el del motor de referencia y subimos la carga en los periodos de baja demanda mecánica a 333 kW, obtenemos los siguientes resultados:

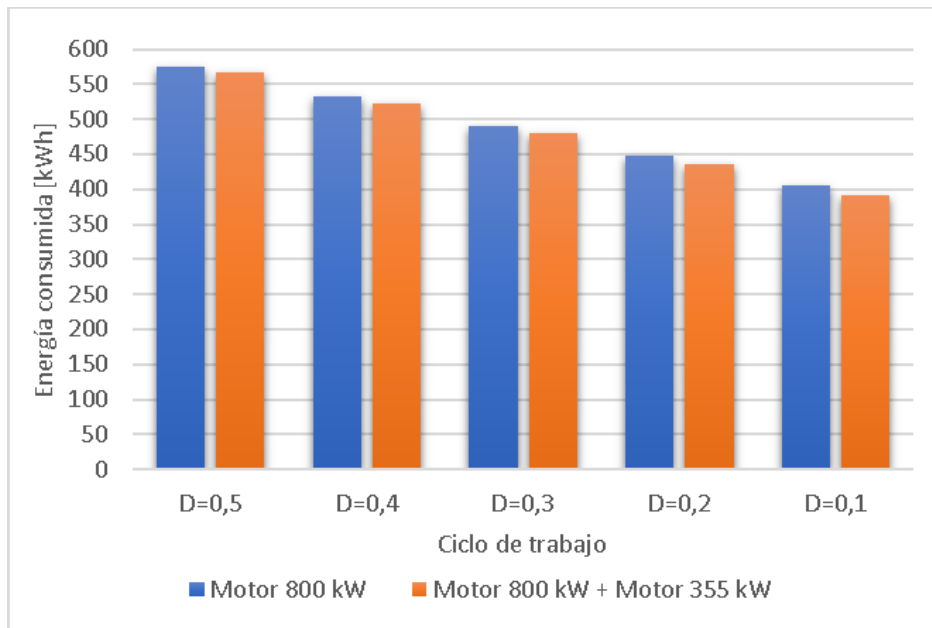


Figura 16 Consumos energéticos para motores de 800 kW y 355 kW

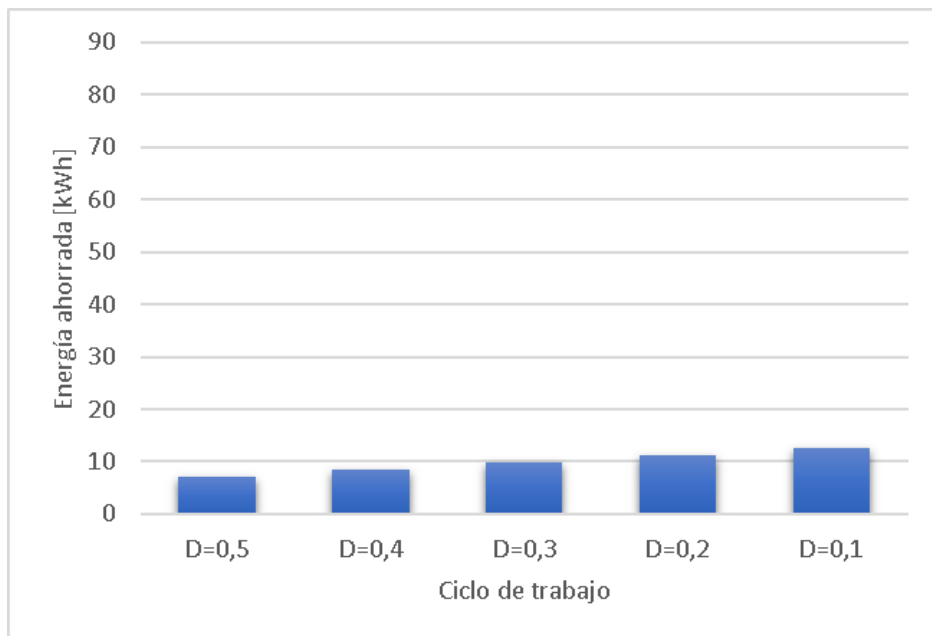


Figura 17 Ahorro energético incorporando un motor de 355 kW

2.7.1.1.6. Motor de 400 kW

En este último caso, la carga que se tiene que mover en periodos de baja demanda mecánica es de 375 kW y los resultados en cuanto a consumo y ahorro energético los presentamos a continuación:

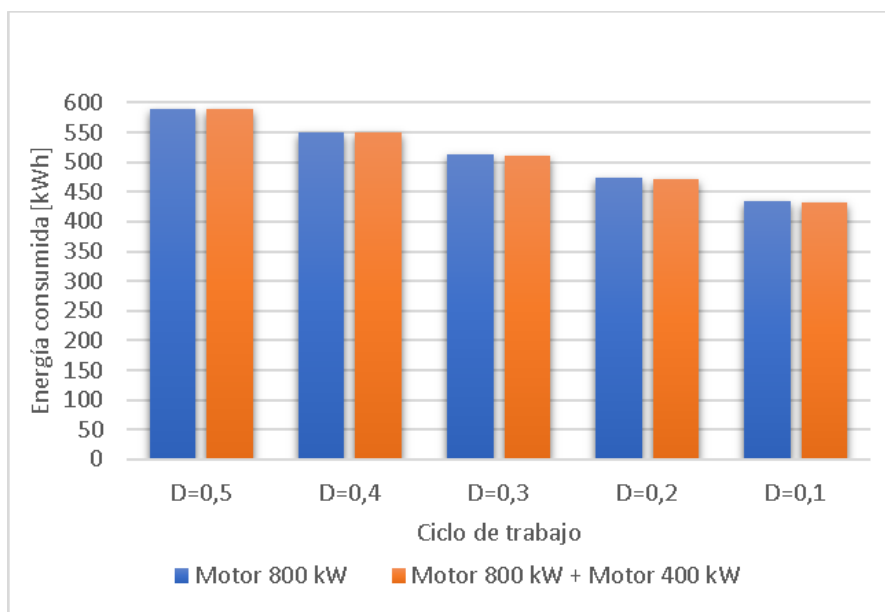


Figura 18 Consumos energéticos para motores de 800 kW y 400 kW

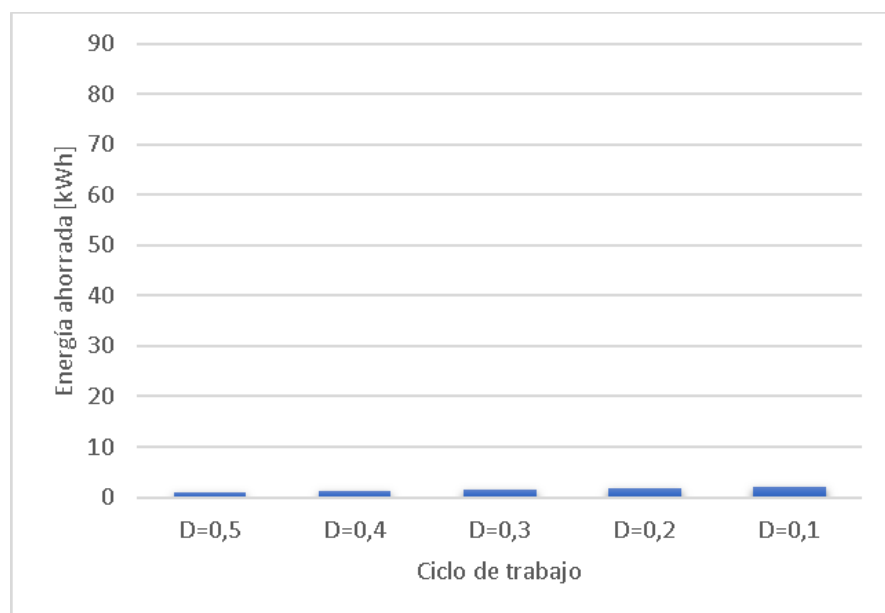


Figura 19 Ahorro energético incorporando un motor de 400 kW

2.7.2. Comparación de los Resultados

Al comparar los distintos resultados, lo primero que observamos es que contra menor sea el ciclo de trabajo, es decir, para valores de D cada vez más pequeños, se ahorra más energía. Por ejemplo, vemos que, si se instala el motor de 160 kW para mover una carga de 150 kW, para $D=0.1$, el ahorro energético conseguido es de aproximadamente 85 kWh por cada hora de funcionamiento, lo cual representa un ahorro por encima del 28% si únicamente se utilizase el motor de 800 kW tal y como demostramos en los cálculos del Anexo 3.1.1. *Motor de 160 kW*. Para el mismo motor y misma carga, si incrementamos el valor de D el ahorro va bajando progresivamente hasta quedarse en aproximadamente 48 kWh.

Además, vemos que contra mayor sea la carga considerada y, por tanto, mayor la potencia nominal del motor que se incorpora, menos energía conseguimos ahorrar con la combinación de motores. Esto se debe a que, tal y como comentaremos en el apartado 2.8.2. *Eficiencia de los motores*, contra mayor sea la carga, mejor eficiencia presentará el motor de 800 kW, y, por lo tanto, se conseguirá ahorrar menos energía con la combinación de los motores. Aun así, se consiguen ahorros de energía considerables hasta el tercer caso, es decir, hasta la combinación del motor de 800 kW y de 250 kW para cargas de 750 kW y 234 kW, en el cual, en el peor de los casos se consiguen ahorrar alrededor de 25 kWh y en el mejor de los casos este ahorro es superior a los 45 kWh. Apreciamos que, para este tercer caso, el mayor ahorro que se puede conseguir, el cual es para $D=0,1$ es muy similar al menor ahorro que se puede conseguir con la combinación del motor de 800 kW con el de 160 kW, el cual es para $D=0,5$.

Si a partir de este valor seguimos incrementando la carga menor, el motor de 800 kW comienza a presentar eficiencias elevadas y por lo tanto el ahorro energético obtenido al usar la combinación de motores cae en picado. Vemos que el ahorro obtenido con el motor de 315 kW cae a la mitad respecto el conseguido con el motor de 250 kW. Para el motor de 355 kW el ahorro sigue cayendo drásticamente.

Para el último caso estudiado, vemos que los consumos energéticos si únicamente utilizamos el motor de referencia y si usamos la combinación de motores son muy similares entre sí. Por lo tanto, al ser los consumos muy similares, el ahorro energético en este último caso es insignificante.

2.7.3. Análisis de Posibles Variables de Referencia

Tal y como hemos comentado en el apartado 2.6.3 *Automatización*, tenemos un total de cuatro posibles variables las cuales nos pueden servir de referencia para llevar a cabo las distintas conmutaciones, las cuales son velocidad mecánica, potencia activa absorbida, par motor desarrollado y la corriente eléctrica.

En cuanto a la corriente eléctrica, sabemos que los motores de inducción consumen tanto corriente activa como reactiva. La componente activa de la corriente se utiliza para poder desarrollar el par motor necesario para mover la carga. En cambio, la componente reactiva se utiliza para crear el campo magnético que origina el movimiento rotatorio. Por lo tanto, si se lleva a cabo un cambio de carga, únicamente variará el valor de la componente activa y no de la global. Sin embargo, los sensores de corriente eléctrica miden el valor eficaz de la corriente, una variable compleja con componente activa y reactiva por lo que la lectura de dicho sensor no nos es del todo útil. Por lo tanto, se descarta que la variable de conmutación sea la corriente eléctrica.

En cuanto a la velocidad mecánica, tal y como se muestra en la *Tabla 1 Características técnicas de los motores estudiados*, todos los motores giran en su régimen permanente a la misma velocidad. Además, tal y como se mostrará más adelante en el apartado 2.8.8.2 *Resultados de las Simulaciones*, al realizar el cambio de cargas y de motores, la variación de la velocidad es mínima, prácticamente inexistente. La diferencia es tan pequeña que los sensores no detectarían la diferencia y por ello se decide descartar también la velocidad.

Por tanto, de las 4 variables candidatas, únicamente nos quedan 2, las cuales son el par motor desarrollado y la potencia activa absorbida. Para determinar cuál de ellas es más conveniente, se decide simular el comportamiento de ambas variables cuando se conmuta de una carga a otra para los distintos motores de forma individual. En esta simulación, se considerará hipotéticamente que el cambio de cargas se efectúa en un total de 400 ms.

Los resultados gráficos de dichas simulaciones son las siguientes:

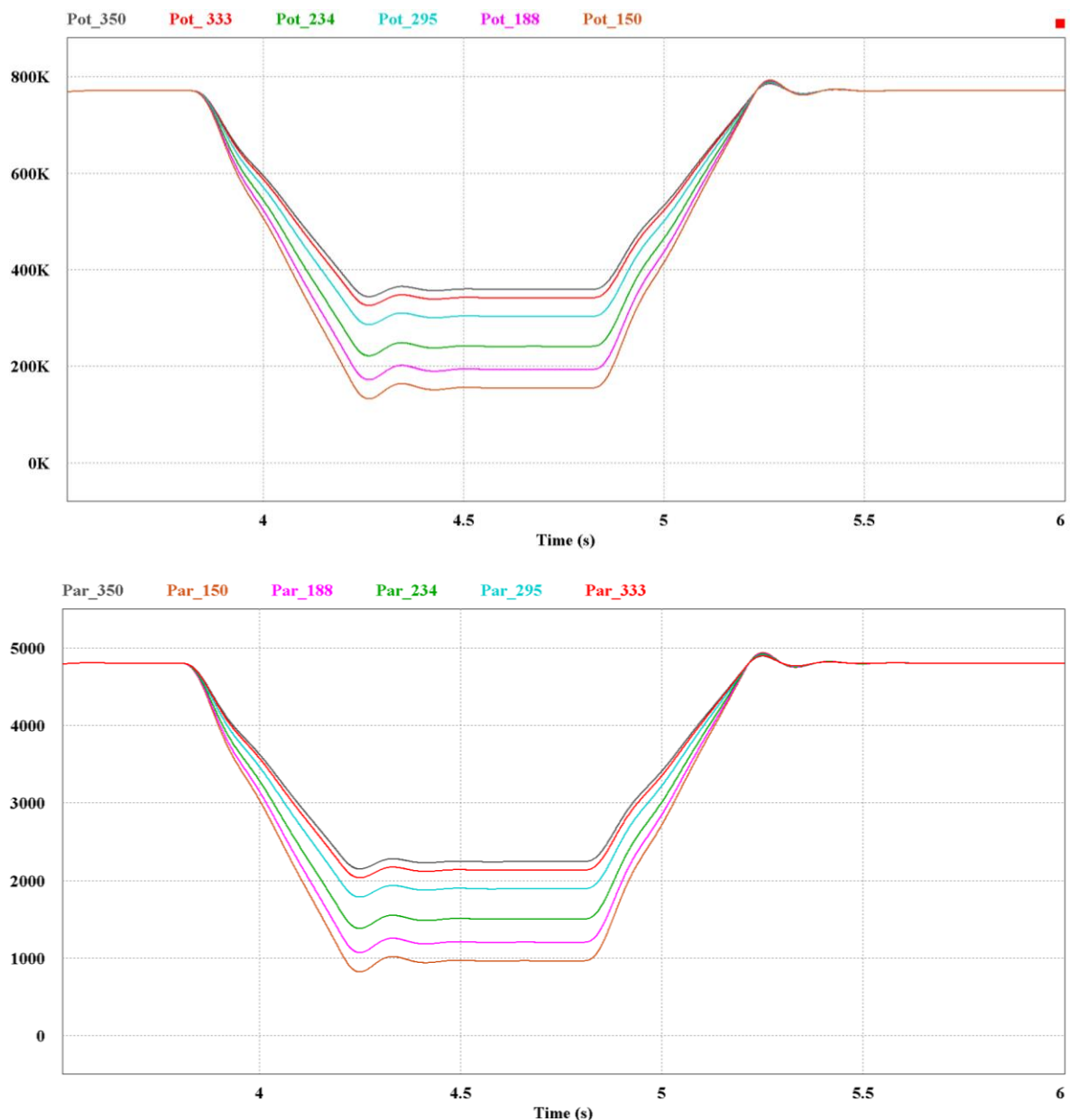


Figura 20 Pabs y T para cada cambio de carga del motor de 800 kW

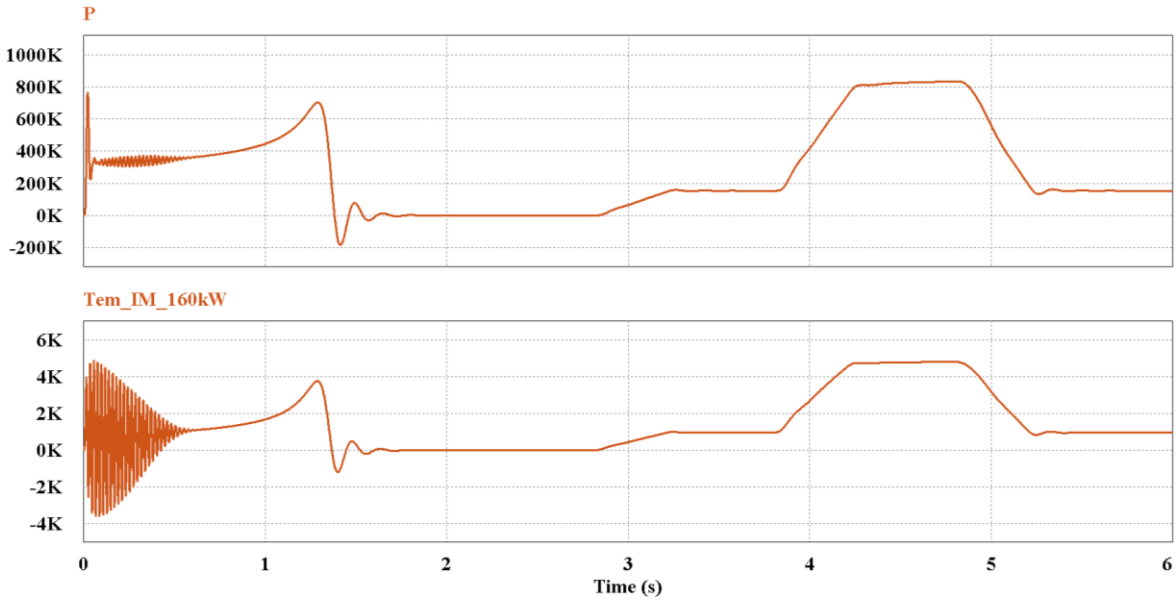


Figura 21 Pabs y T para el cambio de carga del motor de 160kW

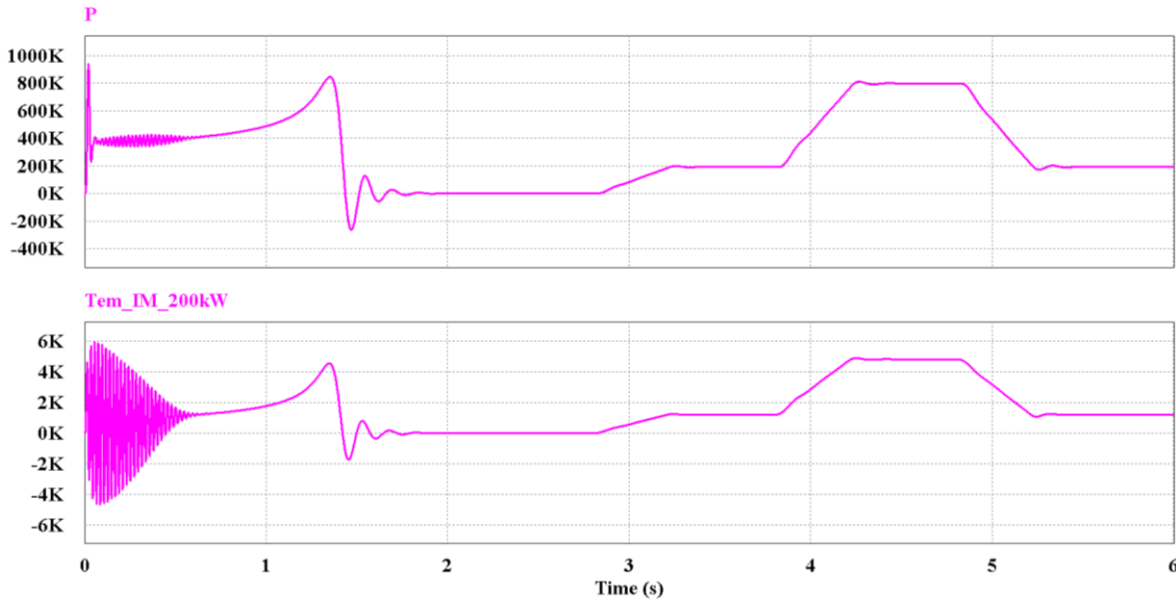


Figura 22 Pabs y T para el cambio de carga del motor de 200kW

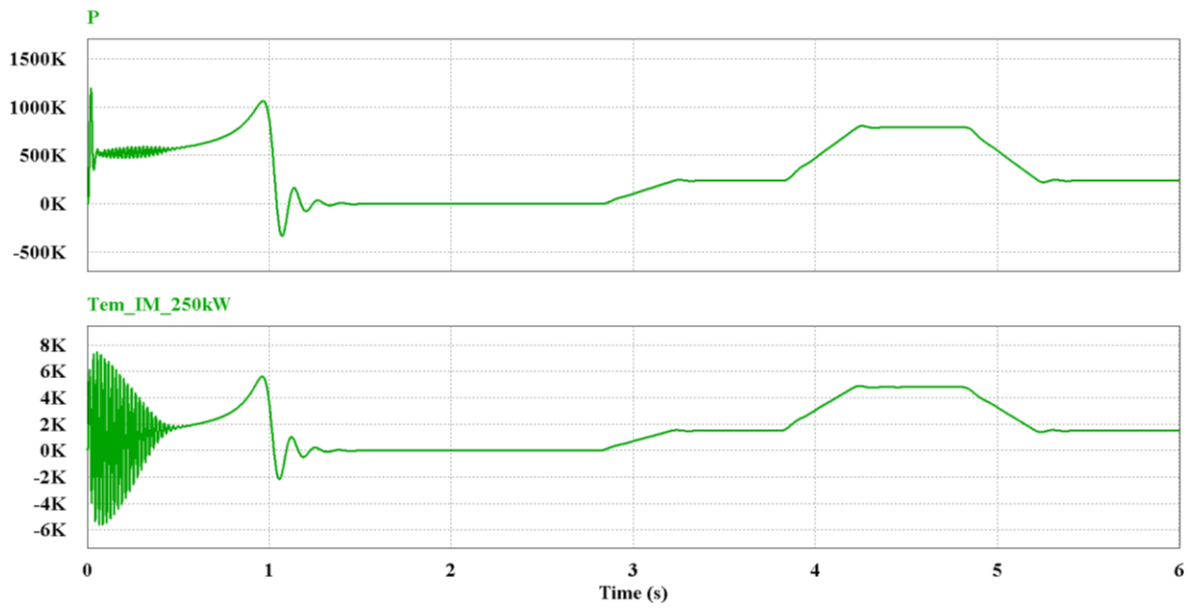


Figura 23 Pabs y T para el cambio de carga del motor de 250kW

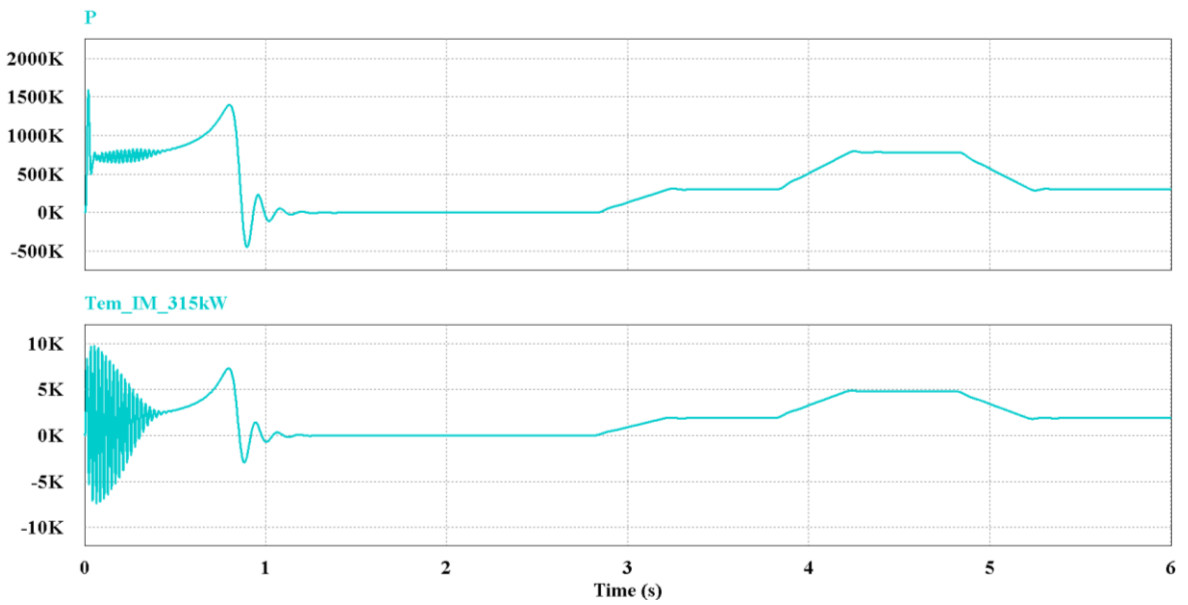


Figura 24 Pabs y T para el cambio de carga del motor de 315kW

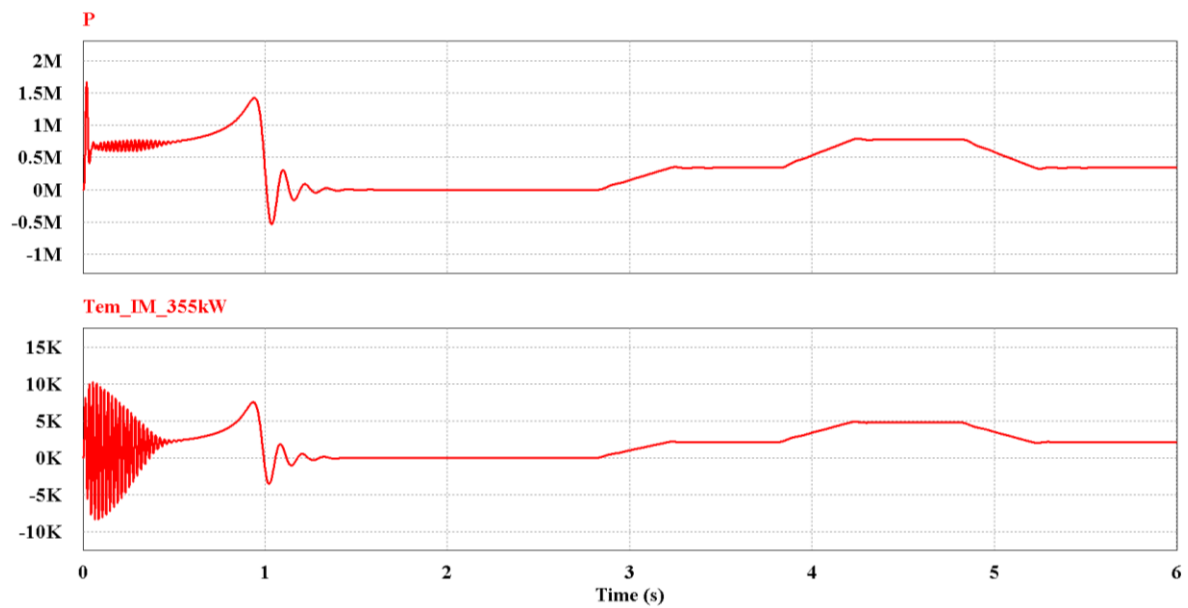


Figura 25 Pabs y T para el cambio de carga del motor de 355kW

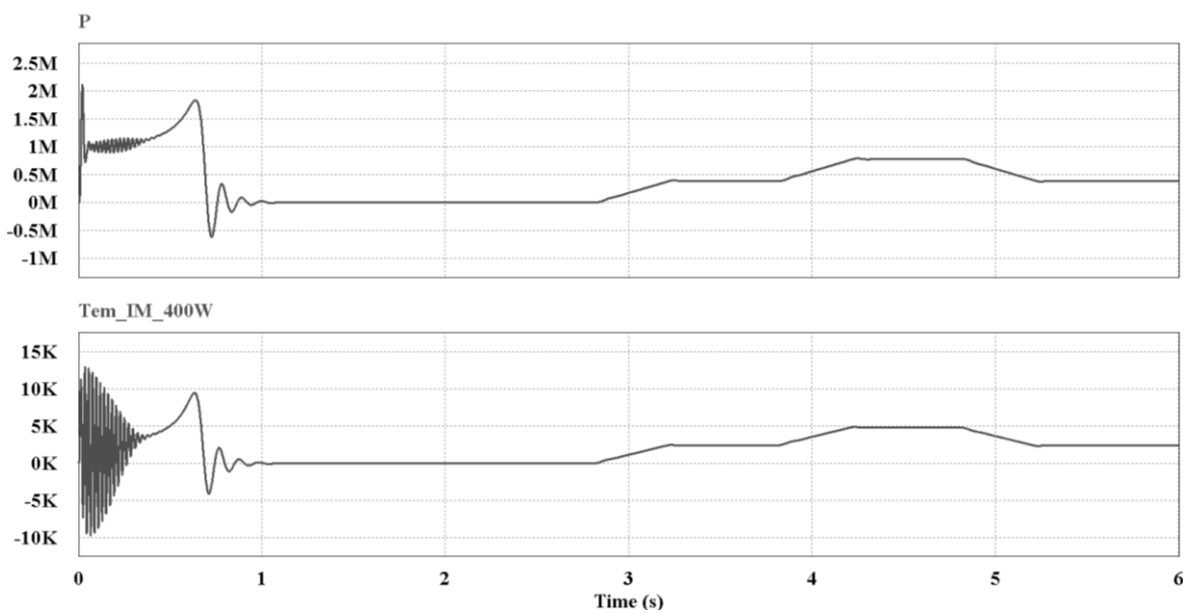


Figura 26 Pabs y T para el cambio de carga del motor de 400kW

Tal y como podemos observar en las anteriores Figuras, las curvas que describen la potencia activa absorbida y el par motor desarrollado son las mismas, pero a distinta escala. Esto se debe a que la potencia eléctrica absorbida es inversamente proporcional al rendimiento del motor de acuerdo con la expresión (10).

$$P_{abs} = \frac{P_{mec}}{\eta} \quad (10)$$

Siendo:

η Rendimiento del motor en el punto de funcionamiento correspondiente

P_{mec} Potencia mecánica del motor en cuestión [kW]

P_{abs} Potencia eléctrica absorbida. [kW]

Además, la potencia mecánica es directamente proporcional al par motor desarrollado, tal y como mostramos en la expresión (5). Por lo tanto, al combinar las expresiones (5) y (10), obtenemos:

$$P_{abs} = \frac{T \cdot \omega}{\eta} = T \cdot k \quad (11)$$

Siendo la variable k la relación entre la velocidad angular con la que gira el rotor y el rendimiento del motor. Al encontrarse el rendimiento en el denominador y ser este siempre inferior a 1, provoca que el valor k siempre sea superior a 1. Cuando el motor trabaja en su punto nominal, el valor de k será ligeramente superior al valor de la velocidad angular, puesto que en este punto de funcionamiento todos los motores presentan un rendimiento muy elevado.

Por lo que, en definitiva, llegamos a la conclusión de que la potencia eléctrica absorbida es directamente proporcional al valor del par motor de acuerdo con lo indicado en la expresión (11) y por ello la potencia eléctrica absorbida reproduce la misma gráfica que el par motor desarrollado, pero a una escala k veces superior.

Una vez explicado el motivo de la semejanza de las gráficas de ambas variables, apreciamos que ambas son viables para que sea nuestra variable de referencia para llevar a cabo la conmutación, ya que existe un desnivel muy pronunciado cuando se producen cambios de carga y estos se mantienen constantes durante el estado estacionario.

2.8. Resultados finales

En el presente apartado indicaremos el procedimiento seguido para obtener los resultados finales del presente TFG así como los resultados en si.

2.8.1. Selección de Motores

En el presente apartado comentaremos los criterios que se han tenido en cuenta para seleccionar los distintos motores del presente estudio.

Decidimos escoger motores del fabricante ABB debido a que en su catálogo nos proporciona datos de rendimiento para el 50, 75 y 100% de la carga, lo cual es suficiente para modelizar posteriormente el rendimiento en función de la carga.

En su catálogo ofrecen motores de distintas clases de eficiencia. Optamos por escoger motores de la clase de eficiencia IE4, ya que son, dentro del catálogo, los que mejor eficiencia presentan.

Además, se decidió escoger motores alimentados a 400V, 50 Hz y con 4 polos ya que en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Rovira i Virgili se cuenta con motores de inducción con este mismo número de polos. Se quiso escoger motores con los mismos pares de polos ya que se tenía una idea inicial de tomar medidas reales en el laboratorio para compararlas con las teóricas, y, por tanto, se quiso estudiar motores lo más parecidos posibles. Sin embargo, debido a las restricciones sanitarias debido al Covid-19, no se pudo realizar dicha práctica.

2.8.1.1. Selección del Motor de Referencia

Para seleccionar nuestro motor de referencia se decidió escoger uno de los motores con mayor potencia nominal del catálogo ofrecido por ABB. Por ello, se decidió escoger un motor de 800 kW, el cual ofrecía la posibilidad de poder comparar la evolución del ahorro obtenido con muchos motores de menor potencia.

Las características técnicas de nuestro motor de referencia se presentan en el apartado *2.6.1.1 Motores Estudiados*.

2.8.1.2. Selección de los Motores Comparativos

En cuanto a la selección de los motores con los que compararemos el consumo, se decide escoger motores de potencias nominales normalizadas y presentes en el catálogo de ABB.

Se decide realizar el estudio a partir de un motor con una potencia nominal 5 veces más pequeña que la de nuestro motor de referencia e ir subiendo la potencia nominal del motor con valores normalizados.

Además, se decide aumentar el valor de la potencia nominal del segundo motor hasta únicamente un 50% del valor de la potencia nominal de motor de referencia. Esto se debe a que por encima del 50% de la potencia nominal, el motor de referencia ya presenta una eficiencia muy elevada, de mínimo 96,2% y, en el mejor de los casos, los motores por encima de 400 kW a plena carga presentan un rendimiento de 96,7%. Además, el precio de los motores por encima de 400 kW, según las tarifas de ABB, está por encima de 60.000€, lo que significaría realizar una inversión por encima del 50% del precio del motor de referencia para conseguir una eficiencia superior en 0,5 en el mejor de los casos. Por lo que se llega a la conclusión de que no sería rentable la instalación de motores por encima de 400 kW y por ello se decide no estudiarlos.

Las características técnicas de todos los motores con los que se realiza la comparación de consumo energético se mostraron en el apartado *2.6.1.1 Motores Estudiados*.

2.8.2. Eficiencia de los Motores

Para poder analizar el ahorro energético que obtendremos al poner dos motores en el mismo eje mecánico con distintas cargas, debemos de modelizar matemáticamente su eficiencia. Esto lo realizamos a partir de los datos proporcionados por el fabricante, el cual nos da la eficiencia en 3 puntos de funcionamiento tal y como podemos observar en la *Tabla 1*.

Con estos 3 puntos, más el del origen, podemos extrapolar y obtener unas curvas de eficiencia aproximadas en función de la potencia mecánica desarrollada por el motor, en otras palabras, podemos modelizar la eficiencia. Además, si conocemos la expresión matemática que define estas curvas, podemos saber la eficiencia del motor para cualquier punto de funcionamiento y, con ello, saber cuál es la potencia absorbida en cada punto.

A continuación, mostraremos una serie de gráficas donde compararemos las curvas de eficiencia de los distintos motores estudiados con la curva de eficiencia de nuestro motor de referencia.

• **Combinación motor 800 kW + motor 160 kW**

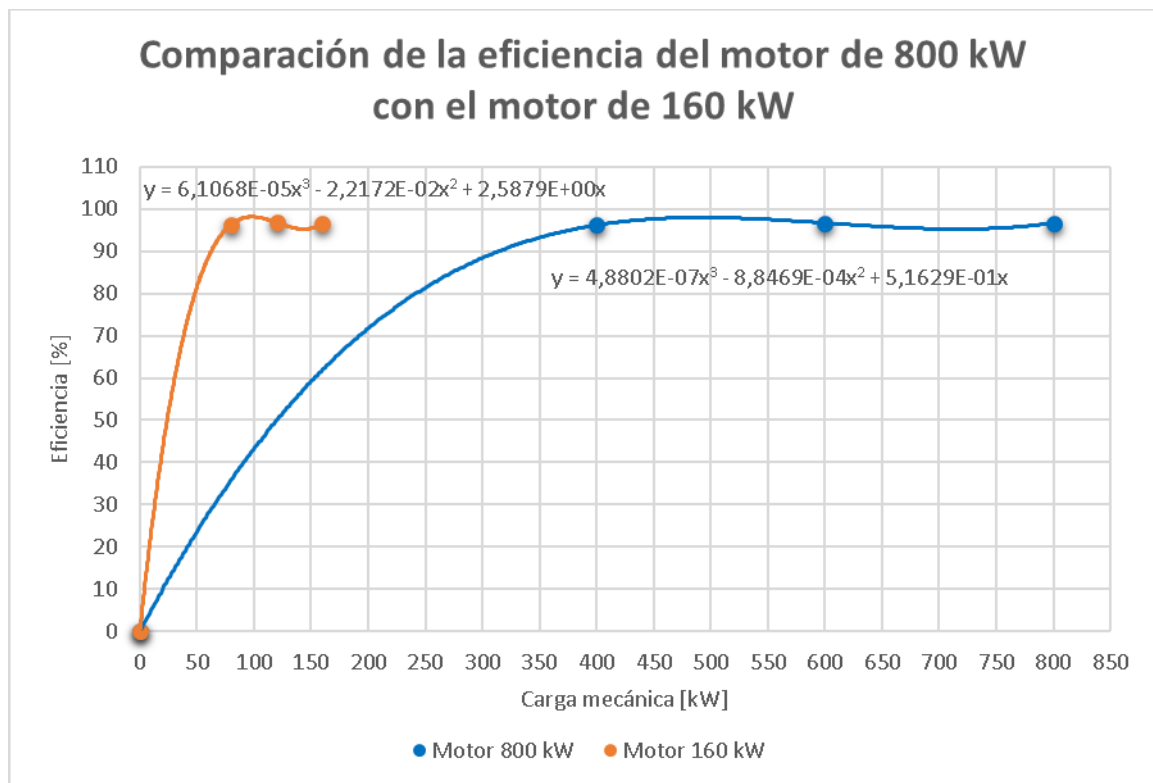


Figura 27 Motor de 800 kW vs motor de 160 kW

• **Combinación motor 800 kW + motor 200 kW**

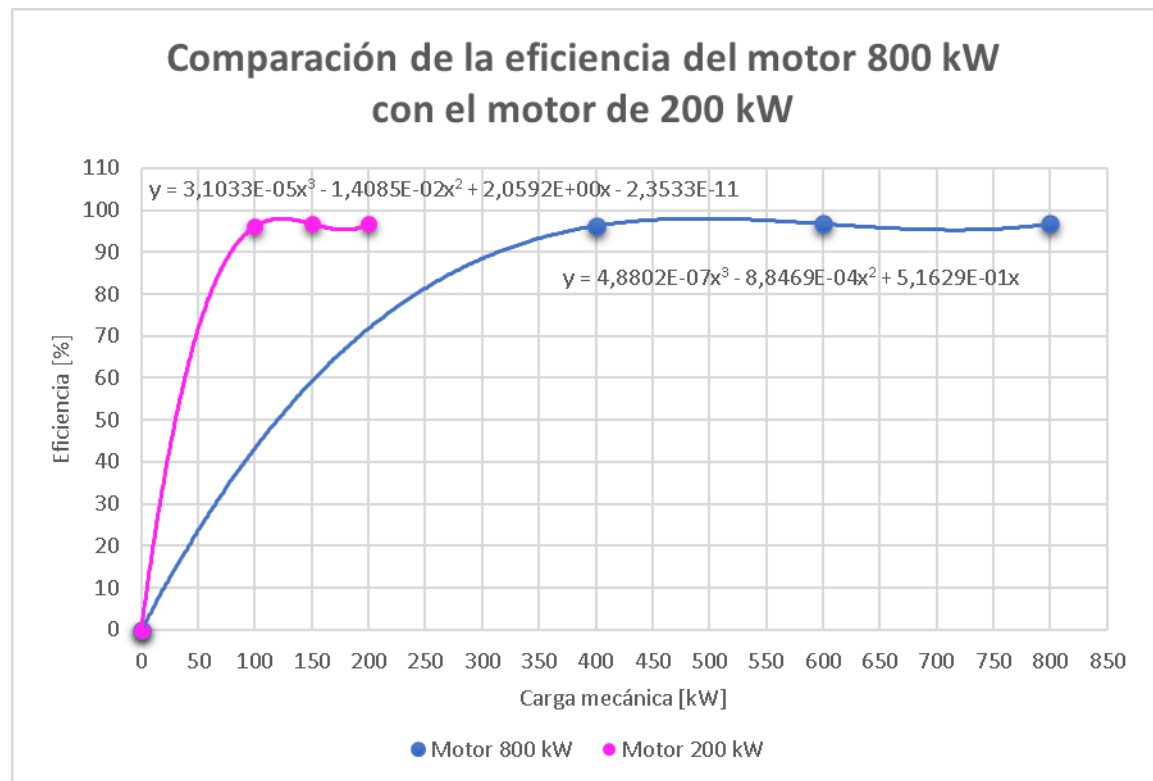


Figura 28 Motor de 800 kW vs motor de 200 kW

• **Combinación motor 800 kW + motor 250 kW**

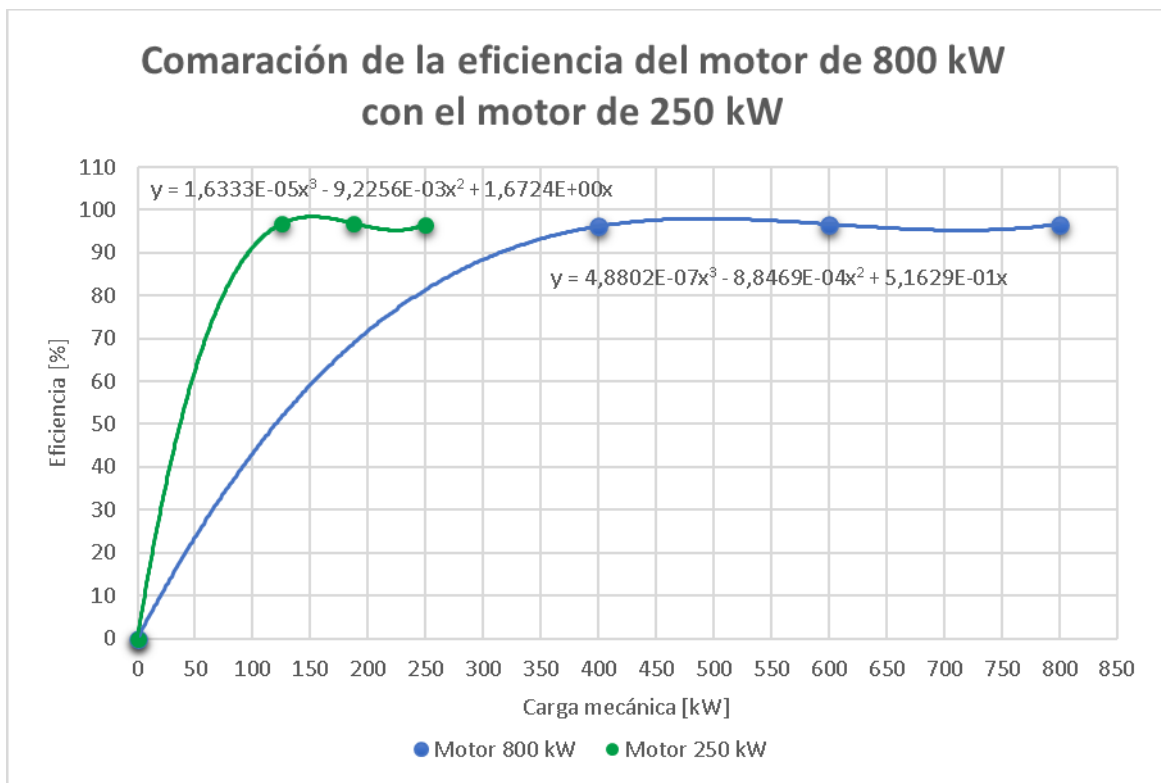


Figura 29 Motor de 800 kW vs motor de 250 kW

• **Combinación motor 800 kW + motor 315 kW**

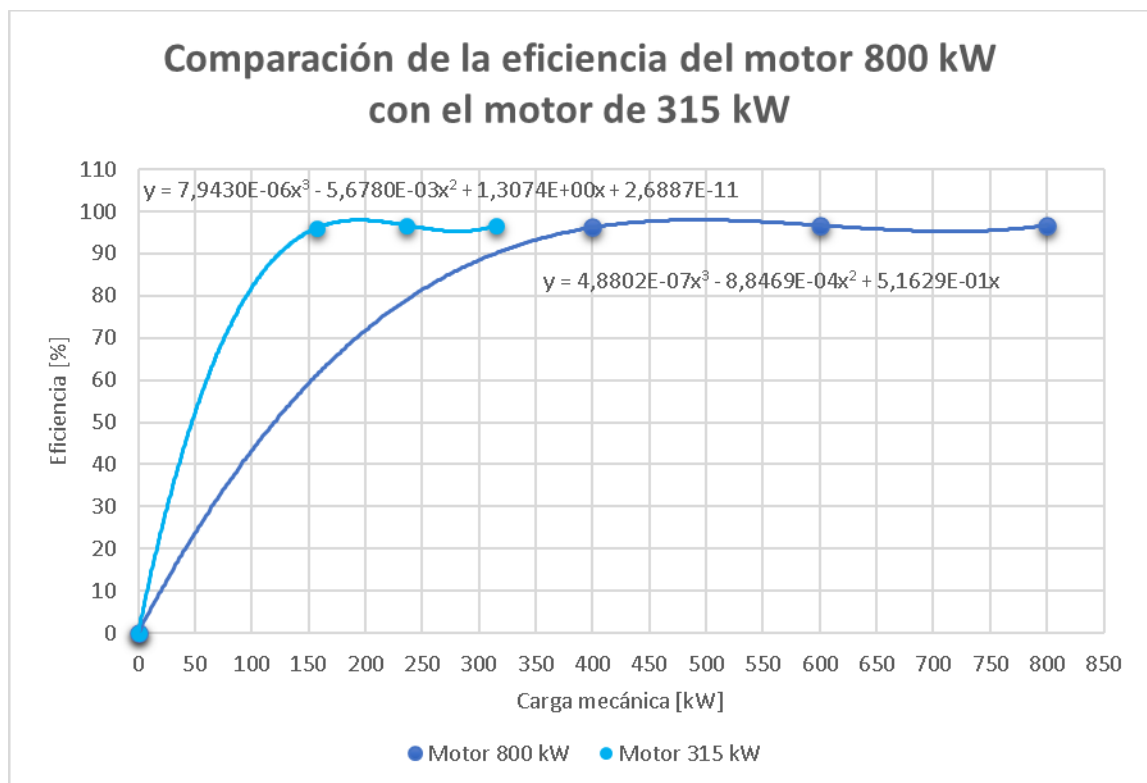


Figura 30 Motor de 800 kW vs motor de 315 kW

• **Combinación motor 800 kW + motor 355 kW**

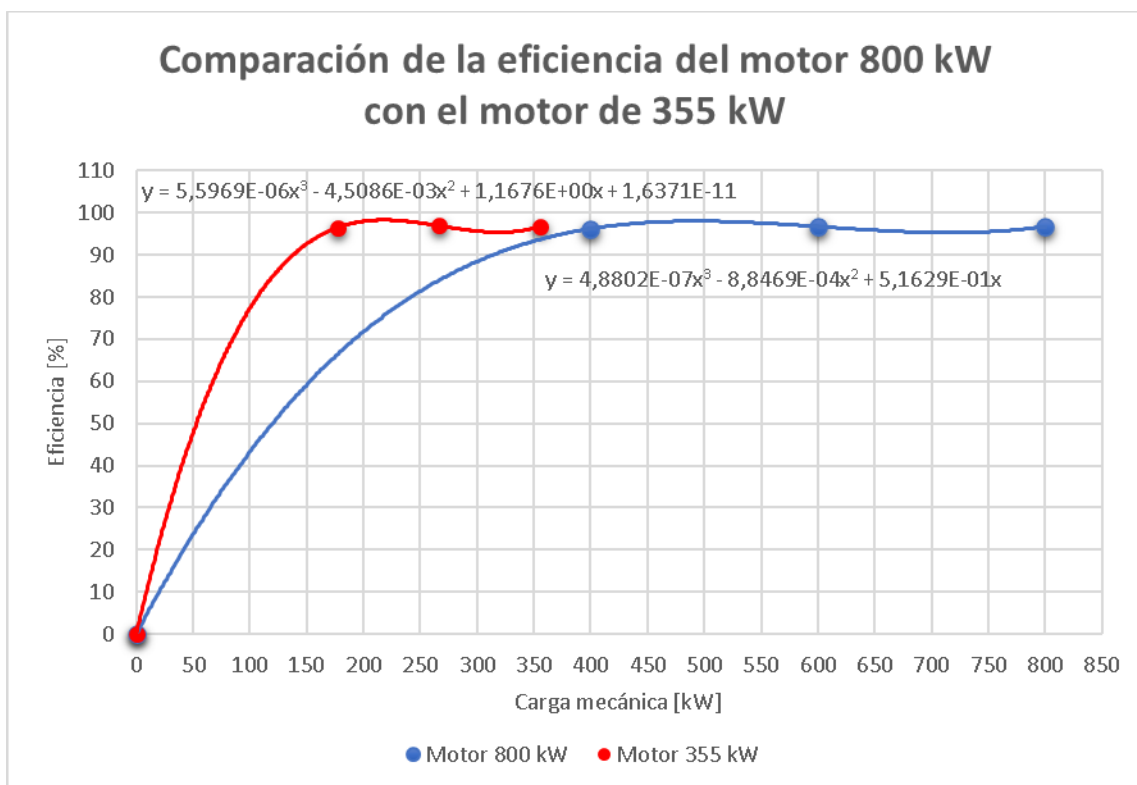


Figura 31 Motor de 800 kW vs motor de 355 kW

• **Combinación motor 800 kW + motor 400 kW**

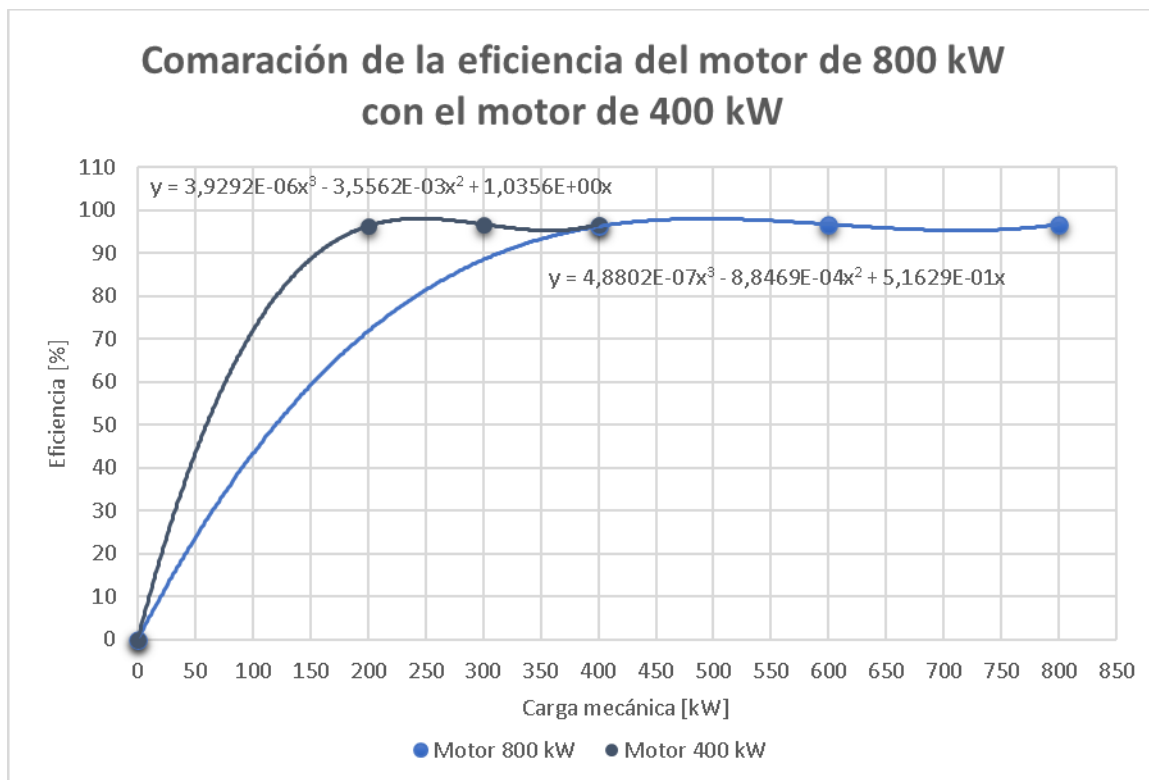


Figura 32 Motor de 800 kW vs motor de 400 kW

Tal y como podemos observar en las anteriores *Figuras*, el motor de 800kW mantiene una buena eficiencia para cargas mecánicas superiores al 50% de su potencia nominal, es decir, para carga mecánicas superiores a 400 kW. Por debajo de este valor, vemos como la eficiencia baja rápidamente.

Al comparar las distintas curvas de Eficiencia -Carga mecánica de los distintos motores, vemos que para una carga en la que el motor de 800 kW tiene mala eficiencia, el motor de menor potencia podría mover la misma carga a una mayor eficiencia.

Este último hecho que hemos comentado se acentúa cada vez más contra menor sea la carga que se considera, o, dicho en otras palabras, contra menor sea la carga en los periodos de baja demanda mecánica, es más rentable instalar un segundo motor de menor potencia.

2.8.3. Clase de Servicio y Ciclos de Trabajo

De acuerdo con la norma UNE-EN 60034-1, existen un total de 10 tipos de servicio distintos. En nuestro caso, hemos decidido optar por la clase de servicio S10 puesto que dicho servicio consta de x cargas mecánicas constantes y diferentes entre sí.

En nuestro caso decidimos que se tratará de dos cargas, es decir, habrá dos posibles puntos de funcionamiento por cada combinación de motores que hagamos. Se decide que las cargas que se estudien presenten un par resistente constante con el objetivo de facilitar el análisis.

En cuanto a la demanda mecánica, está se decide que durará las 24 horas del día, siendo $T_{\text{carga mayor}}$ el periodo de tiempo con mayor demanda mecánica y $T_{\text{carga menor}}$ el periodo con menor demanda.

Además, se estudiarán 5 ciclos de trabajos distintos. Tal y como ya se comentó anteriormente, el ciclo de trabajo D hace referencia a la fracción del tiempo de funcionamiento en que se conecta la carga de mayor demanda mecánica.

Por lo tanto, definimos el tiempo en que se conecta la carga mayor y la carga menor de la siguiente forma:

$$T_M = T_F \cdot D \quad (12)$$

$$T_m = T_F \cdot (1 - D) \quad (13)$$

Siendo:

T_M Periodo con mayor demanda mecánica [h]

T_m Periodo con menor demanda mecánica [h]

T_F Tiempo de funcionamiento considerado [h]

D Ciclo de trabajo [pu]

Como en el presente escrito se decide estudiar los casos desde D=0.5 hasta D=0.1 significa que se estudiarán los casos desde que las cargas se conectan ambas a un 50% del tiempo de funcionamiento total hasta que la carga mayor se conecta únicamente un 10% del tiempo y la carga menor el 90% restante.

2.8.4. Consumo y Ahorro Energético

En el presente apartado se explicará el proceso de cálculo del ahorro energético para cada uno de los motores y ciclos de trabajo.

Se realizará el cálculo de la potencia absorbida y energía consumida para cada combinación de motores, comparando la energía que se consume si solo trabaja el motor de 800 kW y la energía que se consume si se conecta el motor de menor potencia en los periodos de menor demanda. Se iniciará calculando el ahorro energético con el motor de menor potencia hasta llegar al de mayor potencia.

Para conocer la potencia absorbida en ambos puntos de funcionamiento, aplicaremos las expresiones matemáticas que definen el rendimiento de cada motor vistas en las *Figuras* del apartado 2.8.2. *Eficiencia de los Motores*. Por lo tanto, como conocemos la eficiencia de los motores en ambos puntos y las potencias mecánicas desarrolladas, obtenemos la potencia eléctrica absorbida a partir de la expresión (10).

Para calcular la energía consumida en el tiempo en que se conecta la carga mayor, la cual recordamos que siempre será de 750 kW, aplicaremos la siguiente expresión:

$$E_{abs_M} = P_{abs} \cdot T_M = P_{abs} \cdot T_F \cdot D \quad (14)$$

Siendo E_{abs_M} la energía consumida en periodos de mayor demanda mecánica en kWh y recordamos que ya hemos explicado anterior el significado y unidades del resto de variables.

Por otro lado, para calcular la energía consumida cuando se conecta la carga menor, aplicaremos la siguiente expresión:

$$E_{abs_m} = P_{abs} \cdot T_m = P_{abs} \cdot T_F \cdot (1 - D) \quad (15)$$

Siendo E_{abs_m} la energía consumida en periodos de menor demanda mecánica en kWh

Por lo tanto, la energía eléctrica consumida total es la suma de ambas energías. Esto es:

$$E_{abs} = E_{abs_M} + E_{abs_m} \quad (16)$$

Siendo E_{abs} la energía eléctrica total consumida en kWh.

A la hora de realizar los cálculos, se ha considerado que para cada hora de cada día se tiene una misma D. En otras palabras, se considera el valor T_F igual a 1 hora para así calcular la energía que se consume cada hora por la combinación de cargas. Tomamos esta decisión con el objetivo de, posteriormente, facilitar el cálculo del ahorro económico anual, tal y como mostramos en el apartado 2.8.5. *Ahorro económico*.

Por lo tanto, considerando $T_F=1h$, las expresiones (14) y (15) se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$E_{abs_M} = P_{abs} \cdot D \quad (17)$$

$$E_{abs_m} = P_{abs} \cdot (1 - D) \quad (12)$$

Posteriormente, calcularemos la energía ahorrada aplicando la siguiente expresión:

$$E_a = E_{abs_{M_{800}}} - E_{abs_{comb.}} \quad (19)$$

Siendo:

E_a Energía que se consigue ahorrar al aplicar la combinación de motores [kWh]

$E_{abs_{M_{800}}}$ Energía consumida si únicamente trabaja el motor de referencia [kWh]

$E_{abs_{comb.}}$ Energía consumida con la combinación de motores [kWh]

Una vez obtenida la energía ahorrada, calculamos el ahorro en tanto por ciento para facilitar así la comparación entre distintas D. Este último cálculo lo realizaremos de la siguiente forma:

$$\eta_E = \frac{E_a}{E_{ab_{SMR_{00}}}} \cdot 100 \quad (20)$$

2.8.5. Ahorro Económico

En el presente apartado indicaremos el proceso que se ha seguido para traducir el ahorro energético que se obtiene a partir de las expresiones indicadas en el apartado anterior en euros.

Para ello, buscamos el precio de la energía en € / kWh. En el mercado existen numerosas tarifas reguladas de los precios de energía. Cabe destacar que, aunque los motores se alimenten a 400 V, nos tenemos que conectar obligatoriamente por medio de un CT propio a la red de MT. Esto se debe a que de acuerdo con el Real Decreto 1995/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica, cuando la potencia solicitada sea superior a los 100 kW, debemos de contar con un CT propio.

Como podemos apreciar siempre contamos con motores con una potencia superior al umbral de 100 kW, por lo que nos vemos obligados a ser abonados en alta tensión.

2.8.5.1. Tarifa 6.1A

Existen varias tarifas de abonados en AT pero en nuestro caso, la tarifa que mejor se ajusta a nuestras necesidades energéticas es la denominada tarifa 6.1 A. Esta tarifa se aplica a aquellas instalaciones cuya tensión de alimentación está entre 1 kV y 30 kV y que en algún periodo de funcionamiento se cuente con una potencia superior a 450 kW. En Cataluña la red de Media Tensión es de 25 kV y siempre tendremos conectado en algún periodo el motor de 800 kW, por lo que cumplimos con los requisitos para poder abonarnos a esta tarifa.

La tarifa 6.1.A recibe este nombre porque cuenta con una discriminación horaria en 6 periodos, variando el precio de la energía para cada uno de estos periodos tal y como mostramos en la *Tabla 3*

| Periodo P | Precio de la energía [€/kWh] |
|-----------|------------------------------|
| 1 | 0.104222 |
| 2 | 0.090524 |
| 3 | 0.080056 |
| 4 | 0.071919 |
| 5 | 0.069743 |
| 6 | 0.060136 |

Tabla 3 Precio de la energía según la tarifa 6.1A en el año 2021

Estos 6 periodos se distribuyen entre todas las horas del año en función del día, del mes e incluso en función de si se trata de días festivos y fines de semanas, tal y como podemos apreciar en la *Figura 33*.



Figura 33 Distribución de los periodos P de la tarifa 6.1A en el año 2021

Para poder realizar el análisis con tantas variables y poder determinar el ahorro económico, se decide elaborar un programa en Matlab.

A través de este programa, le asignamos a cada hora de cada día del año su periodo P correspondiente de acuerdo con la *Figura 33*. Posteriormente, sabiendo, pues, la energía consumida en cada hora en función de la carga y del ciclo de trabajo D, y sabiendo el periodo P al que pertenece cada una de las horas del año, y por ende el precio de la energía por hora, podemos determinar el coste de dicha energía anualmente si únicamente trabaja el motor de 800 kW y el coste si se trabaja con la combinación de motores.

Una vez conocidos estos costes, realizamos la diferencia entre el coste de la energía cuando únicamente trabaja el motor de mayor potencia y el coste de la energía cuando se trabaja con la combinación de motores y obtenemos así el ahorro económico.

En el Anexo 3.2 *Programación en Matlab* se explica de forma detallada el funcionamiento del programa mencionado, así como indicar las variables que se han utilizado y proceso de programación.

2.8.6. Tiempo de Amortización

En el presente apartado expondremos el proceso del cálculo del tiempo que se tardaría en amortizar la inversión necesaria que supone instalar un segundo motor en el mismo eje mecánico.

Para realizar este cálculo necesitaremos saber previamente el ahorro económico anual y el precio de los distintos motores.

El ahorro económico por cada combinación de motores y ciclo de trabajo lo calculamos a partir de la programación en Matlab, tal y como hemos comentado en el apartado anterior. En cuanto a los precios de los motores, acudimos a las tarifas de ABB publicadas en enero de 2021 del precio de motores de baja tensión.

A partir de estas tarifas de ABB, sabemos que el precio de cada uno de los motores que se han estudiado en el presente TFG son los siguientes:

| P_N [kW] | Precio [€] |
|------------|------------|
| 160 | 22.630,00 |
| 200 | 27.975,00 |
| 250 | 35.103,00 |
| 315 | 44.012,00 |
| 355 | 49.714,00 |
| 400 | 56.129,00 |
| 800 | 112.080,00 |

Tabla 4 Precio de los motores

Una vez que sabemos el precio de los motores y el ahorro económico anual que se consigue al instalarlo, podemos calcular el tiempo en años que se tardará en amortizar la inversión de la siguiente manera:

$$t_a = \frac{Q}{P_m} \quad (21)$$

Siendo:

| | |
|-------|--------------------------------------------------|
| t_a | Tiempo de amortización [años] |
| Q | Ahorro económico conseguido anualmente [€ / año] |
| P_m | Precio del motor que se incorpora [€] |

Dicha operación la repetimos para cada uno de los motores y ciclo de trabajo por medio, de nuevo, de la programación en Matlab, de la cual hablamos de forma detallada en el Anexo 3.2.2.2 *Cálculo de los Ahorros y Tiempo de Amortización*

2.8.7. Representación Gráfica de los Resultados

Una vez desarrollado todo el proceso que hemos comentado anteriormente y realizados todos los cálculos que hemos comentado en los anteriores apartados por medio de la programación en Matlab, conseguimos una serie de resultados finales.

Estos resultados, los mostraremos gráficamente uniendo en una sola gráfica todos los resultados obtenidos de ahorro energético, ahorro económico o tiempo de amortización para todos los motores y ciclos de trabajo estudiados.

En el Anexo 3.2.2.3 *Graficar Resultados* comentaremos tanto las funciones que se han utilizado en la programación de Matlab para la obtención de las distintas gráficas como el trato de los datos para ordenarlos de la forma deseada.

2.8.7.1. Resultados Finales del Ahorro Energético

Los resultados obtenidos en cuanto al ahorro energético anual que se obtiene para cada combinación de motores los mostramos en las figuras (34) y (35):

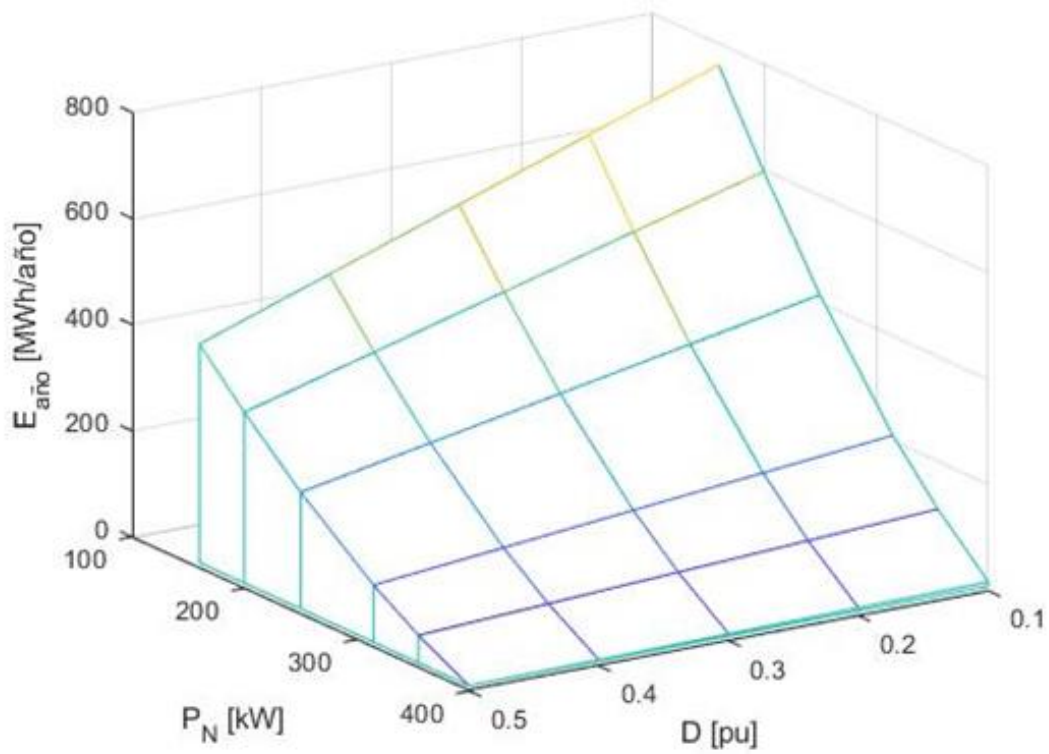


Figura 34 Ahorro energético

Si mostramos la *Figura 34* en 2D por medio de gráficas de contorno obtenemos lo siguiente:

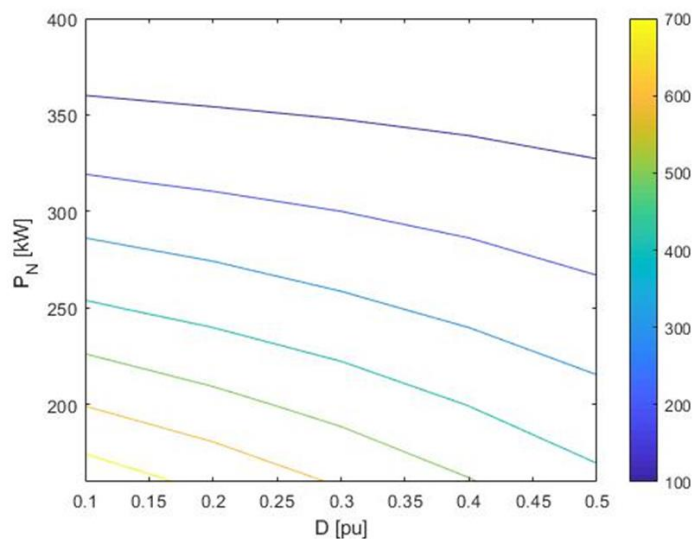


Figura 35 Ahorro energético 2D

En función del color que tenga cada línea, se representa un valor distinto, el cual se indica en la columna de colores de la derecha en MWh/año.

Con estas gráficas vemos de forma más clara el cómo varía el ahorro energético en función de la potencia del motor y ciclo de trabajo respecto a lo que mostramos y comentamos en los apartados 2.7. *Análisis de Soluciones* y la conclusión a la que se llega es a la misma que se comenta en el apartado 2.7.2. *Comparación de los Resultados*.

2.8.7.2. Resultados Finales del Ahorro Económico

A continuación, mostramos los resultados obtenidos en cuanto ahorro económico anual al utilizar las distintas combinaciones de motores y ciclos de trabajo:

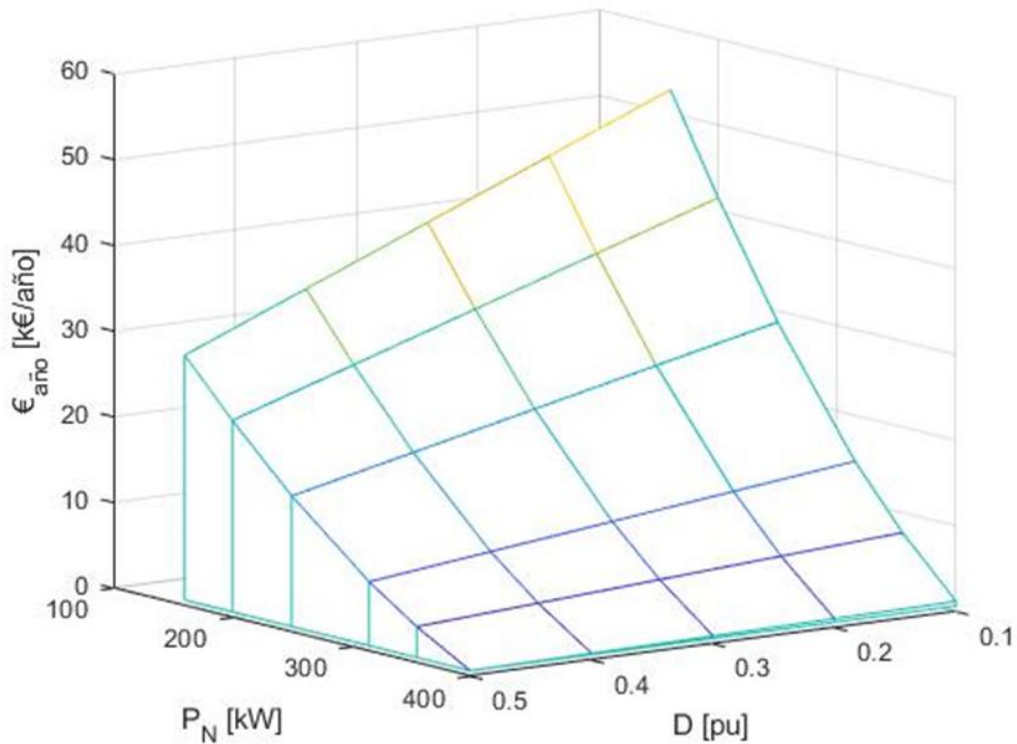


Figura 36 Ahorro económico

Su gráfica de contorno es la que mostramos a continuación:

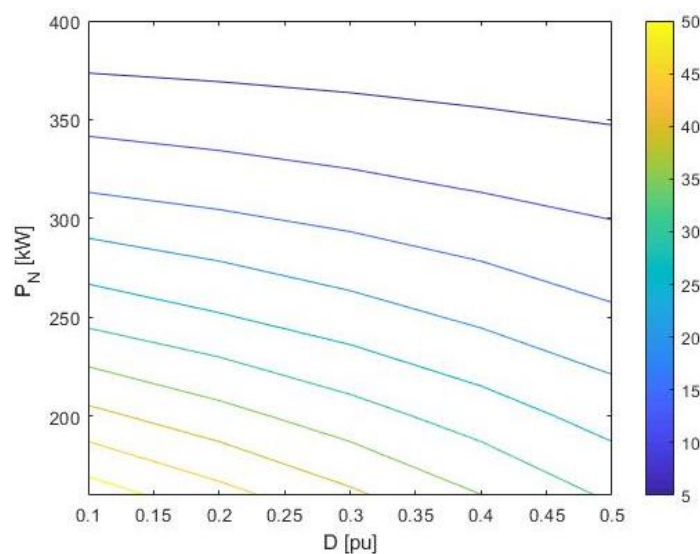


Figura 37 Ahorro económico 2D

Al igual que el caso anterior, el valor de cada línea depende de su color. Dichos valores en función del color se representan en la columna de colores de la derecha en k€/año

Vemos que contra menor sea el ciclo de trabajo y menor sea la potencia nominal del motor que se incorpora en el eje mecánico, se consigue un mayor ahorro económico. Esto se debe a que tal y como hemos mostrado en las figuras del subapartado anterior, contra menor sean ciclo de trabajo y menor sea el motor incorporado se ahorra más energía y como es obvio el ahorro económico también.

Como podemos apreciar, si incorporamos un motor de 160 kW cuando la carga menor es de 150 kW, para $D=0.1$ el ahorro económico supera los 50.000€ anuales, con lo que la compra de dicho motor se podría amortizar en poco tiempo. En cambio, para $D=0.5$ el ahorro económico se queda en aproximadamente 27.000€ anuales, lo cual sigue siendo un ahorro muy significativo.

Al igual que pasaba en el apartado anterior, al ir aumentando la potencia nominal de los motores que se incorporan, el ahorro económico que se consigue va descendiendo hasta llegar al motor de 400 kW donde vemos que al ahorro en euros es infinitamente menor que el resto de los casos.

2.8.7.3. Resultados Finales del Tiempo de Amortización

En lo referente al tiempo de amortización, se presentarán dos resultados. Esto se debe a que, tal y como podrá comparar el lector posteriormente, el tiempo de amortización si se realiza la inversión para instalar el motor de 400 kW, es muy elevado y al compararlo en una misma escala en una misma gráfica con el resto de los motores, provoca que el resto de los resultados se aplanen y no se aprecien bien.

Por este motivo se opta por presentar primero los resultados de tiempo de amortización sin considerar el motor de 400 kW y posteriormente considerándolo para el lector comprenda mejor la gran diferencia que existe.

Por lo tanto, a continuación, mostramos los resultados al calcular el tiempo de amortización sin considerar el motor de 400 kW:

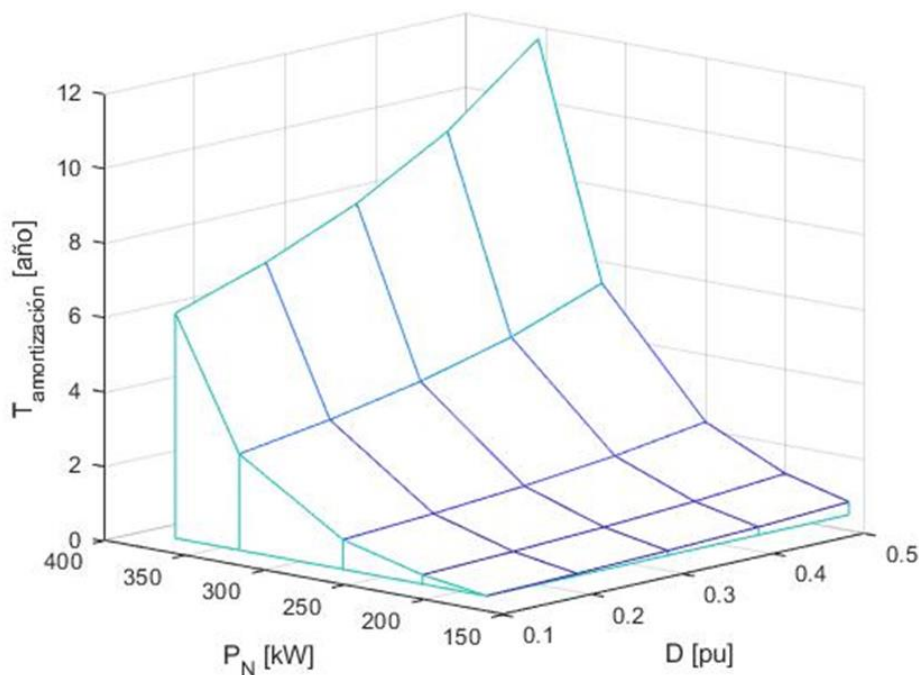


Figura 38 Tiempo de amortización sin el motor de 400 kW

Su correspondiente gráfica de contorno es la siguiente:

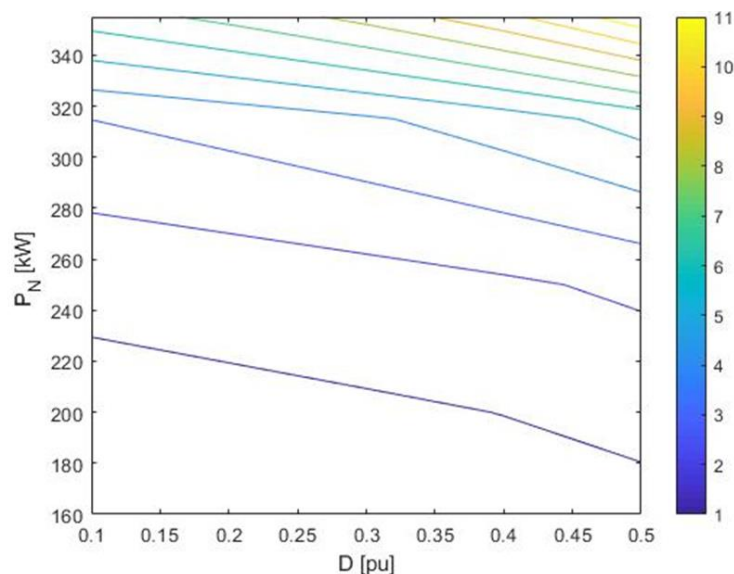


Figura 39 Gráfica de contorno del tiempo de amortización sin el motor de 400 kW

Cabe destacar que, en la gráfica de contorno anterior, la barra de colores indica el valor de cada línea en función de su color en años.

Podemos ver que el tiempo de amortización crece rápidamente al ir incrementando la potencia nominal del motor que se incorpora, sobre todo si se trata para valores de D grandes.

Este crecimiento tan rápido se debe a que contra mayor sea el motor y mayor sea el ciclo de trabajo, menos ahorro económico se consigue. Además, incrementar la potencia nominal del motor que se incorpora al eje mecánico también significa que el coste del motor va ascendiendo, tal y como se muestra en la *Tabla 4*. Por lo tanto, a mayor potencia nominal del motor, se consigue ahorrar menos energía y por ende menos dinero y además la inversión que se requiere cada vez es mayor. Por ello el tiempo de amortización se dispara.

Si comparamos resultados apreciamos que, si instalásemos un motor de 160 kW para mover una carga de 150 kW, la inversión se amortizaría en menos de un año incluso en el peor caso. Para motores de 200 kW y 250 kW seguimos obteniendo periodos de amortización bajos, de aproximadamente 1.5 años y 2 años para el peor caso, respectivamente.

En cambio, para los motores de 315 kW y 355 kW, vemos que se dispara en comparación con los anteriores, lo cual se debe al incremento del precio del motor y que cada vez se consigue ahorrar menos. En estos dos últimos casos se puede llegar a tardar, para el peor caso, aproximadamente 5,5 años y 11,5 años

En cuanto a la gráfica tridimensional y de contorno con el motor de 400 kW también estudiado, las presentamos a continuación.

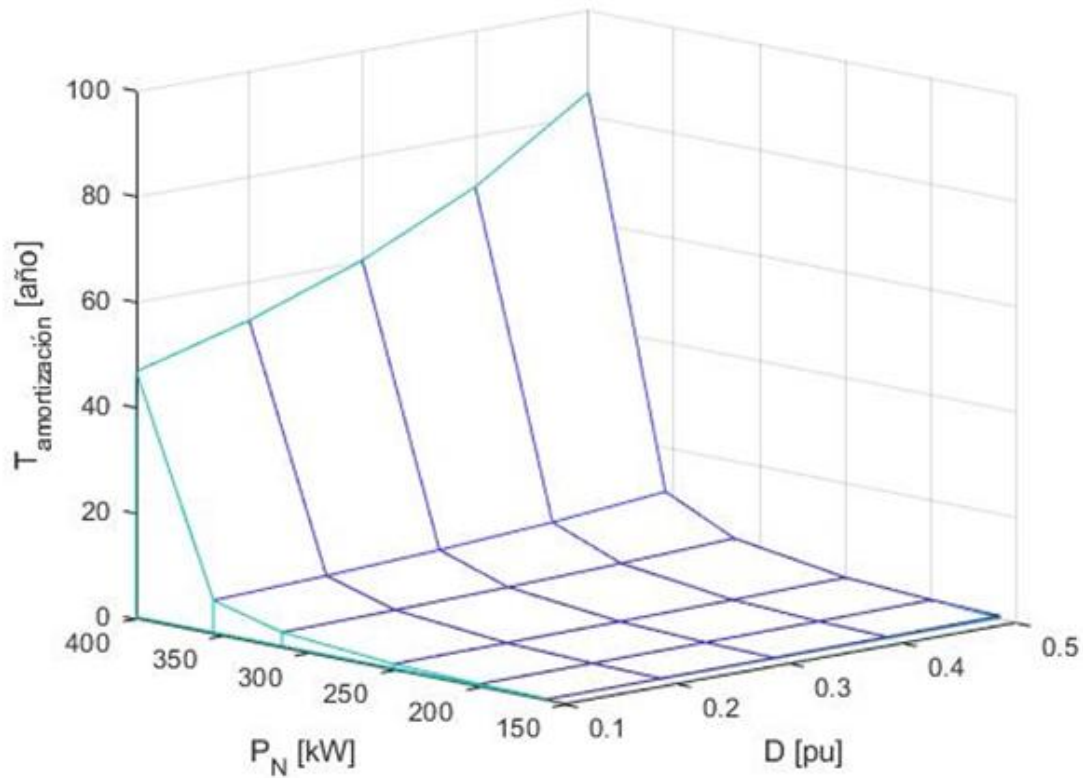


Figura 40 Tiempo de amortización con el motor de 400 kW

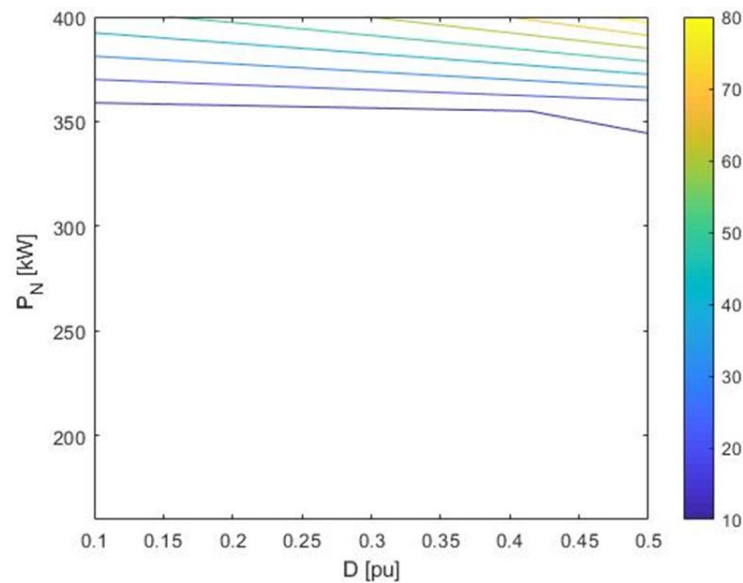


Figura 41 Tiempo de amortización con el motor de 400 kW en 2D

Cabe destacar que en este caso los valores indicados por la barra de colores están en años:

Tal y como indicamos al inicio del presente subapartado al comparar el tiempo que se tardaría en amortizar el motor de 400 kW en la misma gráfica del resto de motores, el resto de los resultados se aplanan por la gran diferencia cuantitativa.

Podemos ver que el tiempo de amortización para el motor de 400 kW para una carga de 375 kW alcanza valores muy elevados, pudiendo llegar a ascender hasta aproximadamente los

84 años en el peor de los casos, para $D=0.5$ y a aproximadamente 45 años para el mejor de los casos, para $D=0.1$.

Este incremento tan significativo del tiempo de amortización se debe a que para cargas de 375 kW el motor de referencia presenta una eficiencia muy elevada y esto comporta, que el ahorro económico al usar la combinación de motores sea mínimo.

Además, el motor de 400 kW tiene un precio de aproximadamente el 50 % del precio de nuestro motor de referencia, por lo que la inversión necesaria se eleva mucho.

En definitiva, se consigue ahorrar poca energía, y por ende poco dinero, y la inversión inicial es muy elevada. La conjunción de estos hechos provoca que se dispare el valor del tiempo de amortización.

2.8.8. Simulación de los Transitorios

En el presente apartado comentaremos cual ha sido el procedimiento que se ha seguido para realizar la simulación de los transitorios en el presente TFG, así como los propios resultados y los analizaremos.

2.8.8.1. Caracterización de los Motores

Para la caracterización de los motores aplicamos la técnica de Pedra la cual es muy útil puesto que permite determinar los parámetros de los motores a partir de únicamente los datos proporcionados por el propio fabricante y a partir de ellos simular en el programa PSIM.

De acuerdo con esta técnica, se aplicarán las siguientes expresiones matemáticas:

$$R_r = \frac{V^2 \cdot S_N}{P_N} \quad (22)$$

$$R_s = K_R \cdot R_r \quad (23)$$

$$X_m = \frac{V^2}{P_N \cdot \tan(\arccos(\cos\theta))} \quad (24)$$

$$X_{sd} = 0,05 \cdot X_m \quad (25)$$

$$X_{rd} = K_X \cdot X_{sd} \quad (26)$$

Siendo:

R_r Resistencia del rotor [Ω]

R_s Resistencia del estator [Ω]

X_m Reactancia de magnetización [Ω]

X_{sd} Reactancia del estator [Ω]

X_{rd} Reactancia del rotor [Ω]

V Tensión de línea [V]

P_n Potencia nominal del motor [W]

K_R y K_X son dos parámetros adimensionales. Sus valores dependen del tipo constructivo de los motores que se considere. Los valores que pueden tomar ambos parámetros en función del modelo constructivo son los siguientes:

| | A | B | C | D |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| K_R | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 |
| K_X | 0 | 0,5 | 1 | 0,5 |

En nuestro caso, supondremos un tipo A, es decir, para nosotros $K_R=1,5$ y $K_X=0$.

Los resultados matemáticos se muestran en el Anexo 3.3.1 *Cálculo de los Parámetros*

La técnica de Pedra presenta dos problemas en nuestro caso. El primero de ellos se trata de la conexión de los motores. La técnica de Pedra está pensada para calcular los parámetros de motores cuya conexión nominal es en estrella. Sin embargo, de acuerdo con el catálogo del fabricante, la conexión nominal de nuestros motores es en triángulo.

Por ese motivo, para realizar la simulación, se decide ajustar el valor eficaz de la tensión de línea de alimentación a un valor $\sqrt{3}$ veces superior, es decir, en lugar de ajustarla a 400V, se ajusta a 690V.

El segundo de los problemas que encontramos es que el par de arranque de todos los motores es inferior al valor de la carga constante que tienen que mover y, por lo tanto, ningún motor consigue arrancar. Este problema se debe a que la técnica de Pedra proporciona una curva de par motor aproximada.

Sin embargo, dicha curva presenta un error muy grande en cuanto al valor del par de arranque. Para solucionar este problema se decide arrancar el motor en vacío y cuando llegue al régimen estacionario, conectar la carga correspondiente que debe de mover el motor y posteriormente llevar a cabo las conmutaciones, tal y como se comenta en el apartado 2.6.2 *Simulación*.

2.8.8.2. Resultados de las Simulaciones

En el presente apartado nos dedicaremos a indicar cuales han sido los resultados que se han obtenido al realizar las simulaciones y así como analizar estos resultados.

En cuanto a los resultados de las simulaciones, mostraremos los resultados de los transitorios en cuanto a la corriente eléctrica, par motor y velocidad, respectando el orden que acabamos de indicar.

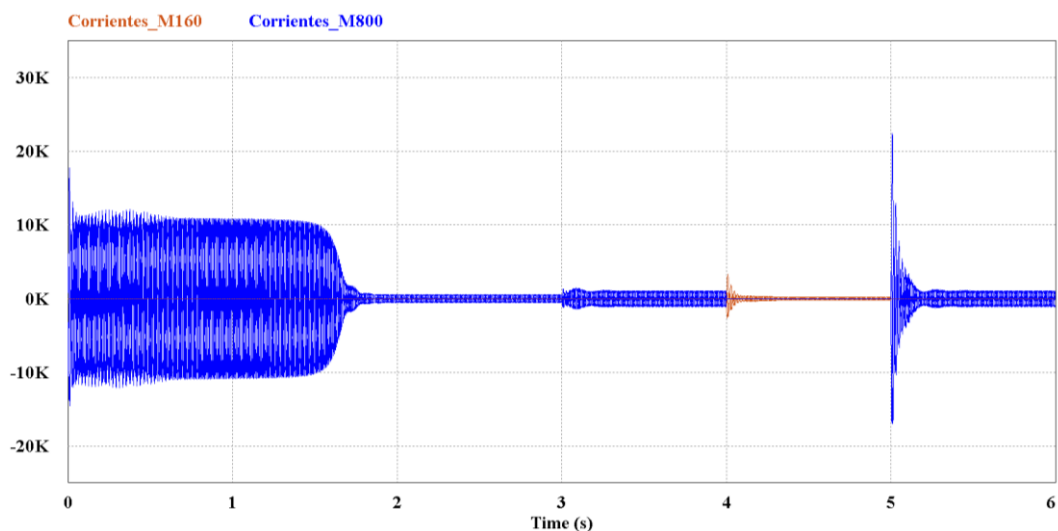
Además, primero mostraremos los resultados si el primer motor en arrancar es el motor de referencia y posteriormente mostraremos los resultados si el primer motor en arrancar es el de menor potencia nominal.

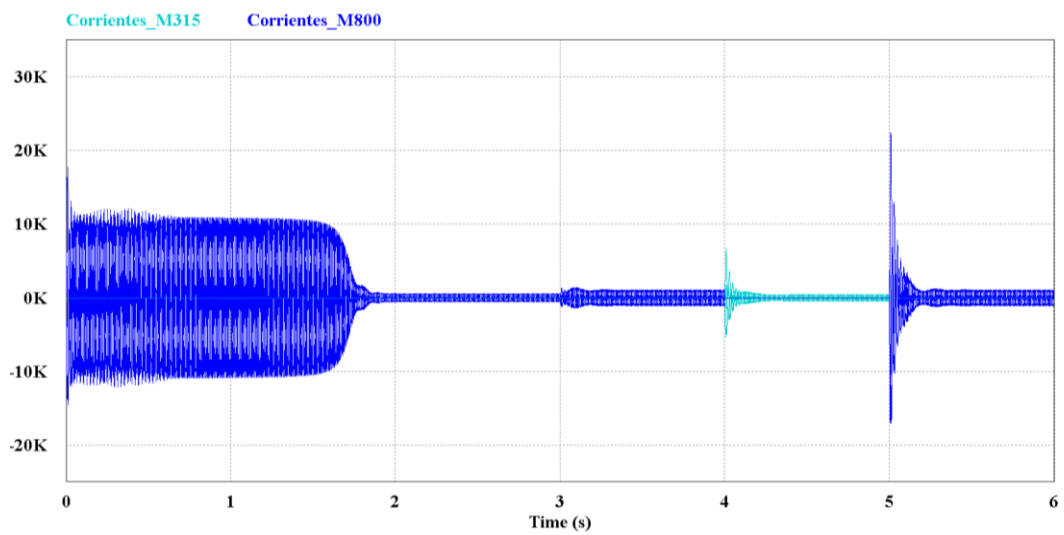
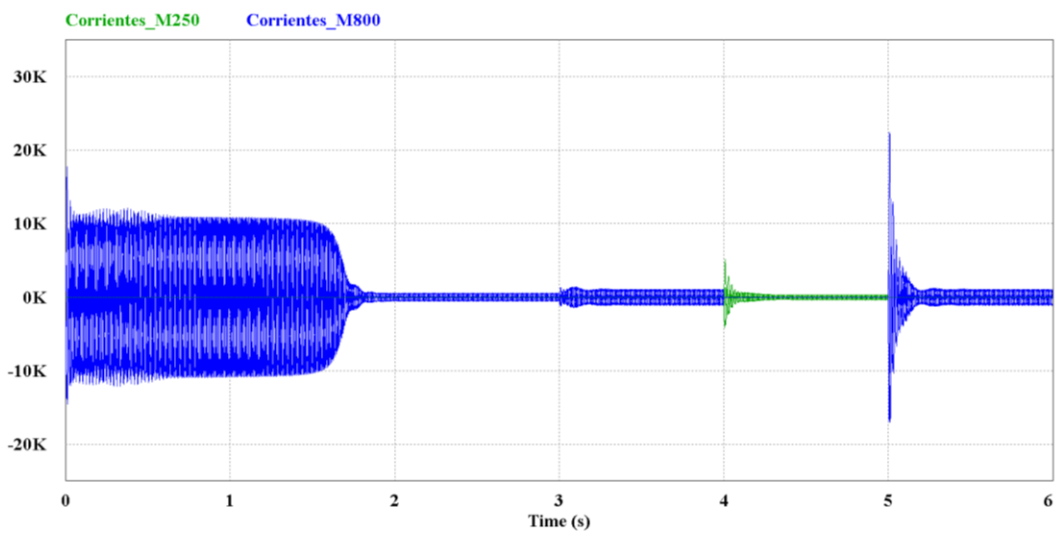
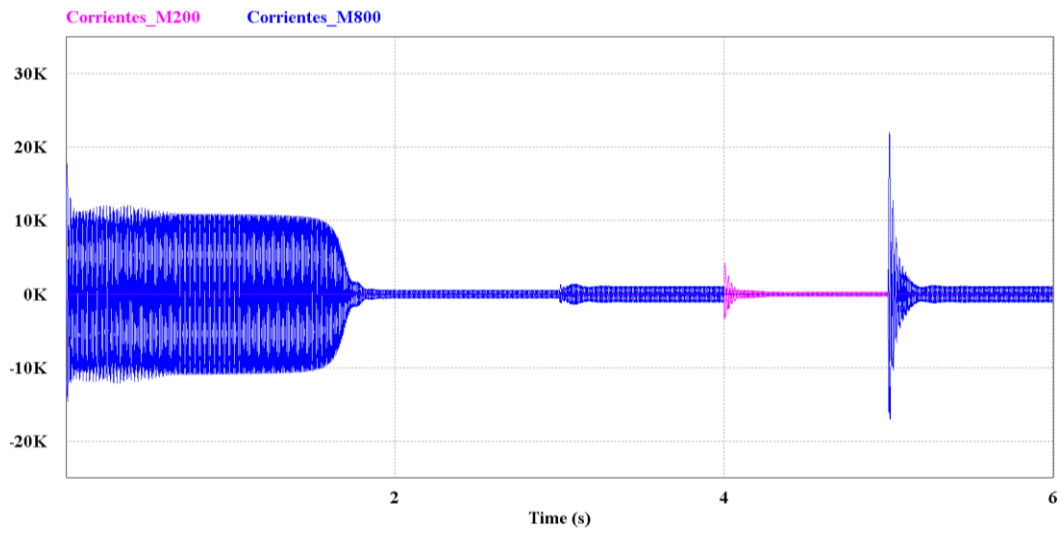
Mostraremos la simulación desde el arranque del motor, aunque no sea objeto de estudio del presente TFG analizar dicho arranque. Se decide mostrarlo para poder comparar posteriormente el transitorio que presenta el motor en cuestión con su arranque en vacío con el transitorio que se origina al cambiar de motor.

Esta decisión se debe al hecho de que, si únicamente mostramos los transitorios, lo cual insistimos que es el objeto de estudio, el lector podría llegar a pensar que los picos de corriente generados en la conmutación son demasiados elevados y que la conmutación afecta negativamente al motor.

Se debe de resaltar que cada motor se representa con un color distinto para así facilitarle al lector la tarea de diferencia los distintos motores y tener una presentación más visual. La asignación de color a cada motor será la misma que se presentó anteriormente en el apartado 2.8.2 *Eficiencia de los Motores*.

Por lo tanto, a continuación, mostramos los transitorios de la corriente eléctrica trifásica al realizar la conmutación de motores si el primer motor en arrancar es el motor de referencia.





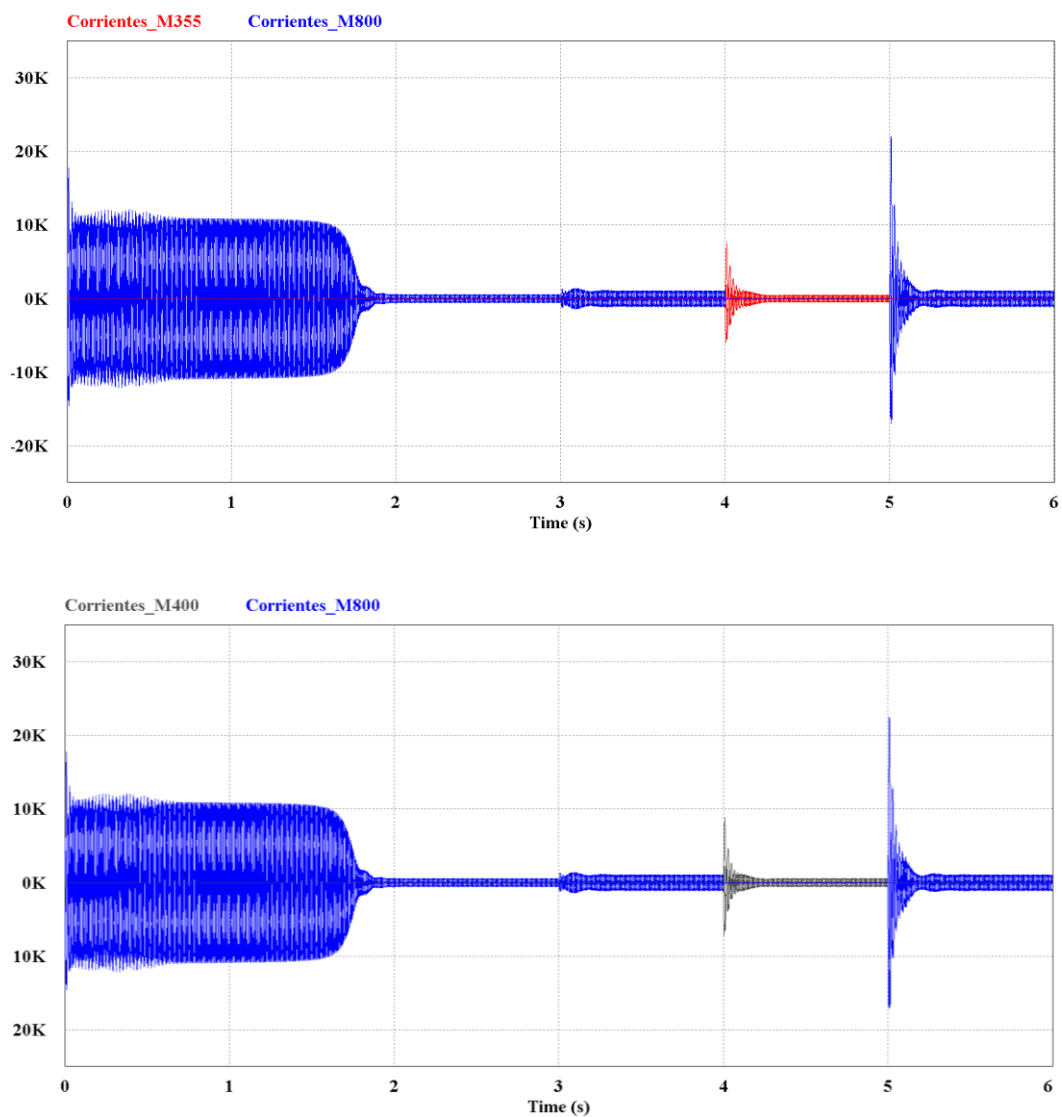
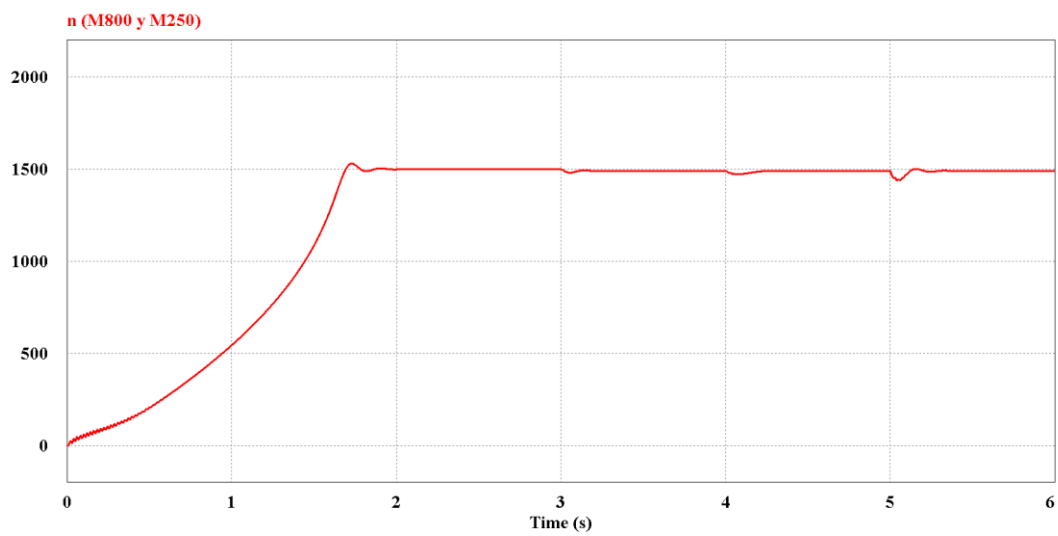
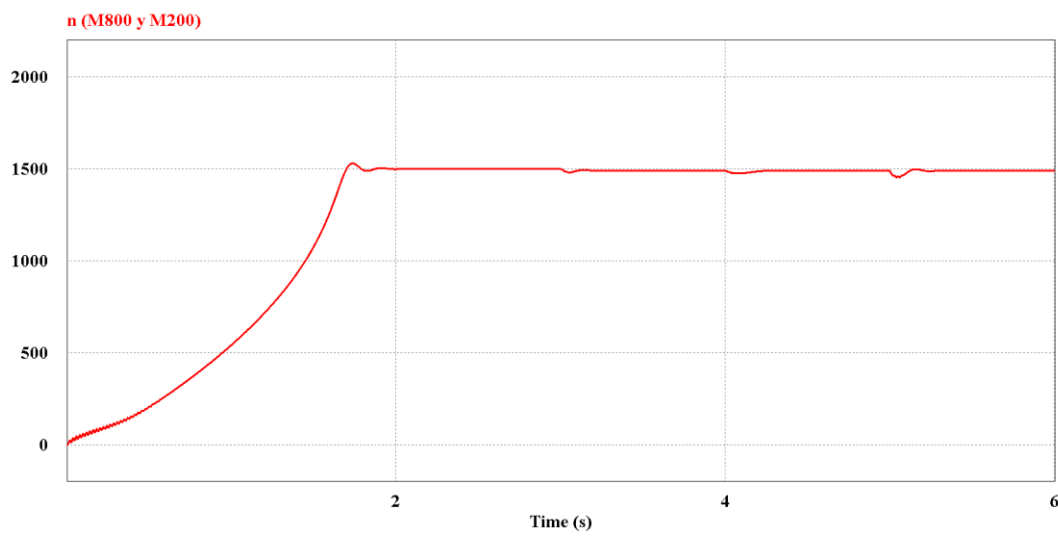
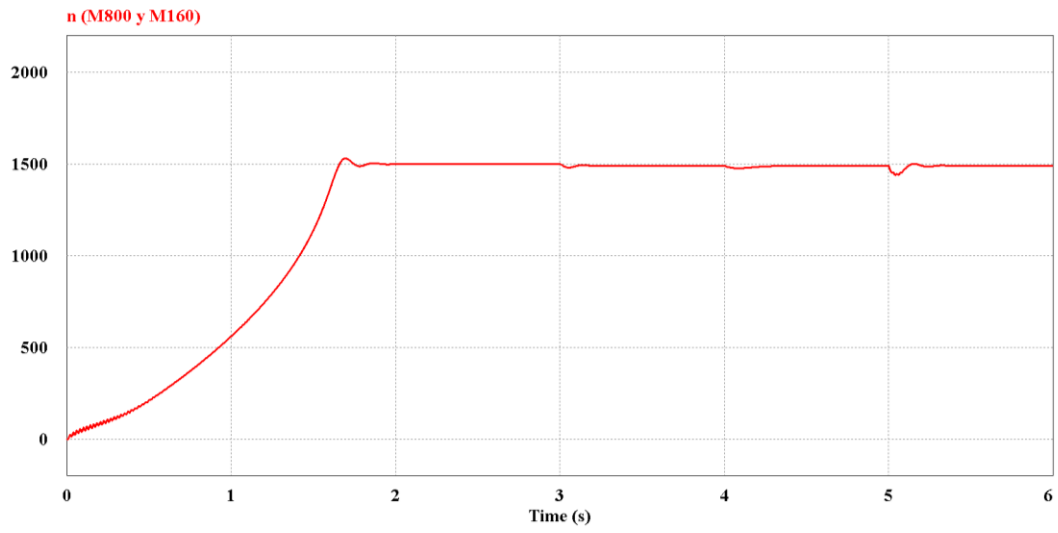


Figura 42 Transitorios de las corrientes eléctricas con arranque en vacío del motor de referencia

Una vez mostradas las simulaciones de la corriente eléctrica trifásica pasamos a mostrar los transitorios que se originan en la velocidad mecánica n , los cuales, tal y como podrá apreciar el lector, las perturbaciones son mínimas.



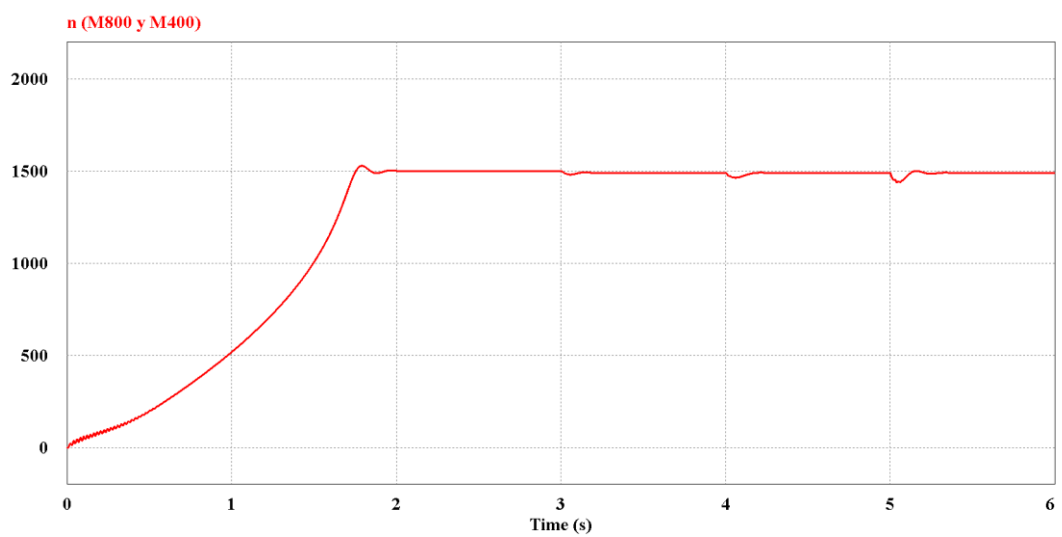
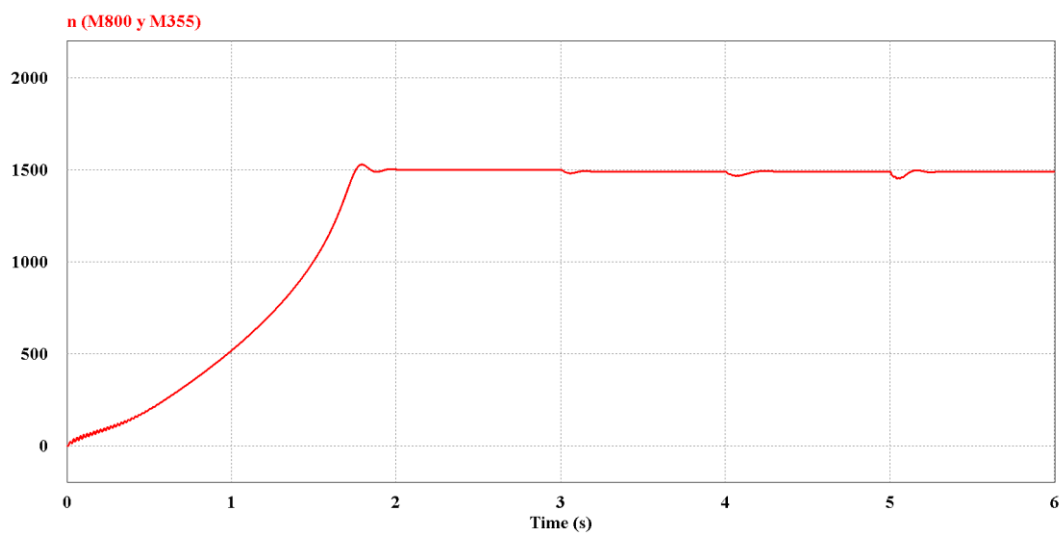
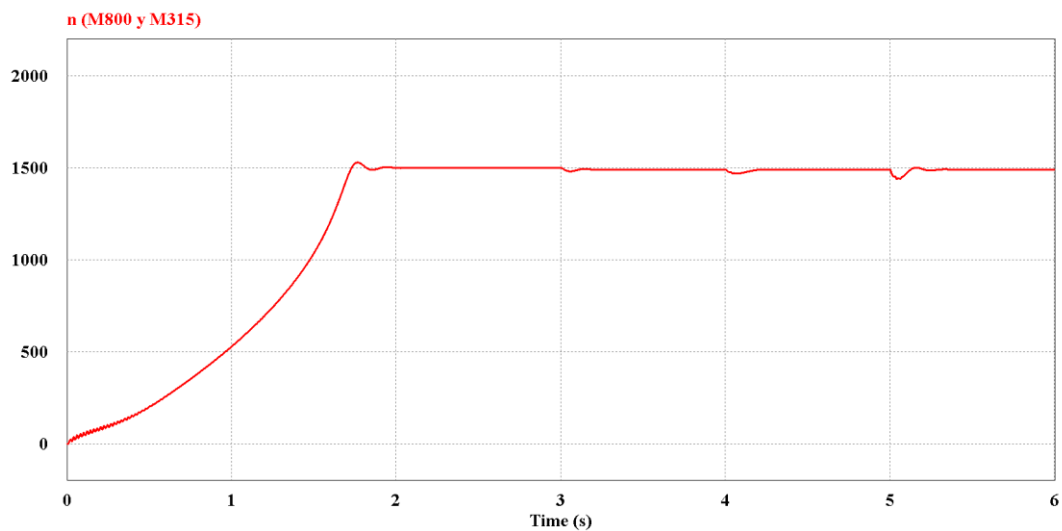
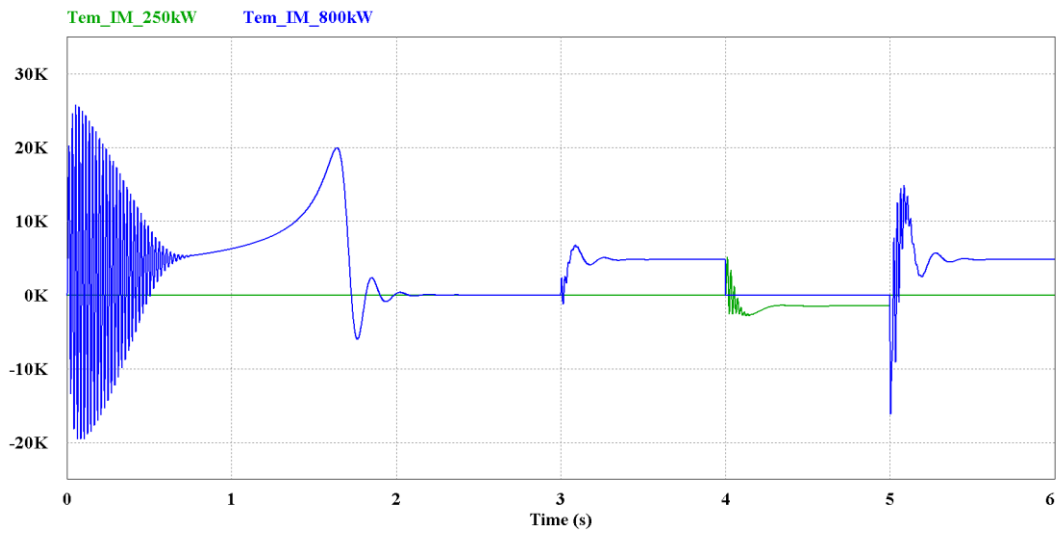
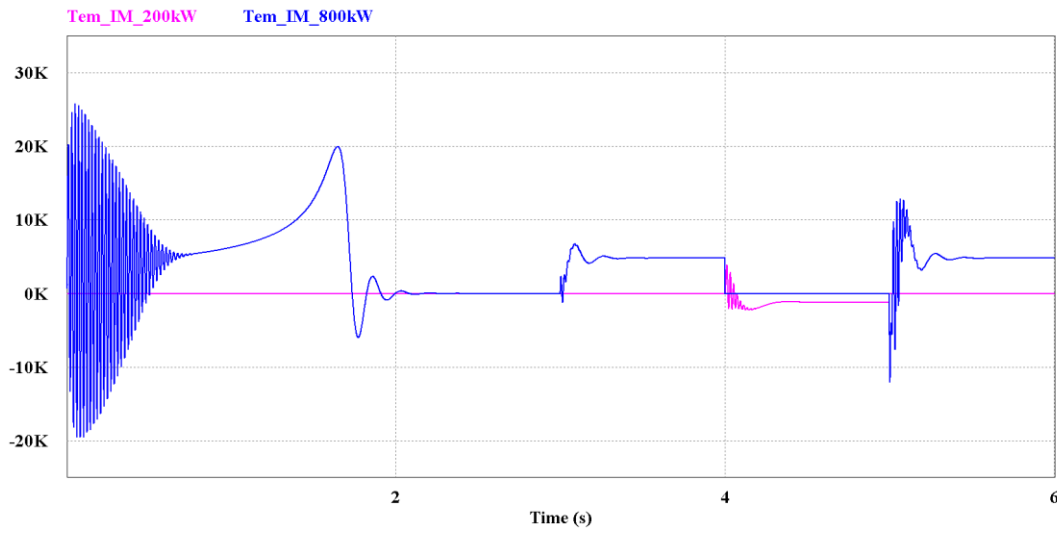
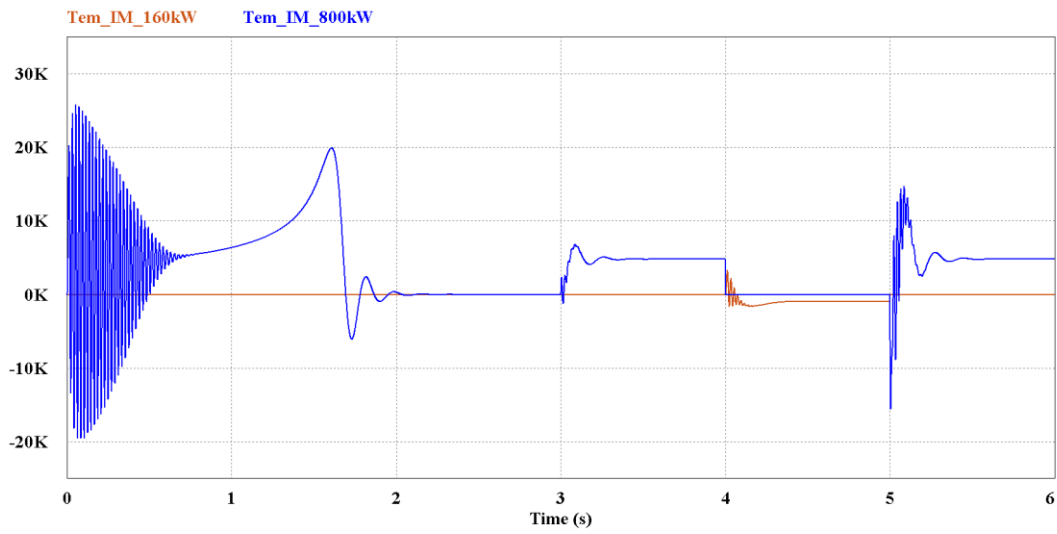


Figura 43 Transitorios de la velocidad mecánica del sistema con arranque en vacío del motor de referencia

A continuación, mostramos los transitorios del par motor:



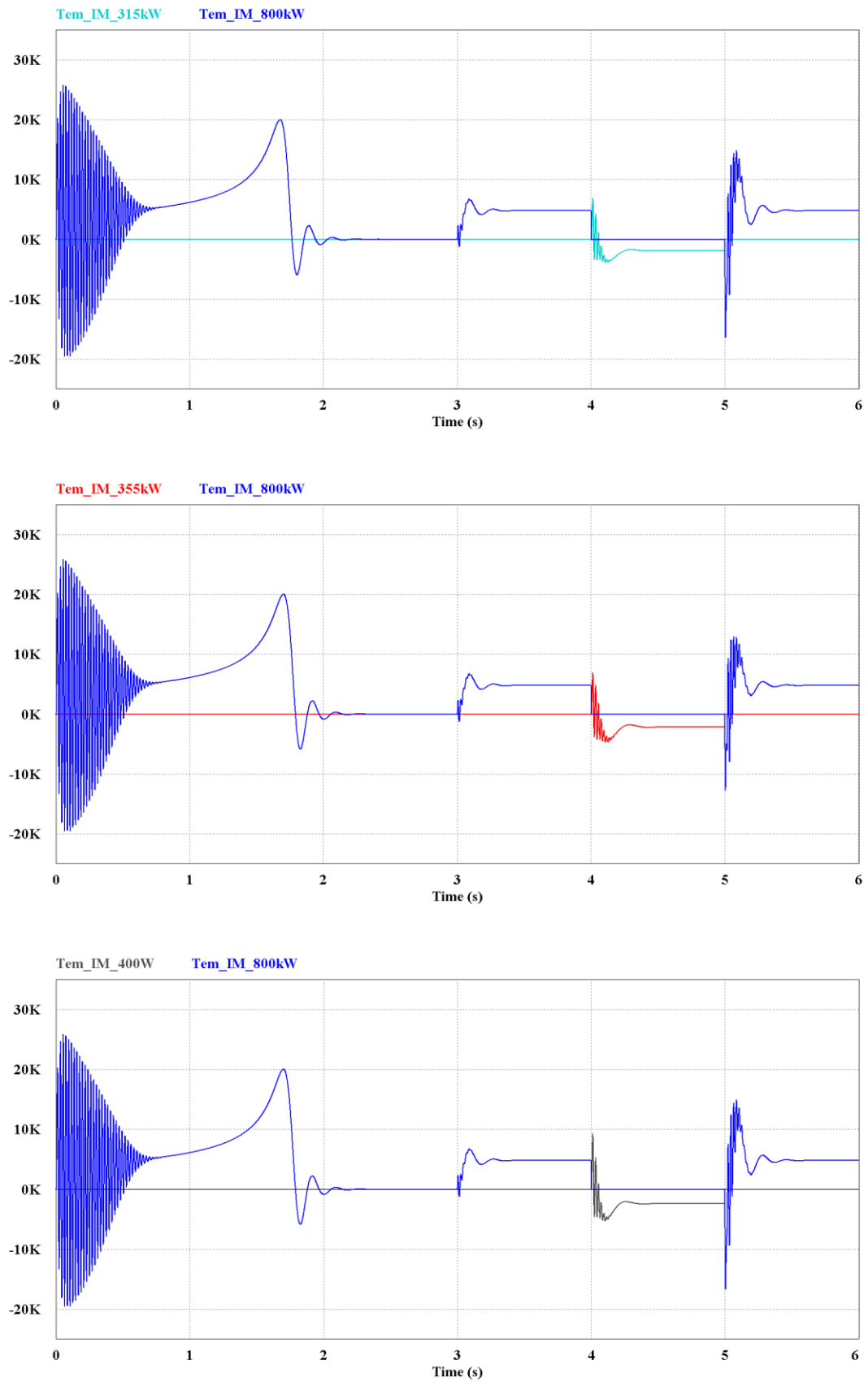
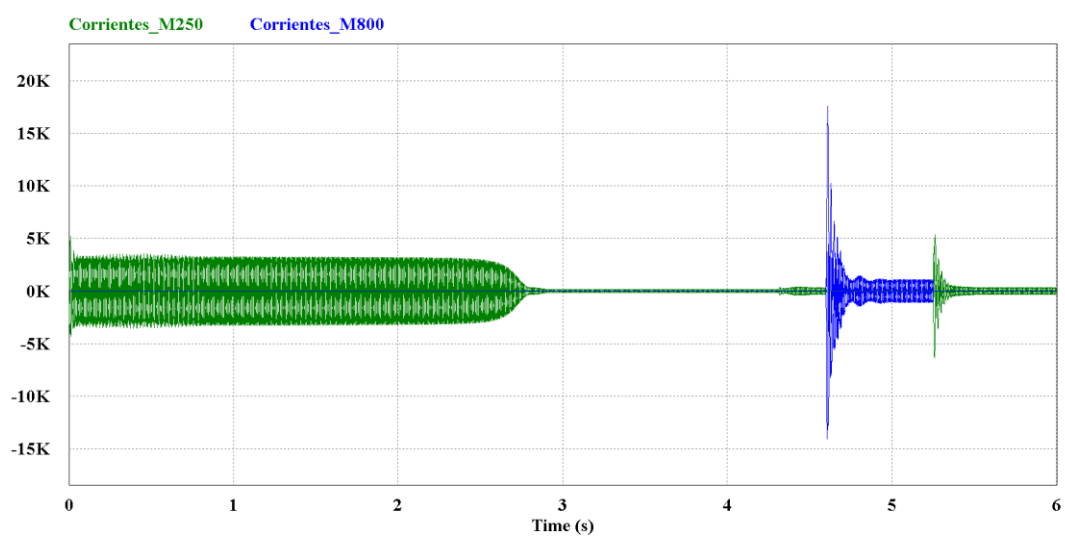
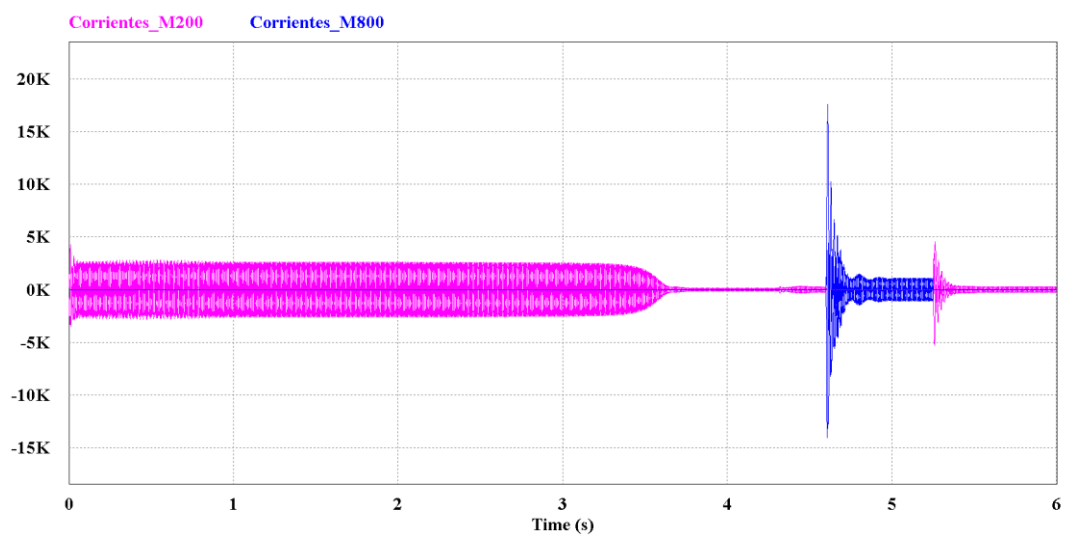
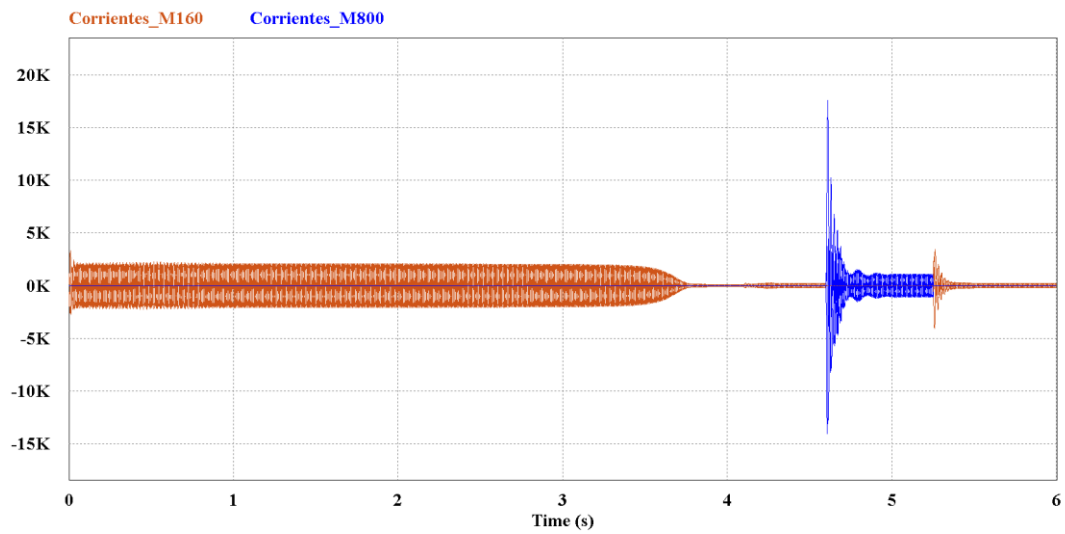


Figura 44 Transitorios del par motor con arranque en vacío del motor de referencia

A continuación, volveremos a presentar los mismos resultados, pero considerando que el primer motor en arrancar es el motor de menor potencia nominal. Para este caso, los resultados obtenidos en lo referente a la corriente son los siguientes:



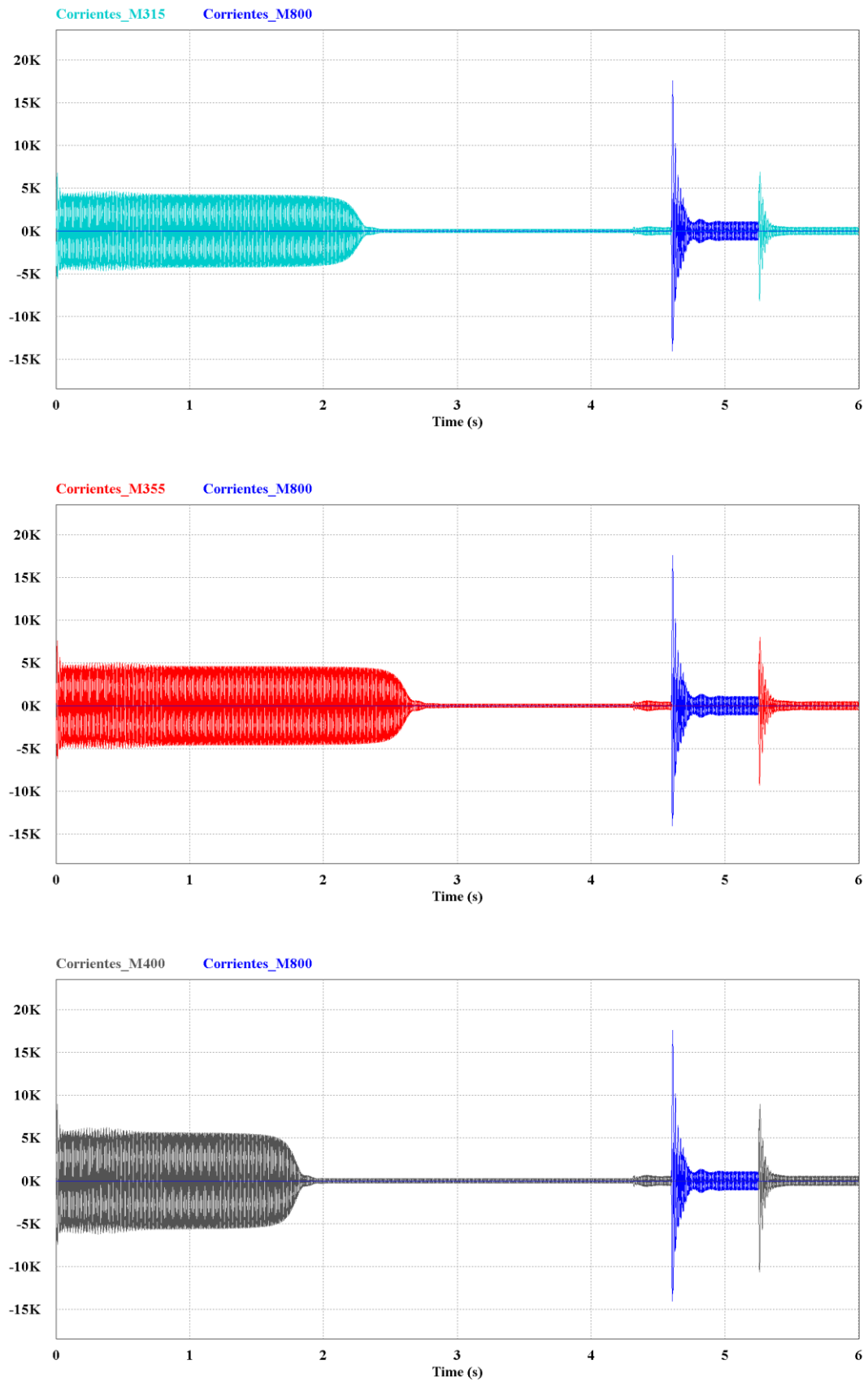
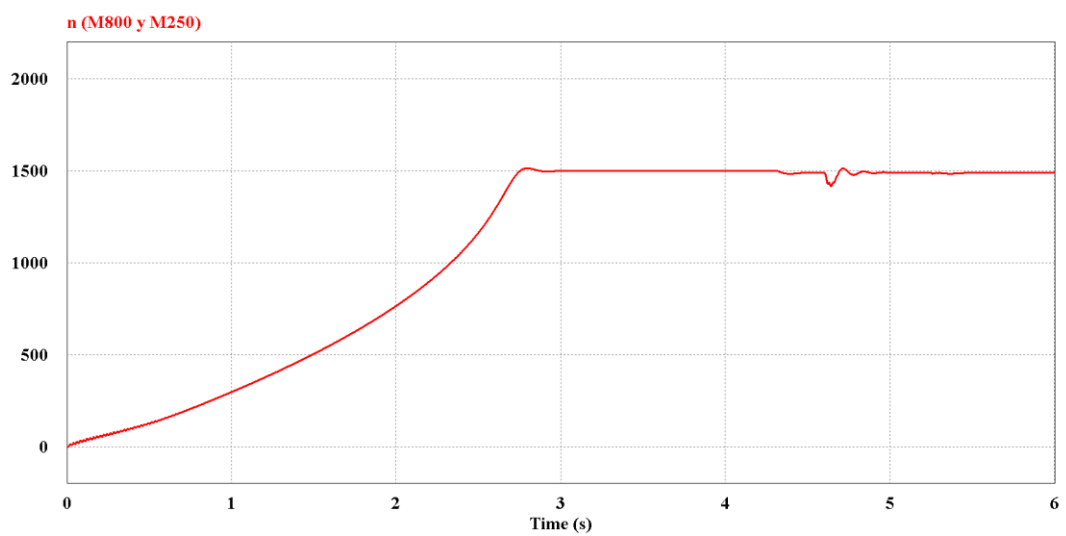
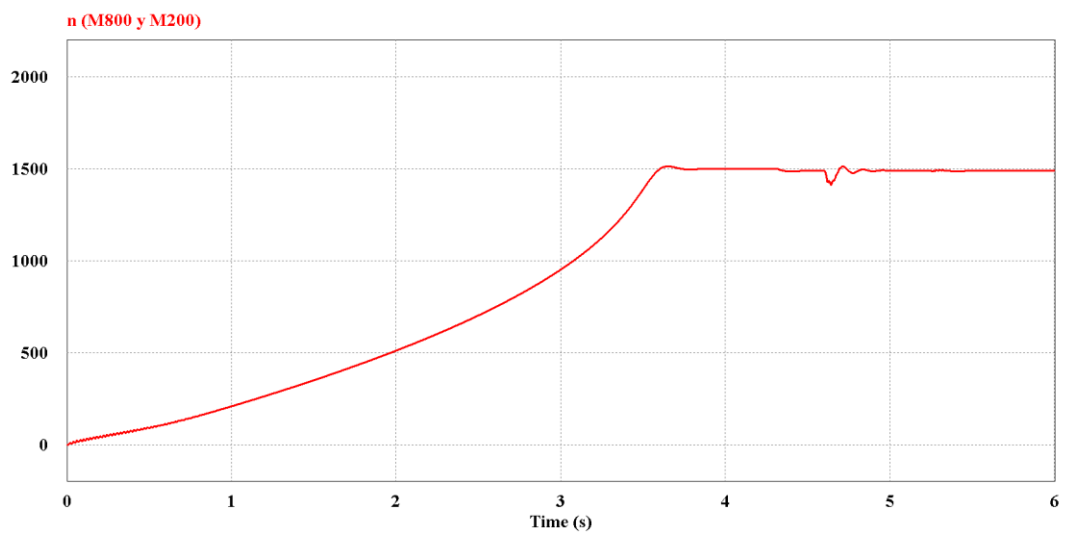
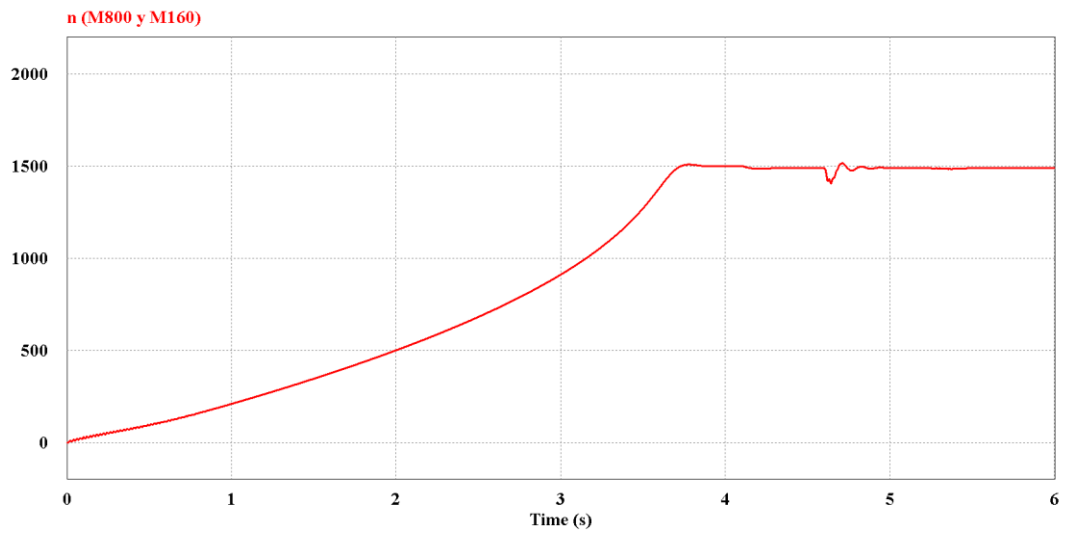


Figura 45 Transitorios de las corrientes eléctricas con arranque en vacío del motor de menor potencia nominal

En cuanto a la evolución de la velocidad para cada uno de los casos, obtenemos los siguientes resultados en la simulación:



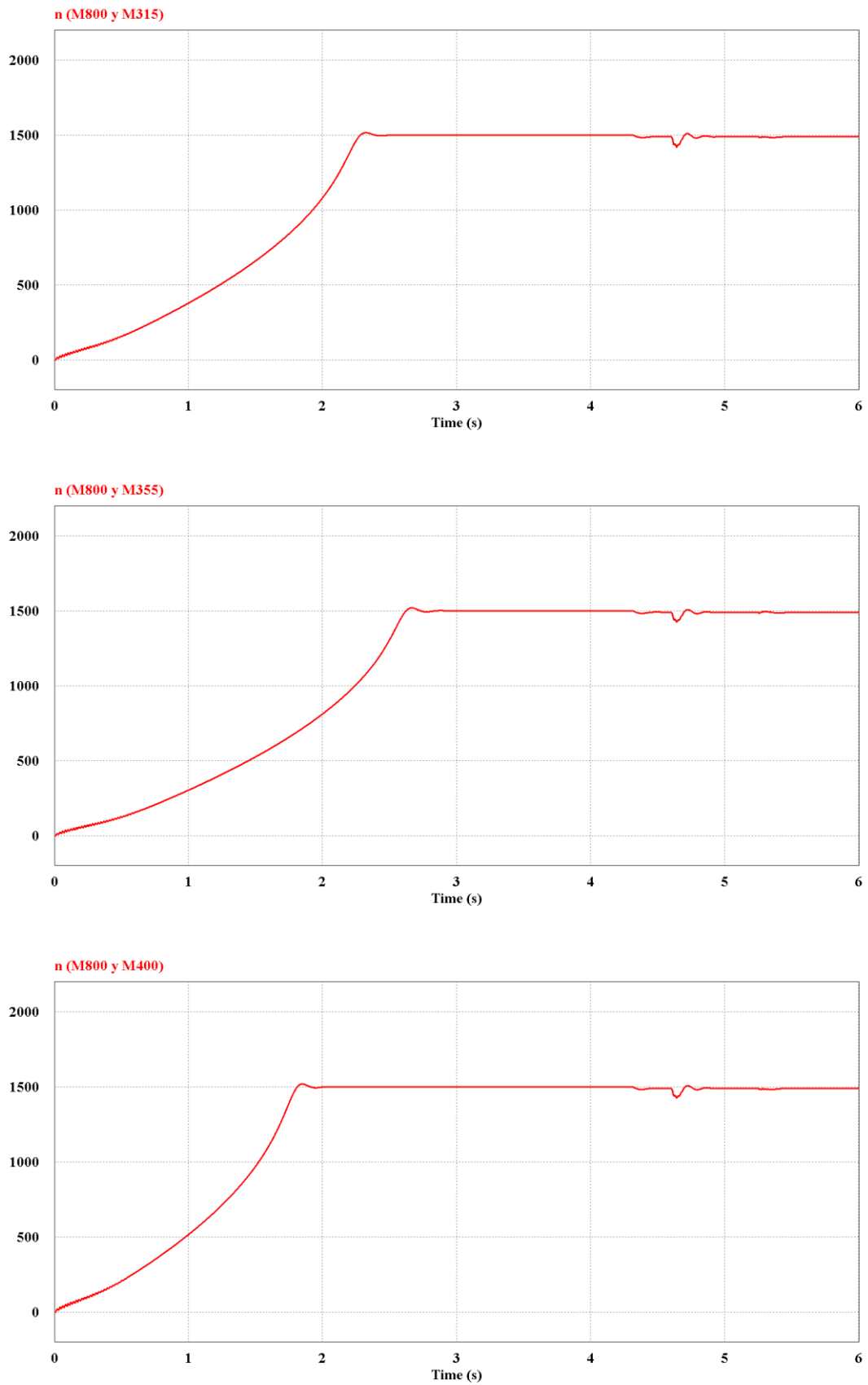
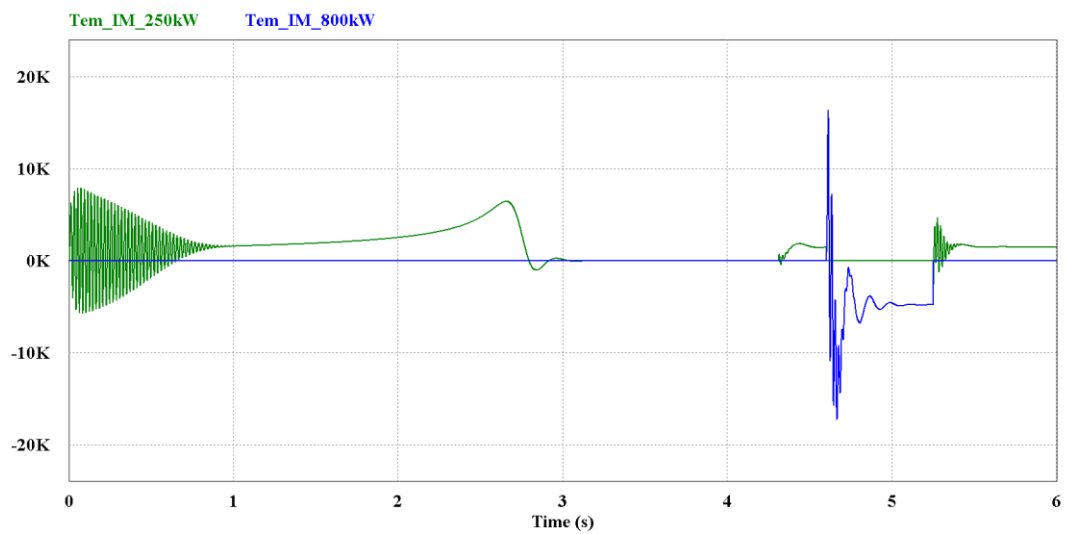
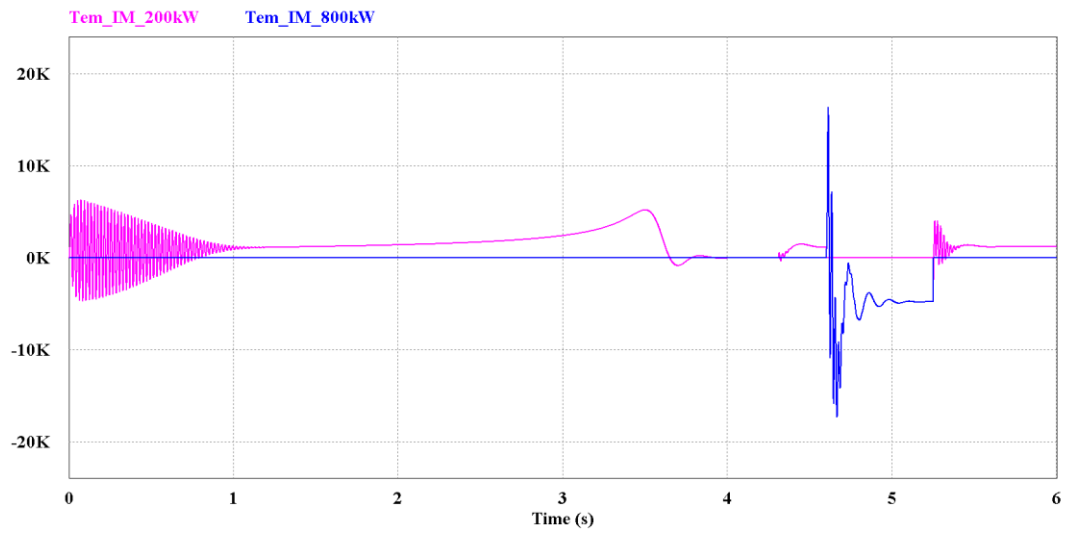
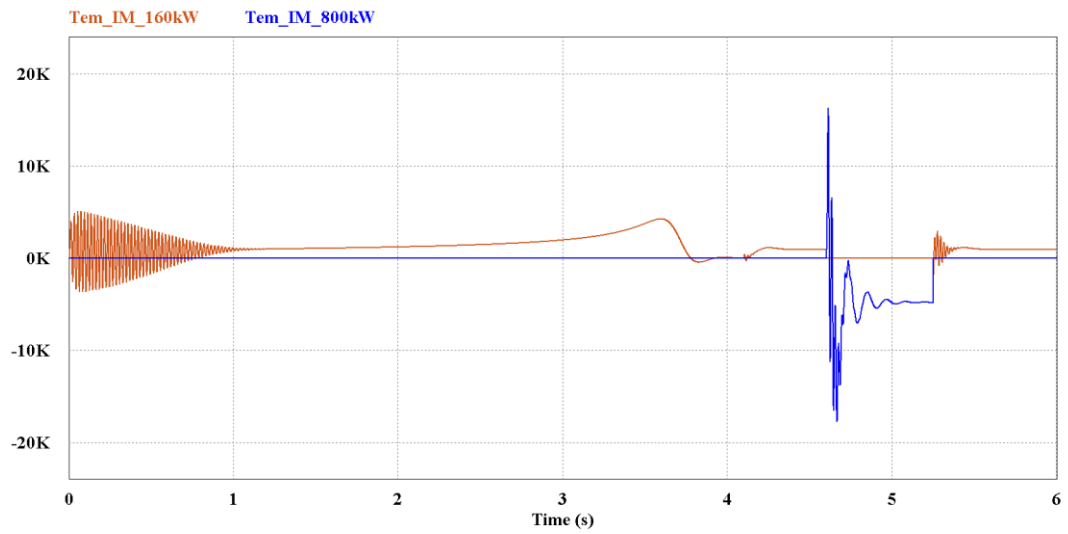


Figura 46 Transitorios de la velocidad mecánica del sistema con arranque en vacío del motor de menor potencia nominal

En cuanto a la evolución del par motor para cada uno de los casos, obtenemos los siguientes resultados en la simulación:



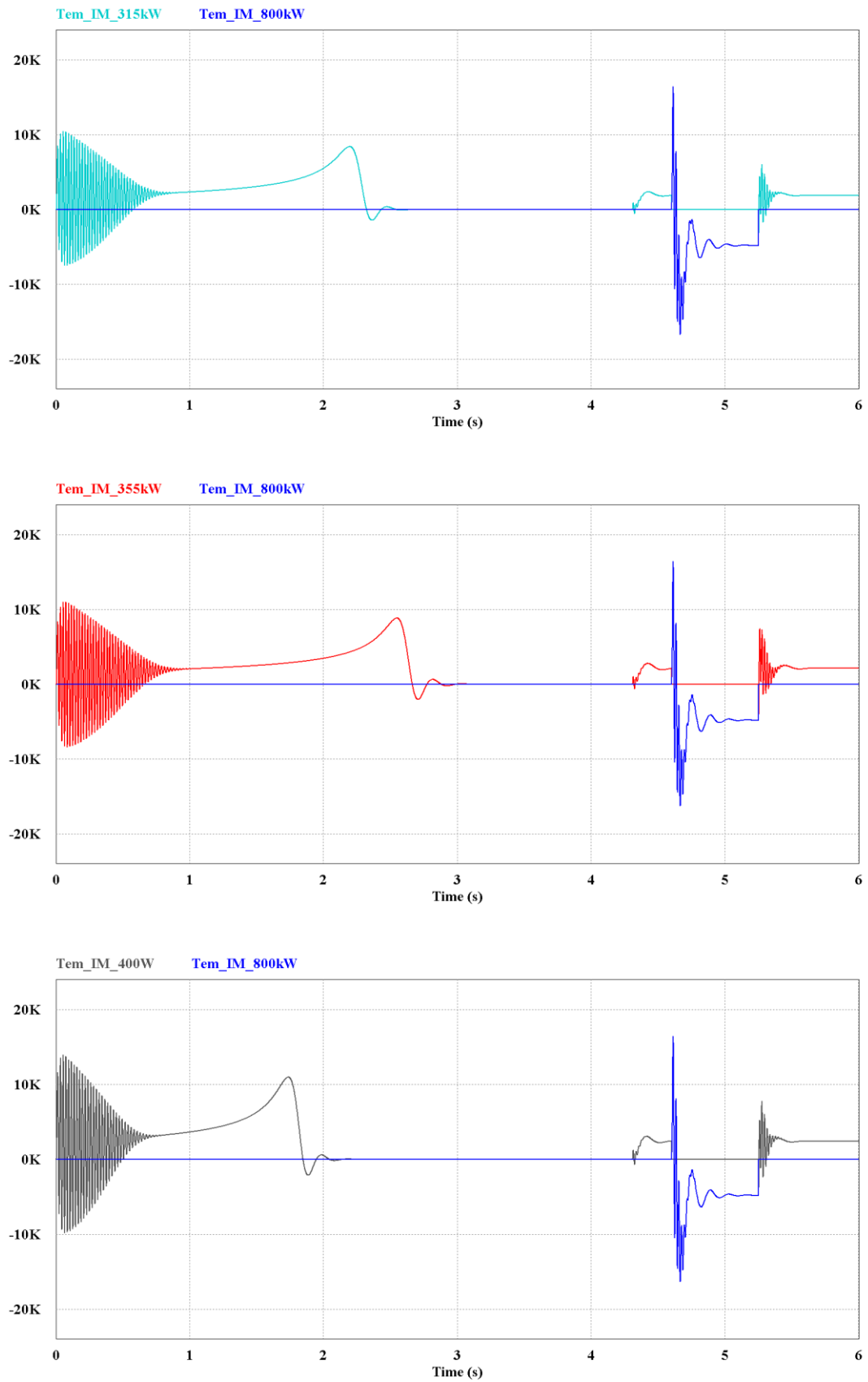


Figura 47 Transitorios del par motor con arranque en vacío del motor de menor potencia nominal

A continuación, realizaremos una serie de comentarios sobre los resultados que acabamos de mostrar.

En lo referente a las corrientes, lo primero que apreciamos es que contra mayor sea el motor que conmuta y por ende la carga que se conecta, mayores son los picos de corrientes que se producen en dichas conmutaciones. Vemos que, en todos los casos, estos picos de corriente son ligeramente superiores a los picos originados en el arranque en vacío. Sin embargo, el transitorio al realizar las conmutaciones dura mucho menos tiempo respecto al del arranque en vacío. Este hecho nos lleva a la conclusión de que el motor se sobrecalentará menos en las conmutaciones respecto al arranque en vacío, puesto que las sobrecorrientes circularan durante un tiempo mucho menor. Como ejemplo práctico, en el primer caso simulado, cuando se vuelve a conectar el motor de 800 kW, el transitorio dura aproximadamente 0,48 segundos y presenta un pico máximo de 22,44 kA, de acuerdo con lo mostrado en el Anexo 3.3.3 *Resultados Numéricos de las Simulaciones*. En esa misma simulación, vemos que el pico de arranque en vacío es de aproximadamente 18 kA y tarda casi 2 segundos.

Los transitorios originados al hacer la conmutación duran mucho menos tiempo que en el arranque en vacío debido a que los dos motores están unidos mecánicamente a un mismo eje. Esto provoca que cuando se alimenta a un motor y este gira, el rotor del otro motor gira a la misma velocidad y con el mismo sentido de giro que el primer motor, aunque no estemos alimentando a este. Al realizar la conmutación, el motor que se conecta ya cuenta con un cierto valor de deslizamiento s distinto a 1, o lo que es lo mismo, ya gira a una cierta velocidad. Por lo tanto, al girar el segundo motor una cierta velocidad en el momento de conectarlo, este necesita consumir menos corriente para llegar al régimen estacionario en comparación con la que necesita si al conectarlo se encuentra con velocidad nula.

En cuanto a la velocidad, vemos que esta presenta, como es de esperar, pequeños transitorios en los puntos de conmutación. Sin embargo, como todos los motores giran a la misma velocidad en régimen permanente y debido a que al realizar las conmutaciones, el motor que se conecta ya gira a una cierta velocidad, estos transitorios no presentan picos muy elevados respecto a los valores de régimen estacionario. Cabe destacar que estos transitorios en la velocidad son menos significativos cuando se conmuta al motor de menor potencia sobretodo si este ha sido el primero en arrancar.

Por último, en lo referente a los transitorios del par motor, al igual que pasaba con las corrientes, vemos que contra mayor sea el motor al que se conmuta, mayores son los valores pico que se originan puesto que la carga que tienen que mover cada vez es mayor y requieren de un par mayor, lo que provoca mayores pico de par antes de estabilizarse. A diferencia de lo que vimos en el caso de las corrientes, si comparamos el transitorio del par motor en el arranque con el transitorio después de realizar la conmutación, los valores picos de en el transitorio originado por la conmutación son inferiores respecto a los originados en el arranque en vacío. En definitiva, en el caso del par, los transitorios al realizar la conmutación presentan picos inferiores a los originados por el arranque directo en vacío y, además, dura mucho menos tiempo.

2.8.8.3. Conclusiones de las Simulaciones

A modo de resumen, se concluye que, al realizar los cambios de motor, dicho cambio es muy suave vacío puesto que:

- 1- El régimen transitorio dura infinitamente menos por lo que el motor se calentará mucho menos por el paso de la corriente, aunque ésta presente un valor de pico superior al arranque directo en vacío.
- 2- La velocidad apenas se ve afectada por los transitorios.
- 3- En el régimen transitorio del par motor, los valores pico son inferiores y este dura mucho menos tiempo respecto al de un arranque directo en vacío, lo cual proporciona una buena estabilidad al sistema.

2.8.9. Resultado Final de la Automatización

El presente apartado irá dedicado a indicar cual es la variable que finalmente se escoge para que sea nuestra variable de referencia cuyo valor nos indicará cuando se debe de conmutar de un motor a otro atendiendo al análisis que realizamos en el apartado 2.7.3 *Análisis de Posibles Variables de Referencia*. Posteriormente, mostraremos el circuito lógico que se ha elaborado por medio del programa Zelio Soft 2 para llevar a cabo la conmutación de los motores, así como explicar el funcionamiento de este.

2.8.9.1. Elección de la Variable de Referencia

Como ya comentamos anteriormente en el apartado 2.7.3 *Análisis de Posibles Variables de Referencia*, las únicas variables candidatas para ser nuestra variable de referencia son la potencia activa eléctrica absorbida y el par motor desarrollado. Las variables de velocidad mecánica y corriente eléctrica quedan descartadas por los argumentos aportado en ese mismo apartado.

Después de realizar las simulaciones se llega a la conclusión de que cualquiera de las dos es perfectamente apta para ser la variable de referencia. Por lo tanto, a la hora de elegir que sensor escogemos, si uno de potencia activa o uno de par, nos centraremos en la complejidad de programar el circuito de automatización para cada caso.

En el caso de la potencia activa, destacamos que, para una misma carga, el motor de referencia presenta una eficiencia menor que en el caso del motor menor. Esto lo mostramos con las gráficas del apartado 2.8.2 *Eficiencia de los Motores*. Por lo tanto, a la hora de programar en Zelio necesitaríamos dos valores de consigna, uno por cada motor.

Sin embargo, si utilizamos un sensor de par, el valor que este nos presenta depende de exclusivamente de la carga y no del motor y de la eficiencia de este en función de la carga y con únicamente un valor de consigna se podrá elaborar el circuito de automatización, tal y como mostraremos en el apartado 2.8.9.3 *Software de la Automatización*.

Por lo tanto, debido a la mayor sencillez que presenta la programación, se decide que nuestra variable de referencia sea el par motor desarrollado.

2.8.9.2. Valor de la Variable de Referencia

Una vez que sabemos cuál será nuestra variable de referencia, debemos calcular cuál es el valor de ésta a partir del cual se procederá a conmutar de un motor a otro. Tal y como se mostrará en el siguiente apartado, en la programación en Zelio se decide utilizar una entrada analógica la cual indicará la señal en V que nos proporcionaría el sensor del par motor. Se considerará que para una señal de 0V, el sensor detecta 0 N·m y para una señal de 10V detecta 5.200 N·m. Sin embargo, cabe destacar que utilizamos un módulo de 8 bits, lo cual se traduce en 2^8 combinaciones posibles. Por lo tanto, para la combinación en que todos los bits toman valor 0 (combinación n^o0), corresponde a los 0 V y cuando todos los bits toman

valor 1 (combinación n° 255), se corresponde con los 10 V. Todas las combinaciones posibles comprendidas entre estos extremos corresponden a valores entre 0 V y 10 V.

Por lo tanto, teniendo en cuenta estas consideraciones, mostramos la *Tabla 5 Valores de conmutación* donde indicamos los valores de V que provocan las distintas conmutaciones, así como el número de combinación que corresponde a dicho valor en V, el cual será el que debemos de introducir en la programación en Zelio. Dicha tabla es la siguiente:

| Pot. Nom [kW] | Frontera | Señal [V] | N° combinación |
|---------------|----------|-----------|----------------|
| 800 →160 | ≤ | 1,87 | 47 |
| 160 → 800 | ≥ | 2,00 | 51 |
| 800 →200 | ≤ | 2,34 | 60 |
| 200 →800 | ≥ | 2,50 | 63 |
| 800 →250 | ≤ | 2,93 | 75 |
| 250 →800 | ≥ | 3,12 | 80 |
| 800 →315 | ≤ | 3,69 | 94 |
| 315 →800 | ≥ | 3,94 | 100 |
| 800 →355 | ≤ | 4,16 | 106 |
| 355 →800 | ≥ | 4,44 | 113 |
| 800 →400 | ≤ | 4,69 | 120 |
| 400 →800 | ≥ | 5,00 | 127 |

Tabla 5 Valores de conmutación

Destacamos que el valor de la señal en V que provoca la conmutación al motor menor corresponde al par desarrollado cuando la carga conectada es la menor. En cambio, el valor de la señal en V que provoca la conmutación al motor mayor corresponde al de la carga nominal del motor menor, para así garantizar que este nunca se queme.

Los resultados que acabamos de mostrar los calculamos de acuerdo con lo indicado en el Anexo 3.4.1 *Cálculo del Valor de la Variable de Referencia*.

2.8.9.3. Software de la Automatización

A continuación, procederemos a mostrar la programación que se ha llevado a cabo en el programa Zelio Soft 2, el cual es el siguiente:

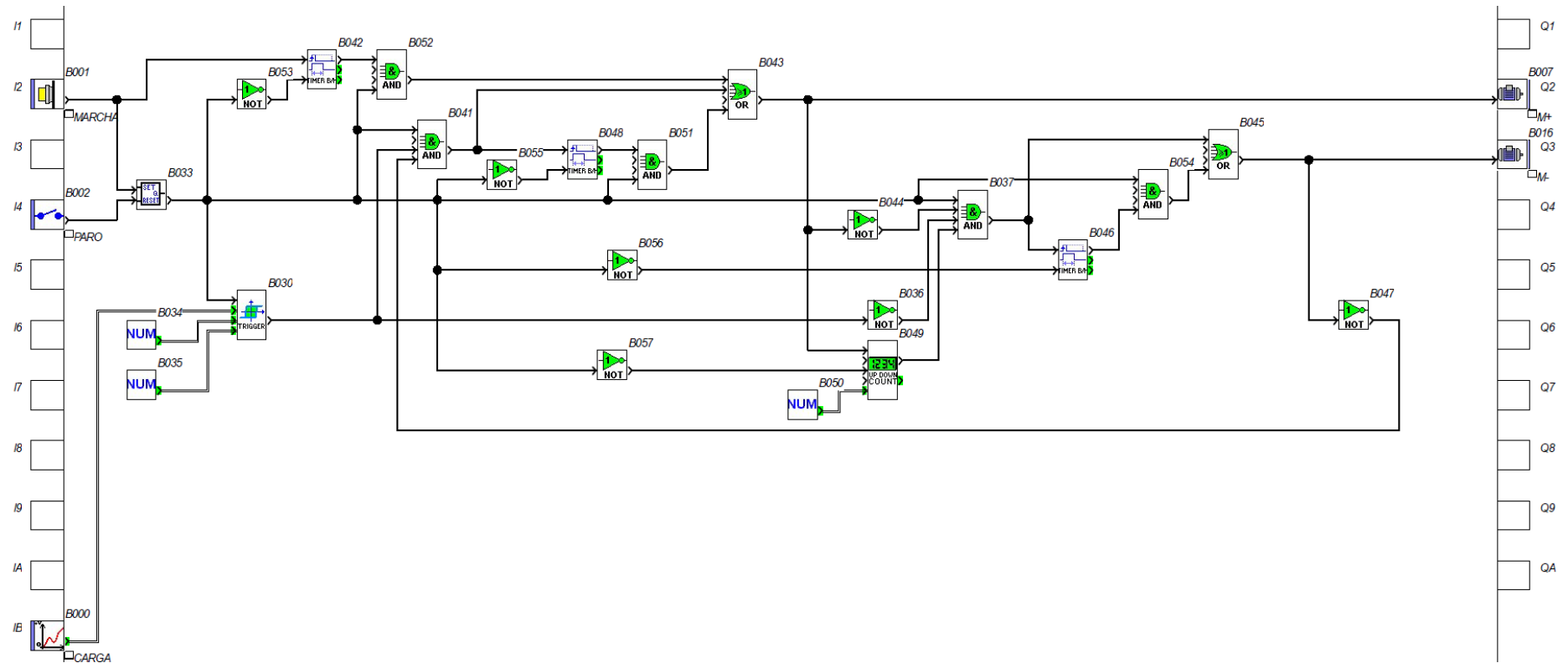


Figura 48 Circuito lógico

La definición y aplicación de cada uno de los elementos se explica en el Anexo 3.4.2 *Elementos del Circuito Lógico*.

2.8.9.4. *Funcionamiento del Circuito Lógico*

El circuito se mantendrá en reposo hasta el instante que se dé una señal impulso por medio de la activación del botón pulsador MARCHA y siempre que NO esté activado el PARO. Si se cumplen ambas condiciones, se activará siempre primero el motor de 800 kW independientemente de la carga que esté conectada en ese momento, cosa que conseguiremos por medio de un contador que no permitirá que se conecte el motor de menor potencia hasta que el motor de 800 kW se haya conectado como mínimo una vez. El motor de 800 kW se mantendrá conectado durante un tiempo mínimo de 10 segundos, cosa que conseguimos aplicando un temporizador que aplica la función B, la cual mantiene una señal de entrada durante x tiempo después de que se dé una señal impulso. Se mantendrá activado este tiempo mínimo para asegurar que el motor llega al régimen estacionario y que la conmutación no se realiza por una lectura que haga el sensor durante los transitorios. Una vez pasados estos 10 segundos iniciales, el sensor nos indicará cual es la carga que está conectada en ese instante de acuerdo con los valores mostrados en la tabla del apartado 2.8.9.2 *Valor de la Variable de Referencia*. En el caso de estar conectada la carga mayor, seguirá funcionando el motor de 800 kW hasta que se produzca el cambio de carga, momento en el cual se conmutará automáticamente de motor. En cambio, si ya se ha cambiado a la carga menor después de esos 10 segundos o simplemente la carga inicial era la menor, se lleva a cabo la conmutación automáticamente. Al conectarse el motor de menor potencia, volverán a originarse transitorios. Por lo tanto, se vuelve a utilizar un temporizador el cual mantendrá conectado el motor menor durante un tiempo mínimo de 5 segundos con el mismo objetivo que se hacía con el primer motor. En este caso se mantendrá conectado un tiempo mínimo de 5 segundos y no de 10 puesto que, al estar los motores conectados al mismo eje mecánico, el segundo motor ya gira a una cierta velocidad, no arranca desde 0, por lo que el transitorio dura mucho menos tiempo, tal y como hemos visto en las gráficas mostradas en el apartado 2.8.8.2 *Resultados de las Simulaciones*. Cuando se detecte que se vuelve a cambiar a la carga de mayor demanda mecánica, se conmutará de nuevo al motor de 800 kW y un tercer temporizador mantendrá el motor de 800 kW conectado durante un tiempo mínimo de 5 segundos. Cuando se vuelva a detectar que se conecta la carga menor, se vuelve a conmutar de motor dejándolo conectado un tiempo mínimo de 5 segundos para saltar los transitorios. Se repetirá ese ciclo de conmutaciones de forma sucesiva hasta que se active PARO. Una vez activado PARO, se desconectará el motor que esté conectado, sea el que sea, y todos los elementos del circuito lógico se resetearán a su estado inicial. El circuito se quedará en reposo hasta que se le vuelva aplicar una señal impulso por medio del pulsador MARCHA y se desactive PARO.

2.8.9.5. *Hardware de la Automatización*

En el apartado 2.8.9.3 *Software de la Automatización* mostramos la programación que se propone en el programa Zelio para automatizar las conmutaciones entre motores en función de la carga. Sin embargo, también resulta interesante mostrar cómo se realizarán las conexiones a nivel de hardware, las cuales se muestran en la *Figura 49 Hardware de la automatización*.

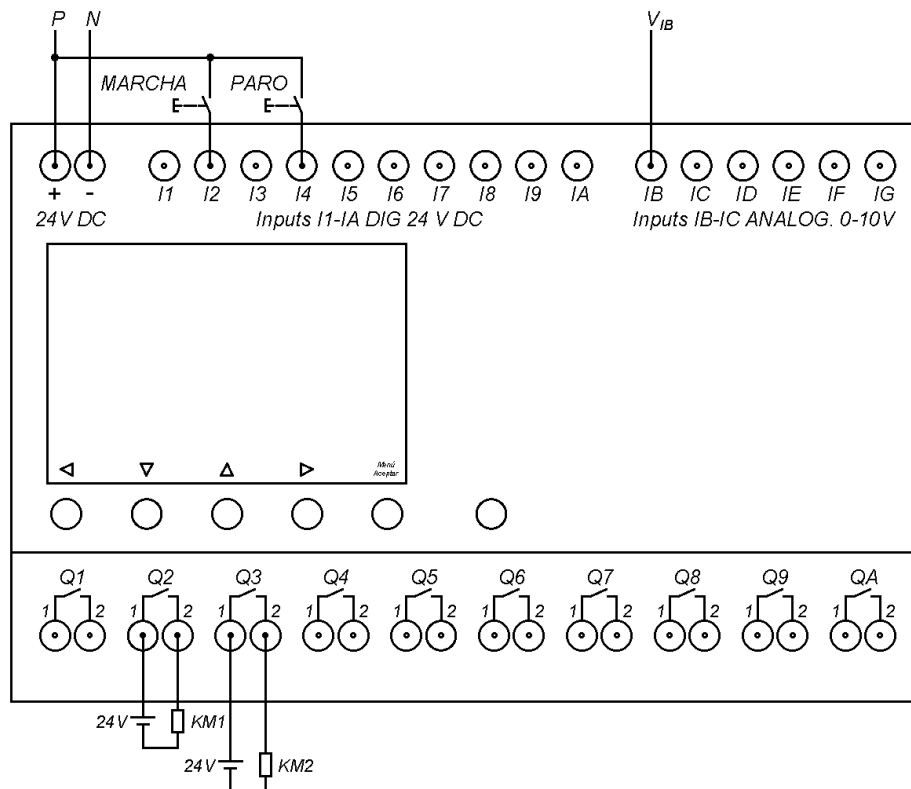


Figura 49 Hardware de la automatización

Tal y como podemos apreciar, el módulo se alimenta a 24 V en continua por lo zona superior izquierda. Esta misma señal de 24 V la aprovechamos para las entradas correspondientes a MARCHA y PARO, las cuales corresponden a las entradas I2 e I4, respectivamente. En cuanto a la entrada analógica, vemos que a la entrada IB le llegará un nivel de tensión el cual proviene del sensor de par que se instala en el eje. Por último, en la zona inferior se muestra las salidas. De acuerdo con la programación, únicamente se utilizarán las salidas Q2 y Q3, las cuales corresponden a la conexión del motor de 800 kW y el motor de menor potencia en cuestión, respectivamente. Cuando se activen dichas salidas, se activarán las bobinas KM1 y KM2, a partir de las cuales se cierran o se abren los interruptores encargados de conectar y desconectar cada uno de los motores.

2.9. Planificación

No es de aplicación en el presente TFG.

2.10. Orden de prioridad entre los documentos básicos

En el presente TFG, el orden de prioridad entre los dos documentos básicos es el que sigue:

- Memoria
- Anexos



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA
Universitat Rovira i Virgili



**ANÁLISIS DEL AHORRO DE ENERGÍA AÑADIENDO UN SEGUNDO MOTOR
DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN EL MISMO EJE MECÁNICO**

3. ANEXOS

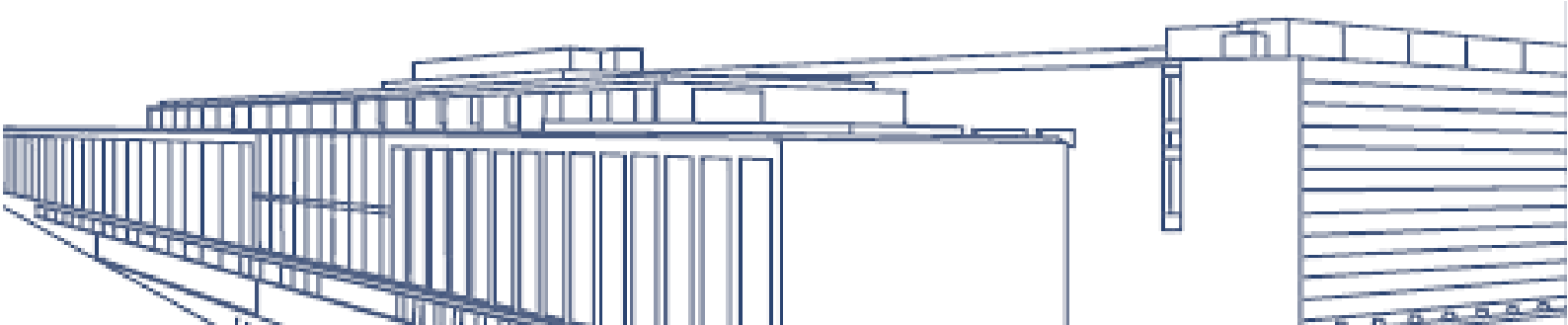
(DOCUMENTO 3 DE 3)

GRADO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOR: Francisco José Espejo Bernet

DIRECTOR: Luis Guasch Pesquer

CURSO: 2020-2021



Índice

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3. ANEXOS | 67 |
| 3.1. RESULTADOS DE CONSUMO Y AHORRO ENERGÉTICO | 69 |
| 3.1.1. <i>Motor 160 kW</i> | 69 |
| 3.1.2. <i>Motor 200 kW</i> | 70 |
| 3.1.3. <i>Motor 250 kW</i> | 71 |
| 3.1.4. <i>Motor 315 kW</i> | 71 |
| 3.1.5. <i>Motor 355 kW</i> | 72 |
| 3.1.6. <i>Motor 400 kW</i> | 73 |
| 3.2. PROGRAMACIÓN EN MATLAB | 74 |
| 3.2.1. <i>Matrices Utilizadas</i> | 74 |
| 3.2.1.1. <i>Matriz “datos”</i> | 74 |
| 3.2.1.2. <i>Matriz PE</i> | 75 |
| 3.2.1.3. <i>Matriz R</i> | 75 |
| 3.2.1.4. <i>Matrices para Graficar</i> | 75 |
| 3.2.2. <i>Código en Matlab</i> | 76 |
| 3.2.2.1. <i>Cálculo del Coste de la Energía Consumida</i> | 76 |
| 3.2.2.2. <i>Cálculo de los Ahorros y Tiempo de Amortización</i> | 77 |
| 3.2.2.3. <i>Graficar Resultados</i> | 79 |
| 3.3. SIMULACIÓN EN PSIM | 80 |
| 3.3.1. <i>Cálculo de los Parámetros</i> | 80 |
| 3.3.2. <i>Implementación del Modelo de Simulación</i> | 82 |
| 3.3.3. <i>Resultados Numéricos de las Simulaciones</i> | 85 |
| 3.4. PROGRAMACIÓN EN ZELIOSOFT2 | 87 |
| 3.4.1. <i>Cálculo del Valor de la Variable de Referencia</i> | 87 |
| 3.4.2. <i>Elementos del Circuito Lógico</i> | 89 |
| 3.4.2.1. <i>Entradas</i> | 89 |
| 3.4.2.2. <i>Salidas</i> | 89 |
| 3.4.2.3. <i>Trigger</i> | 90 |
| 3.4.2.4. <i>Báscula RS</i> | 90 |
| 3.4.2.5. <i>Puertas Lógicas</i> | 91 |
| 3.4.2.6. <i>Temporizadores</i> | 91 |
| 3.4.2.7. <i>Contadores</i> | 91 |
| 3.5. CATÁLOGO ABB | 92 |
| 3.6. TARIFAS ABB | 93 |

3.1. Resultados de Consumo y Ahorro Energético

En el presente punto informaremos sobre cuales han sido los resultados numéricos al realizar los cálculos de consumo y ahorro energético aplicando las expresiones mostradas en el apartado 2.8.4. *Consumo y Ahorro Energético*.

Indicaremos los resultados obtenidos por cada combinación de motores y ciclo de trabajo empezando por el caso en que se añade el motor de menor potencia. Recordamos que, en todos los casos, la carga en los periodos de mayor demanda mecánica es de 750 kW, variando únicamente la carga en los periodos de menor demanda mecánica en función de la potencia nominal del motor que se desea incorporar.

3.1.1. Motor 160 kW

Para la combinación de motores de 800 kW y 160 kW, en los periodos de baja demanda mecánica se considera una carga constante de 150 kW. Por lo tanto, a continuación, mostramos el rendimiento que se obtendría si únicamente trabajase el motor de 800 kW y el que se obtendría al usar la combinación de motores para cada punto de funcionamiento. Una vez conocido los rendimientos en ambos puntos de funcionamiento, calculamos la potencia eléctrica absorbida. Los resultados son los siguientes:

| | $\eta_{,750}$ [%] | $\eta_{,150}$ [%] | Pabs,750 [kW] | Pabs,150 [kW] |
|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|
| M. 800 kW | 95,5 | 59,2 | 785,65 | 253,44 |
| M. 800 kW + M. 160 kW | 95,5 | 95,4 | 785,65 | 157,20 |

Tabla 6 Eficiencia y potencia absorbido para cargas de 750 kW y 150 kW

Una vez conocida la potencia absorbida para cada punto de trabajo, obtenemos la energía consumida para cada caso en función del ciclo de trabajo D de acuerdo con las expresiones (16), (17) y (18).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

| D | Motor 800 kW | | | | | Motor 800 kW + Motor 160 kW | | | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| Eab,750 [kWh] | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,6 | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,6 |
| Eabs,150 [kWh] | 126,7 | 152,1 | 177,4 | 202,8 | 228,1 | 79,0 | 94,3 | 110,0 | 125,8 | 141,5 |
| Eabs,tot. [kWh] | 519,5 | 466,3 | 413,1 | 359,9 | 306,7 | 471,4 | 408,6 | 345,8 | 282,9 | 220,1 |

Tabla 7 Energía consumida para cargas de 750 kW y 150 kW

Por lo tanto, una vez que conocemos el consumo energético, podemos calcular la energía ahorrada tanto en kWh como en porcentaje de acuerdo con las expresiones (19) y (20).

Los resultados numéricos los mostramos en la *Tabla 8*

| D | Eahorrada [kWh] | Ahorro [%] |
|-----|-----------------|------------|
| 0.5 | 48,12 | 9,26 |
| 0.4 | 57,75 | 12,38 |
| 0.3 | 67,37 | 16,31 |
| 0.2 | 76,99 | 21,39 |
| 0.1 | 86,62 | 28,25 |

Tabla 8 Energía ahorrada por la combinación de motores de 800 kW y 160 kW

3.1.2. Motor 200 kW

Para la combinación de motores de 800 kW y 200 kW, en los periodos de baja demanda mecánica se considera una carga constante de 188 kW. Por lo tanto, a continuación, mostramos el rendimiento que se obtendría si únicamente trabajase el motor de 800 kW y el que se obtendría al usar la combinación de motores para cada punto de funcionamiento junto con la potencia eléctrica absorbida en cada caso:

| | $\eta_{,750}$ [%] | $\eta_{,188}$ [%] | Pabs,750 [kW] | Pabs,188 [kW] |
|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Motor 800 kW | 95,5 | 68,9 | 785,7 | 272,1 |
| M. 800 kW + M.200 kW | 95,5 | 95,5 | 785,7 | 196,4 |

Tabla 9 Eficiencia y potencia absorbido para cargas de 750 kW y 188 kW

A continuación, por medio de las expresiones (16), (17) y (18) calculamos la energía eléctrica absorbida para este segundo caso. Los resultados numéricos los mostramos a continuación:

| D | Motor 800 kW | | | | | Motor 800 kW + Motor 200 kW | | | | |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| Eab,750 [kWh] | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 |
| Eabs,188 [kWh] | 136,0 | 163,2 | 190,4 | 217,7 | 244,9 | 98,2 | 117,8 | 137,5 | 157,1 | 176,7 |
| Eabs,tot. [kWh] | 528,9 | 477,5 | 426,1 | 374,8 | 323,6 | 491 | 432,1 | 373,2 | 314,2 | 255,4 |

Tabla 10 Energía consumida para cargas de 750 kW y 188 kW

Calculamos la energía ahorrada tanto en kWh como en porcentaje de acuerdo con las expresiones (19) y (20), obteniendo los siguientes resultados:

| D | Eahorrada [kWh] | Ahorro [%] |
|-----|-----------------|------------|
| 0.5 | 37,85 | 7,16 |
| 0.4 | 45,42 | 9,51 |
| 0.3 | 52,99 | 12,43 |
| 0.2 | 60,56 | 16,16 |
| 0.1 | 68,13 | 21,07 |

Tabla 11 Energía ahorrada por la combinación de motores de 800 kW y 200 kW

3.1.3. Motor 250 kW

Seguimos los mismos pasos comentados en los apartados anteriores pero esta vez con un motor de 250 kW y con una carga de 234 kW en los periodos de baja demanda mecánica.

Los rendimientos y potencia absorbida obtenidos en cada punto de trabajo en este caso son los siguientes:

| | $\eta_{,750}$ [%] | $\eta_{,234}$ [%] | Pabs,750 [kW] | Pabs,234 [kW] |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Motor 800 kW | 95,5 | 78,7 | 785,7 | 297,8 |
| M. 800 kW + M.250 kW | 95,5 | 95,5 | 785,7 | 245,5 |

Tabla 12 Eficiencia y potencia absorbido para cargas de 750 kW y 234 kW

En cuanto a la energía absorbida, obtenemos los siguientes resultados para este tercer caso:

| D | Motor 800 kW | | | | | Motor 800 kW + Motor 250 kW | | | | |
|----------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| Eab,750 [kWh] | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 |
| Eabs,234 [kWh] | 148,9 | 178,7 | 208,5 | 238,3 | 268,1 | 122,8 | 147,3 | 171,9 | 196,4 | 220,9 |
| Eabs,tot. [kWh] | 541,8 | 492,9 | 444,2 | 395,4 | 346,6 | 515,6 | 461,6 | 407,5 | 353,5 | 299,5 |

Tabla 13 Energía consumida para cargas de 750 kW y 234 kW

Calculamos la energía ahorrada tanto en kWh como en porcentaje de acuerdo con las expresiones (19) y (20), obteniendo los siguientes resultados:

| D | Eahorrada [kWh] | Ahorro [%] |
|------------|-----------------|------------|
| 0.5 | 26,18 | 4,83 |
| 0.4 | 31,41 | 6,37 |
| 0.3 | 36,65 | 8,25 |
| 0.2 | 41,88 | 10,59 |
| 0.1 | 47,12 | 13,59 |

Tabla 14 Energía ahorrada por la combinación de motores de 800 kW y 250 kW

3.1.4. Motor 315 kW

Para la combinación de motores de 800 kW y 315 kW, en los periodos de baja demanda mecánica se considera una carga constante de 295 kW. Seguimos los pasos ya comentados en los anteriores casos y obtenemos los siguientes rendimientos y potencias absorbidas:

| | $\eta_{,750}$ [%] | $\eta_{,295}$ [%] | Pabs,750 [kW] | Pabs,295 [kW] |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Motor 800 kW | 95,5 | 87,9 | 785,7 | 336,0 |
| M. 800 kW + M.315 kW | 95,5 | 95,5 | 785,7 | 309,3 |

Tabla 15 Eficiencia y potencia absorbido para cargas de 750 kW y 295 kW

En lo referente al consumo energético, obtenemos:

| | Motor 800 kW | | | | | Motor 800 kW + Motor 315 kW | | | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| D | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| Eab,750 [kWh] | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 |
| Eabs,295 [kWh] | 168 | 201,6 | 235,2 | 268,8 | 302,4 | 154,6 | 185,6 | 216,5 | 247,4 | 278,4 |
| Eabs,tot. [kWh] | 560,8 | 515,9 | 470,9 | 425,9 | 381 | 547,5 | 499,8 | 452,2 | 404,6 | 356,9 |

Tabla 16 Energía consumida para cargas de 750 kW y 295 kW

Calculamos la energía ahorrada tanto en kWh como en porcentaje obteniendo los siguientes resultados:

| D | Eahorrada [kWh] | Ahorro [%] |
|------------|-----------------|------------|
| 0.5 | 13,37 | 2,38 |
| 0.4 | 16,05 | 3,11 |
| 0.3 | 18,72 | 3,98 |
| 0.2 | 21,39 | 5,02 |
| 0.1 | 24,07 | 6,32 |

Tabla 17 Energía ahorrada por la combinación de motores de 800 kW y 315 kW

3.1.5. Motor 355 kW

Para la combinación de motores de 800 kW y 355 kW, en los periodos de baja demanda mecánica se considera una carga constante de 333 kW y obtenemos los siguientes resultados de rendimiento y potencia absorbida.

| | $\eta_{,750}$ [%] | $\eta_{,333}$ [%] | Pabs,750 [kW] | Pabs,333 [kW] |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|
| Motor 800 kW | 95,5 | 91,8 | 785,7 | 362,4 |
| M. 800 kW + M.355 kW | 95,5 | 95,5 | 785,7 | 348,4 |

Tabla 18 Eficiencia y potencia absorbido para cargas de 750 kW y 333 kW

En lo referente al consumo energético, obtenemos:

| | Motor 800 kW | | | | | Motor 800 kW + Motor 355 kW | | | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| D | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| Eab,750 [kWh] | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 |
| Eabs,333 [kWh] | 181,2 | 217,5 | 253,7 | 289,9 | 326,2 | 174,2 | 209,1 | 243,9 | 278,7 | 313,6 |
| Eabs,tot. [kWh] | 574 | 531,7 | 489,4 | 447,1 | 404,8 | 567 | 523,3 | 479,6 | 435,9 | 392,1 |

Tabla 19 Energía consumida para cargas de 750 kW y 333 kW

Y en cuanto al ahorro energético:

| D | Eahorrada [kWh] | Ahorro [%] |
|-----|-----------------|------------|
| 0.5 | 7,01 | 1,22 |
| 0.4 | 8,42 | 1,58 |
| 0.3 | 9,82 | 2,01 |
| 0.2 | 11,22 | 2,51 |
| 0.1 | 12,62 | 3,12 |

Tabla 20 Energía ahorrada por la combinación de motores de 800 kW y 355 kW

3.1.6. Motor 400 kW

Para este último caso, en los periodos de baja demanda mecánica se considera una carga constante de 375 kW. Por tanto, obtenemos los siguientes resultados en cuanto a rendimiento y potencia absorbida:

| | $\eta_{,750}$ [%] | $\eta_{,375}$ [%] | Pabs,750 [kW] | Pabs,375 [kW] |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Motor 800 kW | 95,5 | 94,9 | 785,7 | 395 |
| M. 800 kW + M.400 kW | 95,5 | 95,5 | 785,7 | 392,8 |

Tabla 21 Energía ahorrada por la combinación de motores de 800 kW y 400 kW

En lo referente al consumo energético:

| D | Motor 800 kW | | | | | Motor 800 kW + Motor 400 kW | | | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| Eab,750 [kWh] | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 | 392,8 | 314,3 | 235,7 | 157,1 | 78,7 |
| Eabs,375 [kWh] | 197,5 | 237 | 276,5 | 316 | 355,5 | 196,4 | 235,7 | 275 | 314,3 | 353,5 |
| Eabs,tot. [kWh] | 590,3 | 551,3 | 512,2 | 473,1 | 434,1 | 589,2 | 550,0 | 510,7 | 471,4 | 432,2 |

Tabla 22 Energía consumida para cargas de 750 kW y 375 kW

Y en cuanto al ahorro energético:

| D | Eahorrada [kWh] | Ahorro [%] |
|-----|-----------------|------------|
| 0.5 | 1,09 | 0,19 |
| 0.4 | 1,31 | 0,24 |
| 0.3 | 1,53 | 0,30 |
| 0.2 | 1,75 | 0,37 |
| 0.1 | 1,97 | 0,45 |

Tabla 23 Energía ahorrada por la combinación de motores de 800 kW y 400 kW

3.2. Programación en Matlab

Una vez obtenido el ahorro energético que se obtiene al usar cada combinación de motores, se prosiguió a calcular el ahorro económico, es decir, traducir el ahorro de kWh a €. Tal y como se indica en el punto 2.8.5. *Ahorro Económico*, para realizar esta traducción precisamos de conocer cuál es el precio de la energía.

Tal y como ya indicamos en el mismo punto mencionado, la tarifa que mejor se adapta a nuestro caso es la tarifa 6.A, la cual presenta 6 periodos distintos a lo largo del año y en cada periodo el precio de la energía es distinto, de acuerdo con lo mostrado en la *Figura 33* y *Tabla 3*, respectivamente.

Sin embargo, vemos que el precio de la energía depende del mes, del día del mes y de la hora del día en cuestión. Además, también varía en función de si se trata de un día festivo o si es fin de semana. Por lo tanto, se llegó a la conclusión de que dependía de demasiadas variables para proceder a realizar el cálculo en Excel como habíamos hecho con el ahorro energético.

Por ello, se decide realizar los cálculos tanto del ahorro económico como del tiempo de amortización por medio de Matlab, el cual presenta una gran potencia de cálculo que nos permite tener en cuenta todas las variables mencionadas y, además, ofrece muchas opciones de representación gráfica de los resultados.

Primeramente, hablaremos sobre las principales matrices utilizadas para que el lector comprenda que información representa cada una de ellas y como está organizada dicha información. Posteriormente, hablaremos del código de programación propiamente dicho.

3.2.1. Matrices Utilizadas

En el presente apartado explicaremos cuales son las principales variables que se utilizan en la programación del Matlab. Cabe destacar que, en el programa de Matlab, todas las variables que se define tienen forma de matrices por lo que es importante indicar la distribución de datos.

3.2.1.1. Matriz “datos”

Se trata de una matriz bidimensional de 8760x124. Cada fila de la matriz *datos* representa una hora del día y se representan todas las horas del año. Si multiplicamos las 24 horas del día por los 365 días del año, suponiendo año no bisiesto, obtenemos las 8.760 filas.

En las 2 primeras columnas de la matriz *datos* se define el calendario. En la primera columna se indica el mes, reconociendo enero con el valor 1, febrero con el valor 2, marzo con el valor 3 y así sucesivamente hasta diciembre con el valor 12. En la segunda columna se indican los días de cada mes, variando entre 1 y 31, dependiendo del mes en cuestión.

En la tercera columna se define el reloj en formato de 24 horas, es decir, a lo largo de la columna 3 se indicará la hora de cada día desde las 00h hasta las 23h.

En la cuarta columna se indica el periodo P al cual pertenece cada una de las horas del año, variando este valor entre 1 y 6. Tal y como ya hemos comentado anteriormente, a cada hora del año se le asigna un periodo P en función del mes y del día. Con la información que ya tenemos podemos asignar a cada hora su periodo. Sin embargo, no sabemos qué días son festivos o fines de semana. Para saber que días son sábado y domingo se decide usar el calendario del presente año 2021 y en cuanto a los días festivos, se decide tener en cuenta únicamente los días festivos nacionales y locales de Tarragona de acuerdo con el mismo calendario de 2021.

Desde la columna 5 hasta la columna 124, ambas incluidas, se añade tanto el consumo energético como el coste económico de dicha energía, añadiendo primero el consumo energético en kWh y en la columna de su derecha el coste económico en euros. Posteriormente en el apartado 3.2.2.2. *Cálculo de los Ahorros y Tiempo de Amortización* explicaremos la programación para calcular dicho coste.

En cuanto al orden de los resultados, primero añadimos los resultados obtenidos con el motor de referencia y con la combinación de motores de 800 kW y de 160 kW para cargas de 750 kW y 150 kW. Cabe destacar que añadimos los resultados desde $D=0,5$ hasta $D=0,1$, en este orden. Posteriormente, se añade los resultados obtenidos al calcular los consumos y coste económico con el motor de referencia y con la combinación de motores de 800 kW y de 200 kW para cargas de 750 kW y 188 kW con el mismo orden respecto a D y así sucesivamente hasta rellenar todas las columnas.

3.2.1.2. *Matriz PE*

Se trata de una matriz bidimensional de 6×2 . Por cada fila, en la primera columna se indica el periodo P correspondiente y en la segunda columna se indica el precio de la energía para el periodo en cuestión en €/kWh. Rellenamos esta matriz de acuerdo con lo mostrado en la *Tabla 3*.

3.2.1.3. *Matriz R*

Se trata de una matriz tridimensional de $3 \times 5 \times 6$. En la primera fila se presentan los resultados de energía ahorrada por la combinación de motores en cuestión en kWh/año. En la segunda fila se indica el ahorro económico conseguido en €/año. En la tercera y última fila se indica el tiempo que se tardaría en amortizar la inversión que supone comprar el segundo motor en años.

En cuanto a las 5 columnas, en cada una de ellas se representan los resultados obtenidos para un ciclo de trabajo distinto. En la primera columna se indican los resultados de ahorro energético, económico y tiempo de amortización para $D=0,5$. La segunda columna presenta los mismos resultados, pero para $D=0,4$ y así sucesivamente hasta la quinta columna para $D=0,1$

Al ser la matriz tridimensional, esto nos permite introducir todos los resultados obtenidos para todos los motores en una misma matriz. En la primera página de esta matriz, es decir, para fila x columna $x + 1$, se añaden los resultados obtenidos si la combinación de motores es de 800 kW y 160 kW. Según vamos pasando páginas, vamos cambiando de combinación de motores siguiendo un orden ascendiente en cuanto a la potencia nominal del motor menor hasta llegar a la página 6 donde se muestran los resultado para la combinación de motores de 800 kW y 400 kW.

3.2.1.4. *Matrices para Graficar*

En el presente apartado hablaremos de una serie de matrices que, a diferencia de las que hemos comentado hasta el momento, no se utilizan para realizar cálculos ni para obtener ningún resultado. Se tratan simplemente de un conjunto de matrices las cuales utilizamos para obtener las gráficas tridimensionales y de contorno mostradas en el apartado 2.8.7. *Representación Gráfica de los Resultados*.

A continuación, pasamos a comentar las matrices necesarias para graficar:

- **Pot_motor**. Se trata de una matriz bidimensional de 1×6 . En cada columna de esta matriz se indica la potencia nominal de cada motor en kW, empezado en la columna 1 por 160 y acabando en la columna 6 con 400.

- **D.** Se trata de una matriz bidimensional de 1x5 donde en las columnas se indican los distintos ciclos de trabajo estudiados en pu empezando por 0.5 y acabando en 0.1
- **Ea.** Se trata de una matriz bidimensional de 6x5. En las filas de esta matriz se indicará únicamente la energía ahorrada anualmente por cada combinación de motores. Cada fila contendrá los datos de un caso distinto empezando en la fila 1 la combinación de motores de 800 kW y 160 kW y acabando en la fila 6 con la combinación de motores de 800 kW y 400 kW. A cada una de las 5 columnas se le asigna un ciclo de trabajo distinto, empezando por 0.5 y acabando en 0.1.
- **Da.** Se trata de una matriz bidimensional de 6x5. En las filas de esta matriz se indicará únicamente el ahorro económico anual por cada combinación de motores. El orden en que se organizan los datos es el mismo que en el caso anterior y se sigue el mismo formato en cuanto a las columnas.
- **Ta.** Se trata de una matriz bidimensional de 6x5 que sigue el mismo formato que las dos matrices anteriores en cuanto a organización de datos, pero en dicha matriz únicamente se indica el tiempo de amortización en cada caso estudiado.
- **PM.** Se trata de una matriz de 1x6. En cada columna se indica el precio de los distintos motores que se pueden añadir al eje mecánico junto con el motor de referencia en euros. En la primera columna indica el precio del motor de 160 kW y se va incrementado la potencia hasta llegar al precio del motor de 400 kW en la última columna.

3.2.2. Código en Matlab

En el presente apartado comentaremos el código de Matlab que hemos elaborado para realizar los distintos cálculos a partir de las matrices que acabamos de comentar, así como indicar el funcionamiento de cada una de las funciones utilizadas.

3.2.2.1. Cálculo del Coste de la Energía Consumida

Tal y como hemos indicado en el apartado anterior, en la cuarta columna de la matriz *datos*, se indica a que periodo P pertenece cada hora del año y en la matriz *PE* se indica el precio de la energía en función del periodo. En las columnas impares a partir de la quinta columna de la matriz *datos*, se indica el consumo energético en el orden que hemos indicado en el anterior apartado. Por lo tanto, al conocer el periodo al que pertenece cada hora y el precio de cada periodo, calculamos el coste económico de la energía para cada posible combinación de motores para las cargas consideradas.

Este cálculo lo realizamos a través de un bucle con el cual recorreremos todas las filas de la matriz *datos* y colocamos el resultado del producto de la energía consumida y el precio de la misma en función de lo indicado en la columna 4 en el lugar correspondiente.

A continuación, mostramos un fragmento del código en Matlab donde realizamos las operaciones que acabamos de indicar. Cabe destacar que debido a lo extensa que es esta parte del código, mostramos únicamente los cálculos para periodo P=1 y para cargas de 750 kW y 150 kW. En los siguientes casos se repiten los mismos cálculos, pero cambiando la columna de la matriz *datos* y la fila de la matriz *PE* al valor adecuado.

```

For n=1:8760
    switch datos(n,4)
        case 1
            % Precio con cargas de 750 kW y 150 kW
            datos(n,6) = datos(n,5) * PE(1,2);
            datos(n,8) = datos(n,7) * PE(1,2);
            datos(n,10) = datos(n,9) * PE(1,2);
            datos(n,12) = datos(n,11) * PE(1,2);

```

```

        datos (n,14) = datos (n,13) * PE (1,2);
        datos (n,16) = datos (n,15) * PE (1,2);
        datos (n,18) = datos (n,17) * PE (1,2);
        datos (n,20) = datos (n,19) * PE (1,2);
        datos (n,22) = datos (n,21) * PE (1,2);
        datos (n,24) = datos (n,23) * PE (1,2);
    .
    .
    .
        case 2
    .
    .
    .
        case 3
    .
    .
    .
        case 4
    .
    .
    .
        case 5
    .
    .
    .
        case 6
    .
    .
    .
end
end

```

Código 1. Cálculo del coste económico de la energía**3.2.2.2. Cálculo de los Ahorros y Tiempo de Amortización**

A continuación, se procede a rellenar la matriz R con la información en el mismo formato y orden que se indica en el apartado 3.2.1.3. *Matriz R*. Cabe destacar que tanto los cálculos de ahorro energético y económico anual como el cálculo del tiempo de amortización se realiza a la vez que se insertan los datos en su posición correspondiente dentro de la matriz.

Primero mostraremos el código que se ha elaborado para realizar dichos cálculos y posteriormente comentaremos explicaremos cada uno de los bucles y funciones que se utilizan.

El código en cuestión es el siguiente:

```

for m=1:6
    switch m
        case 1
            i=5;
        case 2
            i=25;
        case 3
            i=45;
        case 4
            i=65;
        case 5
            i=85;
        case 6
            i=105;
    end
end

```

```

end
  for col=1:5
    switch col
      case 1
        pos=0;
      case 2
        pos=4;
      case 3
        pos=8;
      case 4
        pos=12;
      case 5
        pos=16;
    end
    for fila=1:3
      switch fila
        case 1
          R(fila,col,m)=sum(datos(:,i+pos))-sum(datos(:,i+2+pos));
        case 2
          R(fila,col,m)=sum(datos(:,i+1+pos))-sum(datos(:,i+3+pos));
          din_ahorrado=R(fila,col,m);
        case 3
          R(fila,col,m)=(PM(1,m)/din_ahorrado);
        end
      end
    end
  end
end

```

Código 2. Rellenar matriz R

Como podemos apreciar, se utilizan un total de 3 bucles. El primero de ellos, nos permite saber a cuál de los motores pertenecen los cálculos que estamos realizando en ese instante. El segundo y tercer bucle nos sirve para recorrer todas las posiciones de la matriz *R*. Como podemos apreciar, tal y como está programado, se rellena la matriz columna a columna y no fila a fila.

Las variables *i* y *pos* nos sirven para poder movernos de forma ordenada por la matriz *datos* y así seleccionar la información que se necesita en cada instante correctamente de dicha matriz para proceder con los cálculos.

En cuanto al switch, en función de la fila de la matriz *R* en que nos encontremos en ese momento, se podrá realizar 3 posibles cálculos.

Si estamos en la fila 1, se procede a realizar el cálculo del ahorro energético anual. Esto lo realizamos llevando a cabo la diferencia entre los resultados de dos funciones *sum*. Tal y como lo tenemos programado, la función *sum* realiza la suma de todos los valores presentes en la columna que se indica. Al seguir con el formato que indicamos cuando hablamos de cómo está ordenada la información en la matriz *datos*, vemos que la diferencia se realiza entre el consumo energético para una determinada carga y ciclo de trabajo cuando únicamente trabaja el motor de 800 kW y el consumo para la misma carga y ciclo de trabajo, pero cuando se utiliza la combinación de motores correspondiente, por lo que el resultado de dicha diferencia es el ahorro energético. Además, como hemos explicado, para calcular cada uno de los miembros de la resta se suman todos los consumos de todas las horas del año, por lo que el ahorro energético que se obtiene es anual.

En cambio, si estamos en la fila 2, se procede a realizar el cálculo del ahorro económico anual. Esto lo realizamos aplicando de nuevo la diferencia entre los resultados de dos funciones *sum*. Con dicha función calculamos el coste económico de la energía consumida

al cabo del año cuando solamente se utiliza el motor de 800 kW y cuando se utiliza la combinación de motores correspondiente para unas cargas y ciclo de trabajo determinados.

Por último, si estamos en la tercera fila simplemente se aplica la expresión (21) con la que calculamos el tiempo de amortización en años.

Posteriormente, una vez rellenados todos los datos de la primera columna, se pasará a la columna número 2 y se repetirá el proceso, pero para un ciclo de trabajo distinto y así hasta recorrer todas las filas y columnas. Una vez rellenadas todas las filas y columnas, se pasa de página y se repite el proceso, pero con otra carga y otro motor. Recordamos que en el primera página se indican los resultados cuando se añade un motor de 160 kW y se va incrementando la potencia nominal según se va pasando de páginas hasta llegar al de 400 kW en la página 6.

3.2.2.3. Graficar Resultados

Una vez que obtenidos los resultados en cuanto a ahorros anuales, energético y económico, y tiempo de amortización, procedemos a graficar estos resultados. Para ello, definimos las matrices D y Pot_motor , de las cuales hemos hablado anteriormente y son necesarias para dar valores a los ejes de la gráficas resultante.

Para poder elaborar gráficas distintas, es decir, una gráfica con únicamente los valores de ahorro energético anual para cada uno de los casos estudiados, otra con únicamente los valores de ahorro económico y una tercera con únicamente el tiempo de amortización, se precisa de contar con una matriz distinta para cada caso. Por ello, se elaboran las matrices Ea , Da y Ta , de las cuales ya hablamos en el punto 3.2.1.4. *Matrices para Graficar*.

Se debe de rellenar estas matrices con el mismo formato que se indica en el punto anteriormente mencionado. Una vez que estén rellenadas con los datos correctos, se procede a graficar los resultados por medio de las funciones *meshz* y *contour*, las cuales nos proporcionan las gráficas 3D y de contorno, respectivamente, que mostramos en el apartado 2.8.7 *Representación Gráfica de los Resultados*

Para llevar a cabo las operaciones que acabamos de comentar, se aplican las siguientes líneas de código:

```
D= 0.5:-0.1:0.1;
Pot_motor = [160 200 250 315 355 400];
m=1;
    for fila=1:6
        for col=1:5
            Ea(fila,col)=R(1,col,m)/1000;
            Da(fila,col)=R(2,col,m)/1000;
            Ta(fila,col)=R3(col,m);
        end
        m=m+1;
    end
meshz(D,Pot_motor,Ea);
ylabel("P_{N} [kW] ");
xlabel("D [pu]");
zlabel("E_{año} [MWh/año]");

contour(D,Pot_motor,Ea);
ylabel("P_{N} [kW] ");
xlabel("D [pu]");

meshz(D,Pot_motor,Da);
ylabel("P_{N} [kW] ");
```

```

xlabel("D [pu]");
ylabel("€_{año} [k€/año]");

contour(D, Pot_motor, Da);
ylabel("P_{N} [kW] ");
xlabel("D [pu]");

meshz(D, Pot_motor, Ta);
ylabel("P_{N} [kW] ");
xlabel("D [pu]");
ylabel("T_{amortización} [año]");

contour(D, Pot_motor, Ta);
ylabel("P_{N} [kW] ");
xlabel("D [pu]");
ylabel("T_{amortización} [año]");

```

Código 3. Graficar resultados

Como vemos, se utilizan dos bucles para recorrer las 3 matrices. Todos los valores presentes en la primera fila de la matriz R , es decir, todos los valores de ahorro energético se introducen en la matriz Ea mientras que todos los valores de la fila 2 se introducen en la matriz Da y todos los valores de la fila 3 se introducen en la matriz Ta . Vemos que a la hora de pasar los valores de ahorro energético y de ahorro económico de la matriz R a su correspondiente matriz, se dividen estos valores entre 1.000. Esto se debe a que los resultados tanto de ahorro energético como económico son del orden de 10^5 kWh/año o 10^5 €/año. Por lo tanto se decide dividir entre 1.000 para pasar de kWh/año a MWh/año y de €/año a k€/año.

Como ya hemos comentado, para obtener las gráficas 3D y las gráficas de contorno, se aplican las funciones *meshz* y *contour*. El primer de los parámetros que se introducen en cada función indican el valor del eje de abscisas X, en el cual se ha decidido que represente los valores del ciclo de trabajo D. El segundo de los parámetros indica el valor del eje de ordenadas Y en el cual se ha decidido que se presenten los valores de las potencias nominales de cada uno de los motores estudiados. Por último, el tercer parámetro, indican los valores presentados en el eje Z, los cuales serán los valores de Ea , Da o Ta en función del caso. Por último, las funciones *xlabel*, *ylabel* y *ylabel* sirven para poner nombres a cada uno de los 3 ejes.

3.3. Simulación en PSIM

En el presente apartado indicaremos cuales han sido los resultados de los parámetros de todos los motores que hemos estudiado en el presente TFG de acuerdo con las expresiones mostradas en el apartado 2.8.8.1 *Caracterización de los Motores*. Posteriormente, mostraremos el circuito implementado en el programa PSIM para realizar las simulaciones, así como explicar cada uno de los elementos que lo configuran.

3.3.1. Cálculo de los Parámetros

Para calcular los parámetros de los motores, aplicaremos los criterios y expresiones matemáticas mostradas en el apartado 2.8.8.1 *Caracterización de los Motores*. Sin embargo, necesitamos conocer las inductancias de las respectivas reactancias que obtenemos con las expresiones que acabamos de comentar. Estas inductancias las calcularemos de la siguiente forma:

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} \quad (27)$$

$$L_r = \frac{X_{rd}}{2\pi f} \quad (28)$$

$$L_s = \frac{X_{sd}}{2\pi f} \quad (29)$$

Siendo:

L_m Inductancia de magnetización [H]

L_r Inductancia del rotor [H]

L_s Inductancia del estator [H]

f Frecuencia [Hz]

El resto de las variables que aparecen en las anteriores expresiones ya se han comentado anteriormente su significado y unidades en el apartado citado al inicio de este.

Aplicando, pues, todas las expresiones que hemos indicado, obtenemos los siguientes resultados matemáticos.

| Motor | R_r [mΩ] | X_{rd} [mΩ] | L_r [mH] | R_s [mΩ] | X_{sd} [mΩ] | L_s [mH] | X_m [H] | L_m [mH] |
|-------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|-----------|------------|
| 0 | 3,57 | ≈ 0 | ≈ 0 | 5,36 | 50,15 | 0,16 | 1,00 | 3,20 |
| 1 | 19,84 | ≈ 0 | ≈ 0 | 29,76 | 262,53 | 0,84 | 5,25 | 16,71 |
| 2 | 14,28 | ≈ 0 | ≈ 0 | 21,43 | 210,00 | 0,67 | 4,20 | 13,37 |
| 3 | 12,70 | ≈ 0 | ≈ 0 | 19,04 | 168,02 | 0,53 | 3,36 | 10,70 |
| 4 | 10,08 | ≈ 0 | ≈ 0 | 15,11 | 127,36 | 0,41 | 2,55 | 8,11 |
| 5 | 8,05 | ≈ 0 | ≈ 0 | 12,07 | 118,32 | 0,38 | 2,37 | 7,53 |
| 6 | 7,94 | ≈ 0 | ≈ 0 | 11,90 | 96,03 | 0,31 | 1,92 | 6,11 |

Tabla 24 Parámetros de los motores

Cabe destacar que cada motor lo identificamos con su potencia nominal de la misma forma que mostramos en la *Tabla 1 Características técnicas de los motores estudiados*, siendo pues el motor 0 el motor de referencia de 800 kW y el resto son los distintos motores de distintas potencias estudiados en orden ascendente.

3.3.2. Implementación del Modelo de Simulación

El circuito que se ha utilizado para realizar las distintas simulaciones es el siguiente:

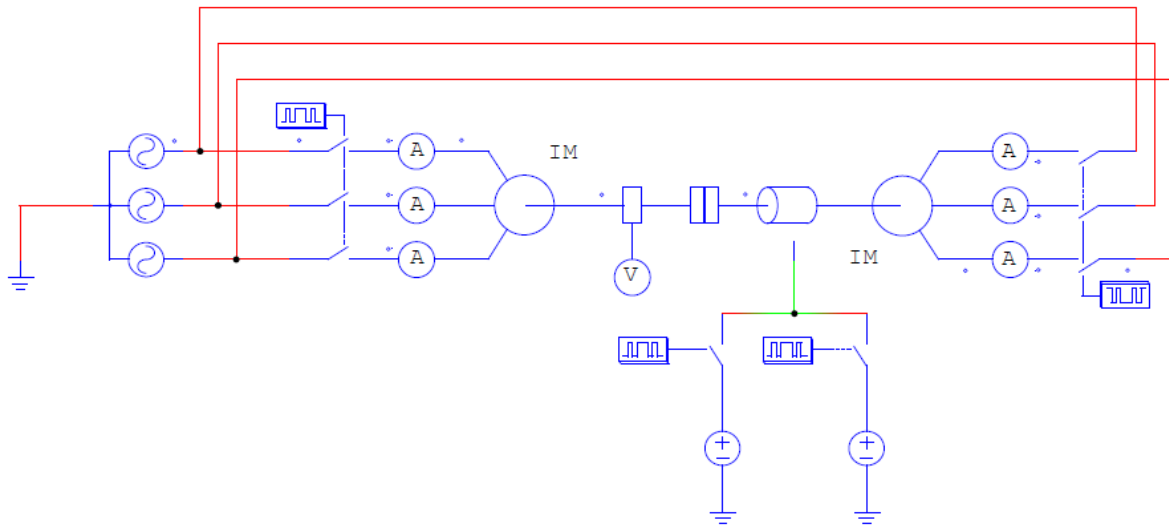


Figura 50 Circuito implementado en PSIM

A continuación, pasaremos a describir cada uno de los elementos utilizados en el circuito anterior, así como indicar los valores de los parámetros de estos. Cabe destacar que como estudiamos múltiples casos, se indicaran únicamente los valores correspondientes a la simulación de los transitorios cuando se conectan el motor de 800 kW y de 160 kW sobre el mismo eje mecánico arrancando primero el motor de 800 kW. Para el resto de los casos, simplemente se deben de ajustar los valores de acuerdo con lo establecido en apartados anteriores.

Los elementos del circuito son los siguientes:

- **Fuente de tensión trifásica sinusoidal.** Se trata de una fuente de tensión la cual utilizaremos para alimentar las tres fases de los dos motores de inducción presentes en la simulación. Tal y como hemos indicado anteriormente, se fijará un valor eficaz de línea de 690V. En cuanto a la frecuencia esta se ajusta a los 50 Hz. La simbología de este elemento y su tabla de valores son los siguientes:

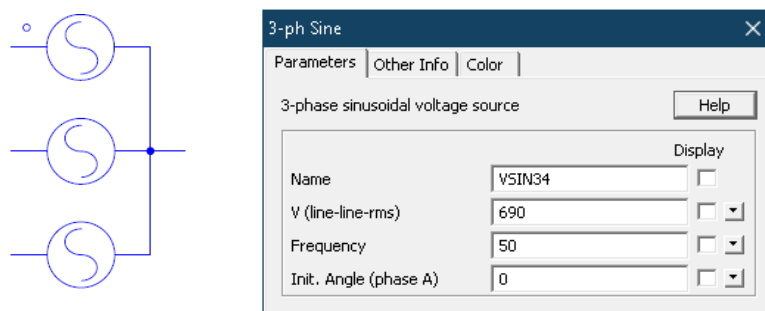


Figura 51 Simbología de la fuente de tensión trifásica y tabla de valores

- **Motor de Inducción.** En cuanto al motor de inducción, su simbología y tabla de valores son los siguientes:

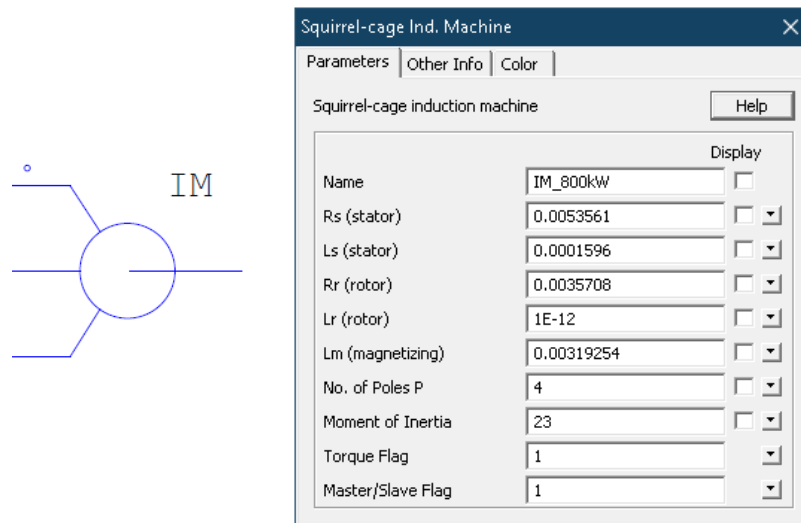


Figura 52 Simbología del motor de inducción y tabla de valores

Tal y como ver, en la tabla de valores de la *Figura 52 Simbología del motor de inducción y tabla de valores* se indican los valores correspondientes al motor de 800 kW. Para el resto de los motores, simplemente debemos de cambiar el valor de los distintos campos por los valores mostrados en la *Tabla 24 Parámetros de los motores*. En cuanto al número de polos, recordamos que todos tienen 2 pares de polos, es decir, 4 polos en total. En cuanto al momento de inercia, este dato nos lo proporciona el fabricante en su catálogo.

- **Sensor de velocidad.** Este elemento nos permitirá saber cuál es la velocidad de sistema. En su nodo inferior se conecta un voltímetro y por cada voltio que muestre el voltímetro equivale a 1 rpm. Su simbología y tabla de valores son los siguientes:

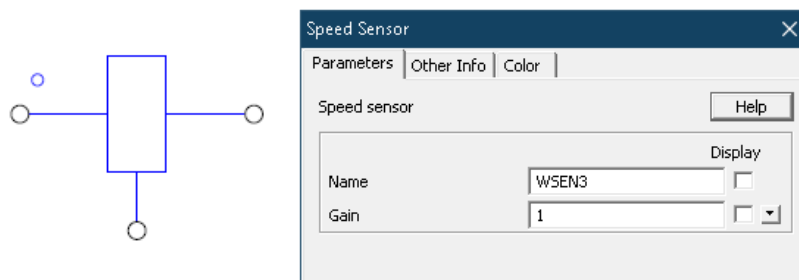


Figura 53 Simbología del sensor de velocidad y tabla de valores

- **Bloque de acoplamiento mecánico.** Se trata de un elemento que nos permite unir dos sistemas mecánicos, y en nuestro caso nos sirve para poder acoplar los dos motores en un mismo eje mecánico. Su simbología es la siguiente:

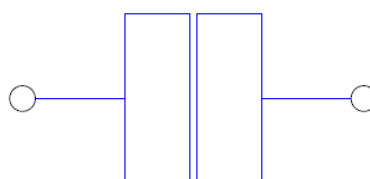


Figura 54 Simbología del bloque de acoplamiento mecánico

- **Carga mecánica con control externo.** Se trata de una carga que presenta un nodo en la zona inferior a partir del cual se conecta el circuito de control. En función de la tensión que llega a dicho nodo, varía el valor de carga, correspondiendo a cada voltio una unidad de N·m. Por lo tanto, cambiando el valor de la tensión que llega a dicho nodo, cambiamos el valor de la carga. Su simbología y tabla de valores son los siguientes:

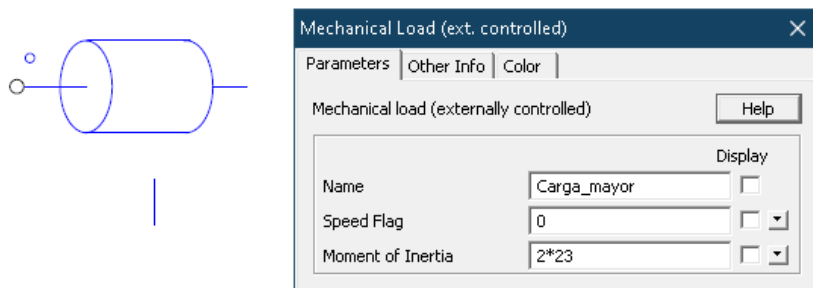


Figura 55 Simbología de la carga mecánica con control externo y tabla de valores

En cuanto a los elementos de control, encontramos los siguientes:

- **Switch bidireccional trifásico.** Ese elemento lo utilizaremos para conectar y desconectar los motores. Todos los interruptores estarán inicialmente abiertos y será con el elemento Getting Block, del cual hablamos posteriormente, con el que controlaremos los interruptores, y, por tanto, la conexión y desconexión de los motores. La simbología del switch bidireccional trifásico y su tabla de valores son los siguientes:

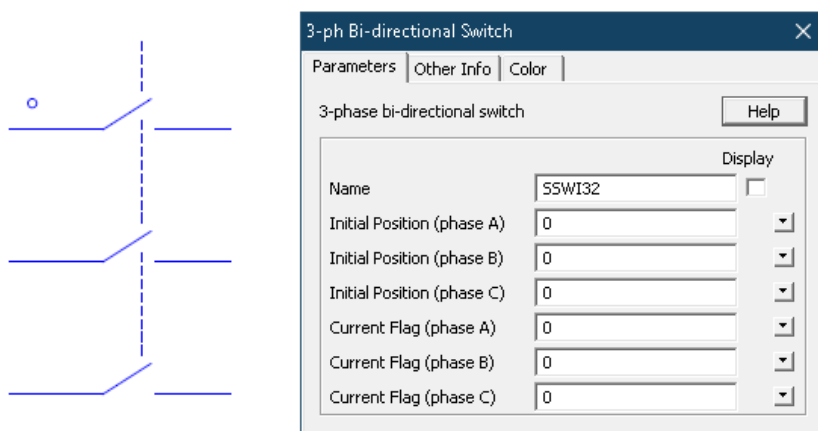


Figura 56 Simbología del switch bidireccional trifásico y su tabla de valores

- **Switch bidireccional.** Elemento idéntico al anterior, pero con únicamente una fase. Este elemento los utilizaremos para conectar y desconectar las distintas cargas. Su simbología y tabla de valores son los que se muestran en la Figura 57.

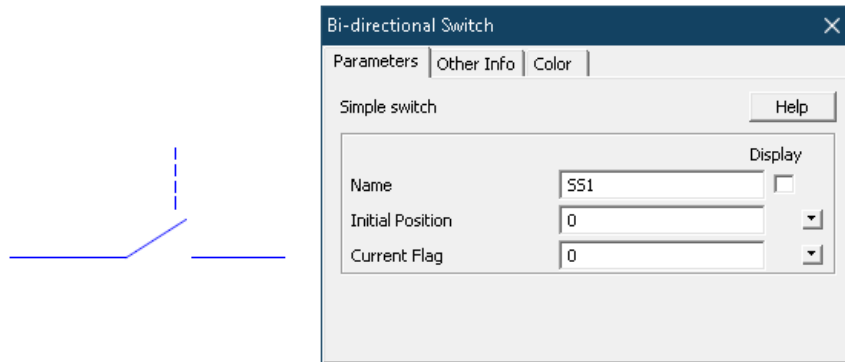


Figura 57 Simbología del switch bidireccional y su tabla de valores

- **Getting block.** Este elemento lo utilizaremos para controlar los distintos switch y así conectar y desconectar los motores. Fijamos la frecuencia de conmutación a 0 Hz y así, los valores que indicamos en el campo denominado Switching Points, indican el instante en segundos que se realiza la conmutación. Su simbología y un ejemplo de tabla de valores son los siguientes:

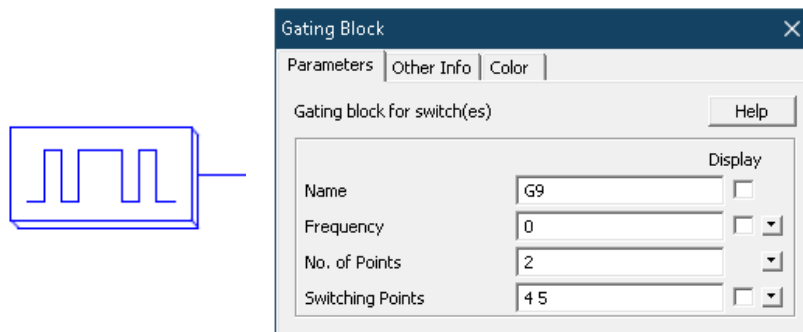


Figura 58 Simbología del Getting Block y ejemplo de tabla de valores

- **Fuente de tensión DC.** Este elemento lo utilizaremos para fijar el valor del par resistente de la carga. Para ello, cada voltio que suministre la fuente de tensión en continua representará 1 N·m. A continuación, se muestra su simbología y un ejemplo de su tabla de valores:

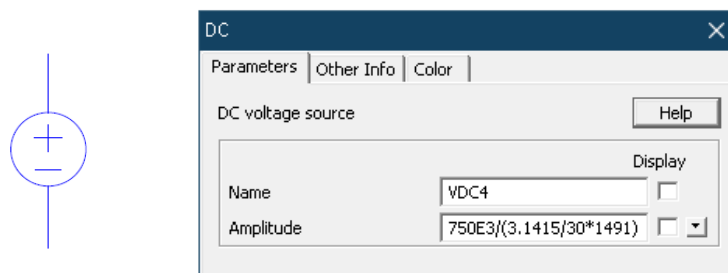


Figura 59 Simbología fuente de continua y ejemplo de tabla de valores

3.3.3. Resultados Numéricos de las Simulaciones

A continuación, mostraremos los resultados obtenidos en las simulaciones de forma tabular. Indicaremos el valor máximo y mínimo de la corriente, velocidad y par motor, así como el tiempo de arranque de cada motor después de realizar las conmutaciones.

Los valores que se muestran corresponden a los instantes en que se realizan conmutaciones de cargas y de motor.

Primeramente, mostraremos los resultados obtenidos cuando la primera conmutación que se produce es desde el motor de referencia al motor de menor potencia. Posteriormente, se mostrarán los resultados cuando el orden de esta conmutación es a la inversa, es decir, cuando la primera conmutación que se produce es desde el motor de menor potencia nominal al motor de referencia.

Dichos resultados los mostramos en la *Tabla 25* y en la *Tabla 26*.

Los resultados obtenidos cuando la primera conmutación es del motor de referencia al motor de menor potencia son los siguientes:

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 22,44 | -16,98 | 1.501 | 1.439 | 14,74 | -15,6 | 0,48 |
| 160 | 3,32 | -2,66 | | | 1,62 | -3,3 | 0,37 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 22,06 | -17,02 | 1.498 | 1.453 | 12,86 | -12,07 | 0,49 |
| 200 | 4,25 | -3,38 | | | 2,25 | -3,91 | 0,29 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 22,48 | -17,01 | 1.501 | 1.439 | 14,91 | -16,17 | 0,47 |
| 250 | 5,19 | -4,18 | | | 2,62 | -5,13 | 0,39 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 22,50 | -17,05 | 1.501 | 1.439 | 14,91 | -16,38 | 0,50 |
| 315 | 6,77 | -5,44 | | | 3,81 | -6,90 | 0,34 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 22,15 | -17,01 | 1.498 | 1.452 | 12,94 | -12,76 | 0,50 |
| 355 | 7,54 | -6,00 | | | 4,67 | -6,93 | 0,36 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 22,51 | -17,09 | 1.501 | 1.439 | 14,95 | -16,62 | 0,50 |
| 400 | 8,88 | -7,16 | | | 5,27 | -9,31 | 0,35 |

Tabla 25 Resultados numéricos de la simulación con primera conmutación motor de 800kW -> motor de menor potencia

En cambio, cuando la primera conmutación que se realiza es desde el motor de menor potencia al motor de referencia, los resultados numéricos son los siguientes:

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 17,61 | -14,07 | 1.517 | 1.408 | 17,73 | -16,34 | 0,47 |
| 160 | 3,46 | -4,09 | | | 2,94 | -1,78 | 0,20 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 17,61 | -14,07 | 1.514 | 1.414 | 17,30 | -16,39 | 0,47 |
| 200 | 4,57 | -5,29 | | | 4,07 | -2,41 | 0,21 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 17,61 | -14,07 | 1.513 | 1.415 | 17,25 | -16,39 | 0,75 |
| 250 | 5,39 | -6,37 | | | 4,67 | -2,65 | 0,24 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 17,61 | -14,07 | 1.510 | 1.421 | 16,72 | -16,43 | 0,43 |
| 315 | 6,92 | -8,21 | | | 6,02 | -3,14 | 0,35 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 17,61 | -14,07 | 1.508 | 1.426 | 16,26 | -16,47 | 0,43 |
| 355 | 8,02 | -9,32 | | | 7,48 | -4,02 | 0,48 |

| P_N [kW] | I_{max} [kA] | I_{min} [kA] | n_{max} [rpm] | n_{min} [rpm] | T_{max} [kNm] | T_{min} [kNm] | t_{ar} [s] |
|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 800 | 17,61 | -14,07 | 1.508 | 1.425 | 16,33 | -16,45 | 0,43 |
| 400 | 8,95 | -10,67 | | | 7,77 | -3,84 | 0,31 |

Tabla 26 Resultados numéricos de la simulación con primera conmutación motor de menor potencia -> motor de 800kW

3.4. Programación en ZelioSoft2

En el presente apartado se procederá a exponer primeramente cuales han sido los cálculos que se han llevado a cabo para obtener los distintos valores que mostramos en la *Tabla 5 Valores de conmutación* de la memoria descriptiva, así como explicar cada uno de los elementos utilizados en la programación.

3.4.1. Cálculo del Valor de la Variable de Referencia

Para obtener los distintos valores de la variable de referencia, primeramente, debemos conseguir la relación T/V. Esta relación se muestra en la Figura 60.

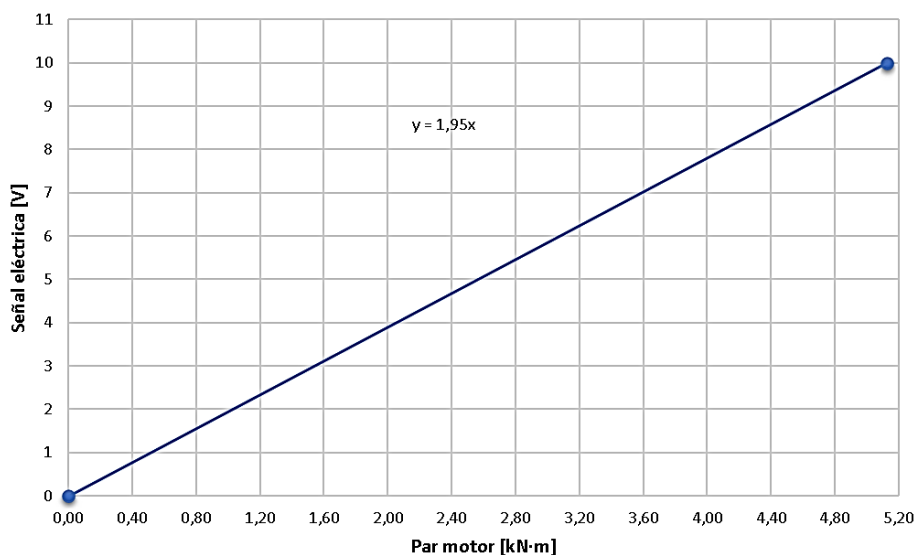


Figura 60 Relación T/V

Tal y como vemos en la anterior imagen, tenemos:

$$I_n = 1,95 \cdot T \quad (30)$$

Siendo:

I_n Señal eléctrica en la entrada IB procedente del sensor de par [V].

T Par motor desarrollado [kN·m].

Como sabemos cuál es la carga mecánica en kW en cada uno de los casos, visto en la *Tabla 2 Cargas consideradas*, y su respectivas velocidades angulares, podemos obtener el par motor desarrollado en cada caso de acuerdo con la expresión (5). Una vez que sabemos el par motor de cada caso, aplicamos la expresión (30) para obtener la señal de entrada en voltios. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el módulo que utilizamos en la programación trabaja con 8 bits, lo cual se traduce en 256 combinaciones posibles. De estas 256 combinaciones, la combinación nº 0 (todo 0) corresponde a una entrada igual a 0V y la combinación número nº 255 (todo 1) corresponde a una entrada igual a 10V. Por lo tanto, los valores comprendidos entre 0V y 10V se corresponden con combinaciones comprendidas entre la nº0 y nº255. Además, recordamos que se decide pasar del motor de 800 kW al motor menor cuando se detecta que la carga que se tiene que mover es la menor de la combinación. Por tanto, teniendo en cuenta todo lo indicado en el anterior párrafo, se obtienen los siguientes valores de la señal eléctrica de entrada para cada una de las posibles cargas y su correspondiente número de combinación para el programa Zelio:

| Carga [kW] | T [kN·m] | Señal [V] | Nº comb. |
|------------|----------|-----------|----------|
| 375 | 2,40 | 4,69 | 47 |
| 333 | 2,13 | 4,16 | 60 |
| 295 | 1,89 | 3,69 | 75 |
| 234 | 1,50 | 2,93 | 94 |
| 188 | 1,20 | 2,34 | 106 |
| 150 | 0,96 | 1,87 | 120 |

Tabla 27 Valores de la señal eléctrica de entrada y nº de combinación para la conmutación del motor mayor al menor

Para el caso en que la conmutación se debe de realizar en sentido inverso, es decir, del motor menor al motor de mayor potencia, se decide que ésta se realice cuando la carga que se deba de mover sea igual a la nominal del motor menor. De esta forma se consigue que siempre que la carga sea superior a la nominal del motor menor éste se desconecte y pase a actuar el motor mayor, protegiendo así al pequeño y evitando que se queme.

Por lo tanto, aplicando el mismo procedimiento que en el anterior caso, obtenemos los valores que mostramos en la *Tabla 28*.

| Carga [kW] | T [kN·m] | Señal [V] | Nº comb. |
|------------|----------|-----------|----------|
| 400 | 2,56 | 5,00 | 51 |
| 355 | 2,28 | 4,44 | 63 |
| 315 | 2,02 | 3,94 | 80 |
| 250 | 1,60 | 3,12 | 100 |
| 200 | 1,28 | 2,50 | 113 |
| 160 | 1,03 | 2,00 | 127 |

Tabla 28 Valores de la señal eléctrica de entrada y nº de combinación para la conmutación del motor menor al mayor




Uniendo los resultados de las dos últimas tablas y atendiendo a la explicación anterior, obtenemos la *Tabla 5* mostrada en el apartado 2.8.9.2 *Valor de la Variable de Referencia* de la memoria descriptiva.

3.4.2. Elementos del Circuito Lógico

Al observar el circuito lógico presentado en la *Figura 48 Circuito lógico* vemos que este está formado por un total de 3 entradas, dos salidas, un trigger, unas báscula RS, puertas lógicas AND, OR y NOT, 3 relojes y un contador. A continuación, definiremos cada uno de estos elementos y su aplicación.

3.4.2.1. Entradas

Como ya hemos comentado, contamos con un total de 3 entradas, las cuales son las siguientes:


- **MARCHA.** Se trata de un botón pulsador. Al pulsarlo, se aportará una señal impulso a partir de la cual el circuito arranca. Es la entrada que provoca el inicio de la ejecución y se representa con el siguiente símbolo .
- **PARO.** Se trata de un interruptor N.A. el cual cuando se cierra provoca el reset de todas las variables y de todos los elementos, lo que conlleva a que el programa se detenga independientemente de la acción que este llevando a cabo en ese momento. La entrada PARO se representa con el símbolo .
- **CARGA.** Se trata de una entrada analógica la cual puede tomar valores entre 0V y 10V. Esta entrada será la señal que nos proporcionara el sensor instalado y a partir de la cual sabremos cual es la carga que se conecta. Esta tercera entrada se representa por medio del símbolo .

3.4.2.2. Salidas

En cuanto a las salidas, vemos que únicamente precisamos de dos, las cuales son:

- **M+.** Esta salida hace referencia al motor de mayor de potencia, es decir, al motor de 800 kW. Por lo tanto, cuando esta salida se activa, significa que se conecta el motor de 800 kW.

- **M** -. Esta segunda salida hace referencia al otro motor, es decir, al motor de menor potencia que se conecta en el mismo eje mecánico. Por lo tanto, esta salida representa a los motores de potencias comprendidas entre 160 kW y 400 kW estudiados en el presente TFG y cuando esta se activa significa que se conecta el motor de menor potencia mecánica


Ambas salidas se representan por medio del símbolo .

3.4.2.3. Trigger

Como ya hemos comentado anteriormente, en función del valor que nos aporte el sensor, se conmutará de un motor a otro. Sin embargo, es posible que la señal que nos proporcione el sensor sufra pequeñas variaciones. Por ejemplo, supongamos el caso que deseamos que si la señal aportada por el sensor es inferior o igual a 5V se conecte el motor de menor potencia y si dicha señal es superior a 5V pase a conectarse el motor mayor. Si la señal que nos aporta el sensor es justamente de 5V, es posible que en algunos instantes este valor se incremente unos pocos mV por cualquier motivo, pero sin cambiar de carga, lo que comportaría la conmutación de motores en el momento erróneo. Además, la señal podría estar oscilando continuamente por encima y por debajo de 5V, lo que comportaría conmutaciones incontroladas entre los motores. Para evitar este problema y garantizar que cuando se conmuta de motor se hace realmente porque se ha cambiado de carga y no por una lectura falsa, se decide aplicar una histéresis por medio del elemento Trigger.


El Trigger cuenta con un total de 4 entradas. Una de ellas es la de validación, la cual nos indicará si el programa está en funcionamiento o si se ha dado a paro. Otra entrada es donde se conectará la señal que se quiere comparar con otros valores. Por último, las últimas dos entradas son la consigna de marcha a paro y la consigna de paro a marcha, donde se fijarán los valores con los que se quiere comparar la señal de entrada.

En cuanto a su funcionamiento, este elemento cambia el estado de su salida si el valor a comparar es inferior a un valor mínimo o si el valor de entrada es superior a un valor máximo. Si la entrada está comprendida entre los dos valores, el estado de salida no cambia. Cada una de las consignas, consigna de marcha a paro (la salida pasa de 1 a 0) y consigna de paro a marcha (la salida pasa de 0 a 1), pueden ser tanto el valor mínimo como el valor máximo. Si la entrada *Validación función* está en estado inactivo, la salida permanecerá inactiva. La salida no cambia de estado si la entrada de *Validación función* pasa de estado Activo a estado Inactivo.



El Trigger se representa por medio del símbolo .


3.4.2.4. Báscula RS

Este elemento tiene dos entradas: SET (donde se conectará la entrada MARCHA) y RESET (donde se conectará la entrada PARO). Cuando se activa la entrada SET, la salida se activa y permanecerá así, aunque se desactive la entrada. En cambio, si se activa la entrada RESET, se desactiva la entrada. En nuestro caso, utilizamos este elemento para cuando se active la entrada MARCHA y PARO. De esta forma, cuando se pulse MARCHA, la báscula RS mantendrá la salida activa y cuando se presione PARO, se desactivará la salida, anulando a su vez toda acción del circuito hasta que se vuelva a pulsar MARCHA. En nuestro caso, el RESET será prioritario respecto al SET, lo cual significa que, si se mantiene pulsado MARCHA y PARO a la vez, PARO tendrá la prioridad y el circuito se mantendrá en reposo hasta que se quite la acción del PARO y se active MARCHA.

La báscula RS se representa por medio del símbolo .


3.4.2.5. Puertas Lógicas

En el circuito lógico se utiliza de forma reiterativa el uso de las puertas lógicas AND y OR. En cuando a las puertas AND, estas activan su salida cuando todas sus entradas se encuentran activas. En cambio, para las puertas lógicas OR, se activa su salida si alguna de sus entradas está activa. Las puertas lógicas AND y OR se representan con los símbolos  y .

Además de estas dos puertas lógicas, también se utiliza varias veces la puerta lógica NOT, la cual invierte a su salida la señal de su entrada. La puerta NOT se representa por medio del símbolo .


3.4.2.6. Temporizadores

A la hora de realizar las conmutaciones de motores, se producen transitorios. Estos transitorios pueden provocar que se conmuten los motores en los momentos erróneos de forma incontrolada. Para evitar dicha conmutación errónea, se decide contar con una serie de temporizadores, los cuales funcionarán de acuerdo con la función B. Con esta función se mantendrá activa la salida durante x tiempo, aunque se desactive la entrada. Por lo tanto, al arrancar y cada vez que se realice una conmutación, se activará el temporizador correspondiente, el cual mantendrá el motor que se acaba de conectar funcionando durante el tiempo necesario para que este llegue a su régimen estacionario y así garantizar que los valores que lea el sensor y que provoquen conmutaciones correspondan con el régimen estacionario y no al transitorio.

Los temporizadores se representan con .

3.4.2.7. Contadores

Por último, encontramos los contadores. En la elaboración del circuito lógico se considera que el primer motor en arrancar será siempre el motor de 800 kW, independientemente de la carga que se conecte al inicio. Por lo tanto, se decide instalar un contador para garantizar que cuando se conecte el motor de menor potencia, el motor de 800 kW ya ha sido conectado como mínimo una vez.

Los contadores se representan con el símbolo .

3.5. Catálogo ABB

Technical data, 400 V 50 Hz

IE4 cast iron motors

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B

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

| Output kW | Motor type | Product code | Efficiency IEC 60034-30-1: 2014 | | | Power factor Cosφ | Current | | Torque | | Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ² | Weight kg | Sound pressure Level L _{PA} dB | | |
|----------------------|----------------------------|----------------|------------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | Speed r/min | Full load 100% | 3/4 load 75% | | 1/2 load 50% | I _N A | I ₂ /I _N | T _N Nm | | | | T ₁ /T _N | T ₂ /T _N |
| 1500 r/min = 4 poles | | | | | | | | | | | | | | | |
| 400 V 50 Hz | | | | | | | | | | | | | | | |
| CENELEC-design | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | M3BP 160MLA 4 | 3GBP162410---M | 1477 | 93.3 | 93.4 | 92.9 | 0.79 | 21.6 | 7.6 | 71.1 | 2.7 | 3.7 | 0.123 | 188 | 62 |
| 15 | M3BP 160MLB 4 | 3GBP162420---M | 1478 | 93.9 | 94.1 | 93.2 | 0.76 | 30.3 | 8.3 | 98.4 | 3.5 | 3.9 | 0.127 | 175 | 62 |
| 18.5 | M3BP 180MLA 4 | 3GBP182410---M | 1482 | 94.2 | 94.2 | 93.5 | 0.83 | 34.2 | 8.6 | 121 | 3.0 | 3.8 | 0.191 | 226 | 62 |
| 22 | M3BP 180MLB 4 | 3GBP182420---M | 1479 | 94.5 | 95.0 | 94.9 | 0.82 | 41 | 6.7 | 142 | 2.1 | 2.7 | 0.188 | 232 | 62 |
| 30 | M3BP 200MLA 4 | 3GBP202410---M | 1486 | 94.9 | 94.9 | 94.2 | 0.76 | 59.8 | 8.7 | 194 | 4.1 | 4.2 | 0.369 | 304 | 63 |
| 37 | M3BP 225SMA 4 | 3GBP222210---M | 1480 | 95.2 | 95.7 | 95.6 | 0.84 | 66.8 | 7.5 | 239 | 3.1 | 3.2 | 0.536 | 383 | 66 |
| 45 | M3BP 225SMB 4 | 3GBP222220---M | 1478 | 95.4 | 96.0 | 96.2 | 0.85 | 80.1 | 7.3 | 291 | 2.5 | 2.9 | 0.536 | 403 | 66 |
| 55 | M3BP 250SMA 4 | 3GBP252210---M | 1483 | 95.7 | 95.8 | 95.4 | 0.83 | 100 | 7.8 | 354 | 3.3 | 3.5 | 0.933 | 467 | 67 |
| 75 | M3BP 280SMC 4 | 3GBP282230---M | 1487 | 96.0 | 96.4 | 96.1 | 0.86 | 130 | 7.8 | 481 | 2.8 | 2.9 | 1.85 | 725 | 72 |
| 90 | M3BP 280MLA 4 | 3GBP282410---M | 1489 | 96.1 | 96.5 | 96.4 | 0.85 | 160 | 8.8 | 577 | 3.4 | 3.2 | 2.3 | 840 | 72 |
| 110 | M3BP 315SMC 4 | 3GBP312230---M | 1491 | 96.3 | 96.5 | 96.1 | 0.85 | 194 | 7.8 | 704 | 2.4 | 3.1 | 2.9 | 1000 | 68 |
| 132 | M3BP 315SMD 4 | 3GBP312240---M | 1490 | 96.4 | 96.6 | 96.2 | 0.85 | 234 | 7.9 | 846 | 2.6 | 3.2 | 3.2 | 1065 | 68 |
| 160 | M3BP 315MLB 4 | 3GBP312420---M | 1490 | 96.6 | 96.8 | 96.4 | 0.87 | 278 | 7.9 | 1026 | 2.7 | 3.0 | 3.9 | 1220 | 68 |
| 200 | M3BP 315LKB 4 | 3GBP312820---M | 1490 | 96.7 | 96.9 | 96.8 | 0.87 | 346 | 7.6 | 1282 | 2.5 | 2.9 | 5 | 1480 | 74 |
| 200 | M3BP 355SMA 4 | 3GBP352210---M | 1491 | 96.7 | 96.8 | 96.4 | 0.87 | 345 | 7.3 | 1282 | 2.1 | 2.7 | 5.9 | 1610 | 74 |
| 250 | M3BP 315LKC 4 | 3GBP312830---M | 1490 | 96.7 | 96.9 | 96.8 | 0.87 | 432 | 7.8 | 1601 | 2.3 | 3.0 | 5.5 | 1600 | 74 |
| 250 | M3BP 355SMB 4 | 3GBP352220---M | 1491 | 96.7 | 96.8 | 96.5 | 0.87 | 433 | 7.8 | 1601 | 2.5 | 2.9 | 6.9 | 1780 | 74 |
| 315 | M3BP 355SMC 4 | 3GBP352230---M | 1490 | 96.7 | 96.8 | 96.5 | 0.86 | 554 | 7.4 | 2017 | 2.8 | 2.9 | 7.2 | 1820 | 74 |
| 355 | M3BP 355MLA 4 | 3GBP352410---M | 1491 | 96.7 | 96.9 | 96.5 | 0.87 | 616 | 7.9 | 2274 | 2.7 | 2.9 | 8.4 | 2140 | 78 |
| 400 | M3BP 355MLB 4 | 3GBP352420---M | 1490 | 96.7 | 96.7 | 96.3 | 0.85 | 700 | 6.8 | 2563 | 2.1 | 2.8 | 8.4 | 2140 | 78 |
| 450 | M3BP 355MLC 4 | 3GBP352430---M | 1489 | 96.7 | 96.7 | 96.5 | 0.86 | 779 | 6.8 | 2886 | 2.4 | 2.8 | 8.4 | 2140 | 78 |
| 500 | M3BP 355LKA 4 | 3GBP352810---M | 1490 | 96.7 | 96.7 | 96.1 | 0.86 | 865 | 6.8 | 3204 | 2.0 | 3.0 | 10 | 2500 | 78 |
| 560 | ²⁾ M3BP 400LA 4 | 3GBP402510---M | 1491 | 96.7 | 96.7 | 96.3 | 0.85 | 982 | 7.4 | 3586 | 2.4 | 2.8 | 15 | 3200 | 78 |
| 630 | M3BP 400LB 4 | 3GBP402520---M | 1491 | 96.7 | 96.7 | 96.2 | 0.86 | 1091 | 7.6 | 4034 | 2.2 | 2.9 | 16 | 3300 | 78 |
| 710 | ²⁾ M3BP 400LC 4 | 3GBP402530---M | 1491 | 96.7 | 96.7 | 96.2 | 0.84 | 1227 | 7.6 | 4547 | 2.4 | 3.0 | 17 | 3300 | 78 |
| 800 | M3BP 450LA 4 | 3GBP452510---M | 1491 | 96.7 | 96.7 | 96.2 | 0.86 | 1388 | 7.0 | 5121 | 1.3 | 2.8 | 23 | 4050 | 85 |
| 900 | M3BP 450LB 4 | 3GBP452520---M | 1491 | 96.7 | 96.5 | 96.0 | 0.85 | 1575 | 7.0 | 5761 | 1.3 | 2.8 | 25 | 4050 | 85 |
| 1000 | ²⁾ M3BP 450LC 4 | 3GBP452530---M | 1491 | 96.7 | 96.7 | 96.1 | 0.86 | 1724 | 6.8 | 6404 | 1.3 | 2.7 | 30 | 4350 | 85 |

¹⁾ Unidirectional fan construction as standard. Direction of rotation must be stated when ordering, see variant codes 044 and 045.²⁾ Temperature rise class F

| Output kW | Motor type | Product code | Speed r/min | Efficiency IEC 60034-30-1: 2014 | | | Power factor Cosφ | Current | | Torque | | Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ² | Weight kg | Sound pressure Level L _{PA} dB | |
|----------------------|---------------|----------------|----------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|
| | | | | Full load 100% | 3/4 load 75% | 1/2 load 50% | | I _N A | I ₂ /I _N | T _N Nm | T ₁ /T _N | | | | T ₂ /T _N |
| 1500 r/min = 4 poles | | | | | | | | | | | | | | | |
| 400 V 50 Hz | | | | | | | | | | | | | | | |
| High-output design | | | | | | | | | | | | | | | |
| 110 | M3BP 280MLB 4 | 3GBP282420---M | 1489 | 96.3 | 96.2 | 95.8 | 0.82 | 203 | 9.1 | 705 | 3.7 | 3.5 | 2.5 | 890 | 75 |
| 132 | M3BP 280MLC 4 | 3GBP282430---M | 1489 | 96.4 | 95.9 | 95.6 | 0.80 | 247 | 9.0 | 846 | 3.8 | 3.5 | 2.5 | 890 | 75 |

3.6. Tarifas ABB

Motores de fundición de hierro para la industria de procesos IE4 (eficiencia superpremium)

1 velocidad IP55 IC 411

| Potencia kw | Tipo | Código de producto | B3 | B5 |
|-----------------------------|------|------------------------|---------|---------|
| 3000 r/min = 2 polos | | Diseño básico | | |
| 11 | M3BP | 160 MLA 3GBP161410---M | 2.277 | 2.467 |
| 15 | M3BP | 160 MLB 3GBP161420---M | 2.973 | 3.205 |
| 18,5 | M3BP | 160 MLC 3GBP161430---M | 3.563 | 3.795 |
| 22 | M3BP | 180 MLA 3GBP181410---M | 4.027 | 4.301 |
| 30 | M3BP | 200 MLA 3GBP201410---M | 5.039 | 5.398 |
| 37 | M3BP | 200 MLB 3GBP201420---M | 6.600 | 6.958 |
| 45 | M3BP | 225 SMA 3GBP221210---M | 7.907 | 8.392 |
| 55 | M3BP | 250 SMA 3GBP251210---M | 9.636 | 10.142 |
| 75 | M3BP | 280 SMB 3GBP281220---M | 11.279 | 11.956 |
| 90 | M3BP | 280 SMC 3GBP281230---M | 13.275 | 13.934 |
| 110 | M3BP | 315 SMB 3GBP311220---M | 16.162 | 17.320 |
| 132 | M3BP | 315 SMC 3GBP311230---M | 19.601 | 20.670 |
| 160 | M3BP | 315 MLA 3GBP311410---M | 23.699 | 24.768 |
| 200 | M3BP | 315 MLB 3GBP311420---M | 29.579 | 30.648 |
| 200 | M3BP | 355 SMA 3GBP351210---M | 29.579 | 31.361 |
| 250 | M3BP | 315 LKB 3GBP311820---M | 37.419 | 38.488 |
| 250 | M3BP | 355 SMB 3GBP351220---M | 37.419 | 39.201 |
| 315 | M3BP | 355 SMC 3GBP351230---M | 46.863 | 49.002 |
| 355 | M3BP | 355 MLA 3GBP351410---M | 52.743 | 54.704 |
| 400 | M3BP | 355 MLB 3GBP351420---M | 59.515 | 61.653 |
| 450 | M3BP | 355 MLC 3GBP351430---M | 66.820 | 69.493 |
| 500 | M3BP | 355 LKA 3GBP351810---M | 74.126 | 76.977 |
| 560 ⁽¹⁾ | M3BP | 400 LA 3GBP401510---M | 83.035 | 86.243 |
| 630 ⁽²⁾ | M3BP | 400 LB 3GBP401520---M | 93.548 | 97.112 |
| 710 ⁽³⁾ | M3BP | 400 LC 3GBP401530---M | 105.487 | 109.407 |
| 800 ^(1,3) | M3BP | 450 LA 3GBP451510---M | 118.851 | 123.306 |
| 900 ^(1,3) | M3BP | 450 LB 3GBP451520---M | 133.641 | 138.630 |
| 1000 | M3BP | 450 LC 3GBP451530---M | 148.430 | 154.132 |

| 3000 r/min = 2 polos | | Diseño alta potencia | | |
|-----------------------------|------|-----------------------------|--------|--------|
| 110 | M3BP | 280 SMD 3GBP281240---M | 15.271 | 16.429 |
| 132 | M3BP | 280 MLA 3GBP281410---M | 18.531 | 19.601 |
| 160 | M3BP | 280 MLB 3GBP281420---M | 21.917 | 22.986 |

| 1000 r/min = 6 polos | | Diseño básico | | |
|-----------------------------|------|------------------------|---------|---------|
| 7,5 | M3BP | 160 MLA 3GBP163410---M | 2.467 | 2.741 |
| 11 | M3BP | 160 MLB 3GBP163420---M | 3.374 | 3.563 |
| 15 | M3BP | 180 MLA 3GBP183410---M | 4.217 | 4.491 |
| 18,5 | M3BP | 200 MLA 3GBP203410---M | 4.955 | 5.314 |
| 22 | M3BP | 200 MLB 3GBP203420---M | 5.925 | 6.241 |
| 30 | M3BP | 225 SMA 3GBP223210---M | 8.034 | 8.476 |
| 37 | M3BP | 250 SMA 3GBP253210---M | 9.636 | 10.142 |
| 45 | M3BP | 280 SMB 3GBP283220---M | 10.495 | 11.155 |
| 55 | M3BP | 280 SMC 3GBP283230---M | 12.509 | 13.168 |
| 75 | M3BP | 315 SMC 3GBP313230---M | 16.073 | 17.231 |
| 90 | M3BP | 315 SMD 3GBP313240---M | 19.066 | 20.135 |
| 110 | M3BP | 315 MLB 3GBP313420---M | 23.164 | 24.233 |
| 132 | M3BP | 315 LKA 3GBP313810---M | 26.906 | 27.975 |
| 160 | M3BP | 315 LKC 3GBP313830---M | 32.965 | 34.390 |
| 160 | M3BP | 355 SMB 3GBP353220---M | 32.965 | 35.103 |
| 200 | M3BP | 355 SMC 3GBP353230---M | 40.270 | 42.587 |
| 250 | M3BP | 355 MLB 3GBP353420---M | 52.031 | 53.991 |
| 315 | M3BP | 355 LKA 3GBP353810---M | 64.326 | 66.286 |
| 355 | M3BP | 355 LKB 3GBP353820---M | 75.730 | 77.868 |
| 400 | M3BP | 400 LA 3GBP403510---M | 85.352 | 87.668 |
| 450 | M3BP | 400 LB 3GBP403520---M | 96.221 | 98.716 |
| 500 | M3BP | 400 LC 3GBP403530---M | 106.734 | 109.585 |
| 560 | M3BP | 400 LD 3GBP403540---M | 119.564 | 122.593 |
| 630 | M3BP | 450 LA 3GBP453510---M | 122.058 | 125.800 |
| 710 | M3BP | 450 LB 3GBP453520---M | 131.146 | 134.888 |
| 800 ⁽³⁾ | M3BP | 450 LC 3GBP453530---M | 145.579 | 148.786 |

| Potencia kw | Tipo | Código de producto | B3 | B5 |
|-----------------------------|------|------------------------|---------|---------|
| 1500 r/min = 4 polos | | Diseño básico | | |
| 11 | M3BP | 160 MLA 3GBP162410---M | 2.319 | 2.509 |
| 15 | M3BP | 160 MLB 3GBP162420---M | 3.015 | 3.226 |
| 18,5 | M3BP | 180 MLA 3GBP182410---M | 3.395 | 3.690 |
| 22 | M3BP | 180 MLB 3GBP182420---M | 4.112 | 4.386 |
| 30 | M3BP | 200 MLA 3GBP202410---M | 5.208 | 5.588 |
| 37 | M3BP | 225 SMA 3GBP222210---M | 6.347 | 6.747 |
| 45 | M3BP | 225 SMB 3GBP222220---M | 7.654 | 8.139 |
| 55 | M3BP | 250 SMA 3GBP252210---M | 9.278 | 9.763 |
| 75 | M3BP | 280 SMC 3GBP282230---M | 11.190 | 11.849 |
| 90 | M3BP | 280 MLA 3GBP282410---M | 12.883 | 13.560 |
| 110 | M3BP | 315 SMC 3GBP312230---M | 15.912 | 17.088 |
| 132 | M3BP | 315 SMD 3GBP312240---M | 18.888 | 19.957 |
| 160 | M3BP | 315 MLB 3GBP312420---M | 22.630 | 23.877 |
| 200 | M3BP | 315 LKB 3GBP312820---M | 27.975 | 29.045 |
| 200 | M3BP | 355 SMA 3GBP352210---M | 27.975 | 29.935 |
| 250 | M3BP | 315 LKC 3GBP312830---M | 35.103 | 36.172 |
| 250 | M3BP | 355 SMB 3GBP352220---M | 35.103 | 36.885 |
| 315 | M3BP | 355 SMC 3GBP352230---M | 44.012 | 45.972 |
| 355 | M3BP | 355 MLA 3GBP352410---M | 49.714 | 51.674 |
| 400 | M3BP | 355 MLB 3GBP352420---M | 56.129 | 58.089 |
| 450 | M3BP | 355 MLC 3GBP352430---M | 63.078 | 65.395 |
| 500 | M3BP | 355 LKA 3GBP352810---M | 70.206 | 72.700 |
| 560 ⁽¹⁾ | M3BP | 400 LA 3GBP402510---M | 78.581 | 81.432 |
| 630 | M3BP | 400 LB 3GBP402520---M | 88.381 | 91.588 |
| 710 ⁽¹⁾ | M3BP | 400 LC 3GBP402530---M | 99.607 | 103.170 |
| 800 | M3BP | 450 LA 3GBP452510---M | 112.080 | 116.356 |
| 900 | M3BP | 450 LB 3GBP452520---M | 126.335 | 130.790 |
| 1000 ⁽¹⁾ | M3BP | 450 LC 3GBP452530---M | 140.233 | 145.401 |

| 1500 r/min = 4 polos | | Diseño alta potencia | | |
|-----------------------------|------|-----------------------------|--------|--------|
| 110 | M3BP | 280 MLB 3GBP282420---M | 15.039 | 16.215 |
| 132 | M3BP | 280 MLC 3GBP282430---M | 17.819 | 18.888 |

Notas: (1) Motores calentamiento tipo F. (2) Clase IE1. (3) Ventilador unidireccional como estándar. La dirección de rotación se debe especificar en el pedido, códigos de variantes 044 y 045.
A partir del 1 de julio de 2021 los motores de 0,12 kW hasta inferiores a 0,75 kW deberán ser IE2 como mínimo y a partir de 0,75 kW hasta 1000 kW IE3 como mínimo.