



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
IGNACIO GARCÍA-ATANCE GARCÍA

# **Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica**

Autor: Ignacio García-Atance García  
Director: Jean-Claude Vannier

Madrid  
Julio 2015

Ignacio  
García-Atance  
García

**Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica**



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
I.C.A.I.

PROYECTOS FIN DE CARRERA  
CURSO: 4º grado ingeniería electromecánica

Ficha de proyecto fin de carrera  
(RELLENAR CON LETRAS DE IMPRENTA EN ORDENADOR)

Titulación y optatividad: grado ingeniería electromecánica- especialidad eléctrica  
Alumno 1º Apellido: García-Atance  
2º Apellido: García  
Nombre: Ignacio  
Teléfono de contacto: 634 504 934  
e-mail: igarcia.atance@gmail.com

Título del Proyecto Fin de Carrera: Modelado y respuesta de un motor trifásico alimentado por corriente monofásica.

Director (nombre y dos apellidos): Jean-Claude Vannier  
Teléfono de contacto: + 33 (0)1 69 85 15 01  
e-mail: [jean-claude.vannier@supelec.fr](mailto:jean-claude.vannier@supelec.fr)

Breve descripción del proyecto (5 o 6 líneas):

Los motores asíncronos monofásicos son comúnmente utilizados en la industria por su capacidad de ofrecer comportamientos satisfactorios con bajo coste.  
El proyecto consiste en modelizar y resolver el problema creado cuando se dispone de un motor trifásico pero la alimentación disponible es corriente alterna monofásica. Se hará una modelización de la máquina trifásica y su adaptación para resolver dicho problema y analizar su funcionamiento.

El documento final del proyecto NO puede ser CONFIDENCIAL. Datos o resultados confidenciales pueden omitirse o enmascarse sin que el proyecto pierda su calidad académica.

The final report of the Project can NOT BE CONFIDENTIAL. Data or results considered as confidential can be omitted or masked keeping the project its academic quality.

Aceptación del Director (firma y fecha): 25/05/2015





Proyecto realizado por el alumno/a:

Ignacio García-Atance

Fdo.: .....  .....

Fecha: 01/06/ 2015

*Ignacio García-Atance*

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter  
confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Jean Claude-Vannier

Fdo.: .....  .....

Fecha: 06/07/2015

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.: .....

Fecha: ...../...../.....



# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN DEL PROYECTO

MEMORIA

ANEXO A: CÓDIGO DE LOS PRINCIPALES  
MÓDULOS

ANEXO B: LISTADO DE ARCHIVOS  
MATLAB/SIMULINK



# **Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica**

**Autor: Ignacio García-Atance**

Director: Jean-Claude Vannier

## **RESUMEN DEL PROYECTO:**

El motor asíncrono es el motor eléctrico más utilizado en la industria. Es poco costoso y es robusto y su control en velocidad es fácil a través de la frecuencia de alimentación. Por ello se equipa con este tipo de motor a gran parte de las máquinas y útiles de trabajo en la mayoría de los puestos de trabajo en la industria como por ejemplo en las bobinadoras, cintas mecánicas, para el bombeo, compresores, máquinas de corte y fresado, máquinas de perforado, tornos etc.

Pero el problema de éste motor surge de la necesidad de alimentarlo en corriente trifásica para hacerlo funcionar. Ya que en industrias o locales en los que se ha podido hacer un cambio de contadores pasando de trifásica a monofásica, o en los que se quiere reciclar un motor asíncrono ya en posesión, es un problema al que se puede confrontar un ingeniero para evitar incurrir en gastos no necesarios al poder, como se va a desarrollar en el proyecto, utilizar los motores trifásicos alimentándolos con corriente monofásica únicamente.

De esta forma, el proyecto consiste en encontrar una solución para poder hacer funcionar la máquina trifásica a partir de una fuente monofásica; modelizarlo a través del software informático de simulación Matlab/Simulink y encontrar el valor de condensador óptimo para una aplicación dada de la máquina estudiada.

El proyecto se compone de dos estudios: estudio de la máquina asíncrona y estudio de la máquina asíncrona alimentada en monofásica.

Para hacer un estudio sistemático, cada uno de los casos que conforman el proyecto se ha dividido en tres partes principales:

1. Establecer las ecuaciones que toman parte en el funcionamiento de dicho sistema.
2. Modelizar dichas ecuaciones en el software Matlab
3. Simular los resultados

Y para concluir se cierra el proyecto con un estudio comparativo de los resultados de ambas simulaciones para la extracción de conclusiones y posibles mejoras.

Para hacer la alimentación monofásica se ha de utilizar una conexión concreta que ha de ser llevada a ecuaciones para resolver el sistema total de ecuaciones que compone el funcionamiento de la máquina asíncrona para su posterior modelizado con el software Matlab/Simulink y su simulación para la extracción de resultados.

El conjunto de ecuaciones estudiadas, modificadas y modelizadas son las ecuaciones que rigen el comportamiento dinámico de la máquina, ecuación fundamental de la dinámica, las ecuaciones eléctricas de la conexión y de la máquina, las ecuaciones de flujo y las ecuaciones de la herramienta matemática utilizada para manipular y aligerar la resolución del sistema, las ecuaciones de Park.

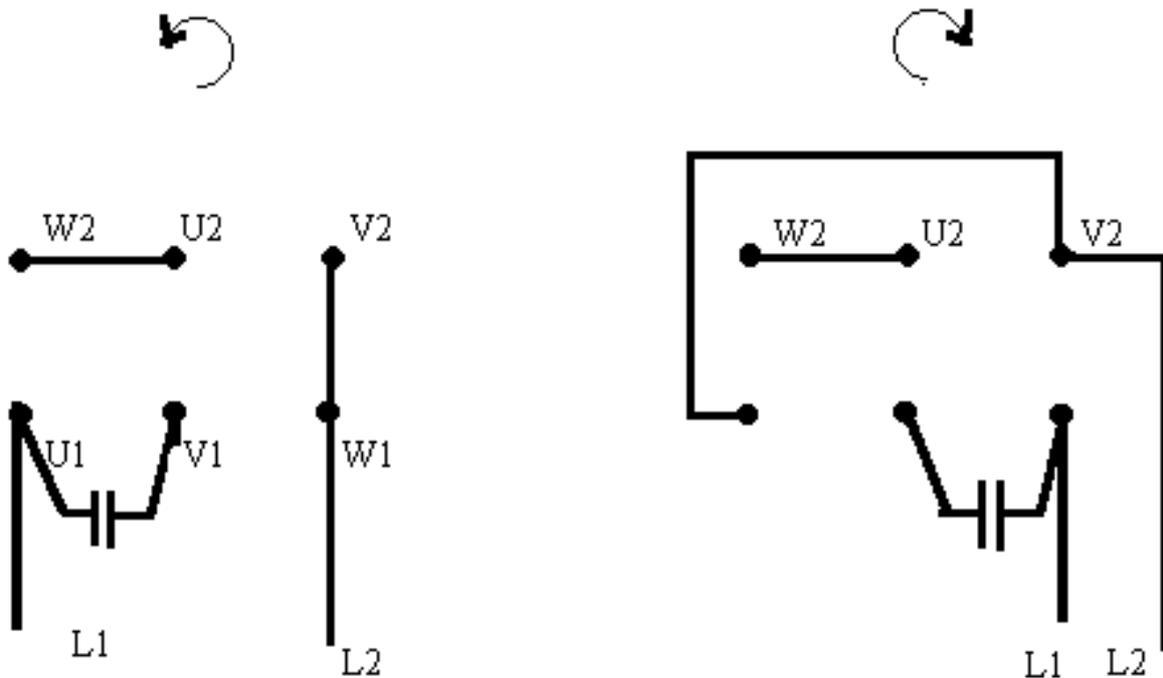
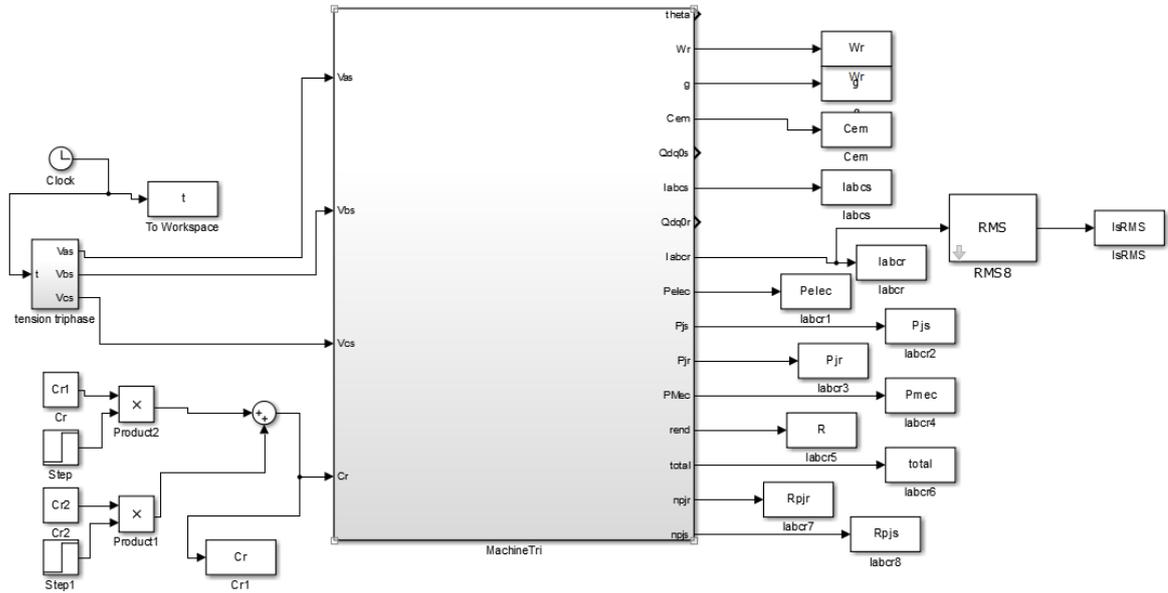


Ilustración 1 Esquema de conexión de la máquina para la alimentación monofásica

Posteriormente al estudio y concepción teórica se utilizará el software Matlab/simulink como ya hemos evocado anteriormente con el objeto de concebir un modelo apropiado y funcional de la máquina tanto trifásica asíncrona como con alimentación monofásica. Modelo con el cual a través de una correcta parametrización se puedan extraer gráficas de sus diferentes parámetros de funcionamiento temporal como velocidad, pérdidas Joule, rendimiento, corrientes, flujos, pares desarrollados etc.



**Ilustración 2 Bloque de la implementación de las ecuaciones de Park en Simulink**

Con los datos obtenidos de las simulaciones se procederá a hacer un estudio comparativo con el objetivo de extraer conclusiones sobre el método de funcionamiento propuesto, sus ventajas y sus limitaciones.



# **MODELLING OF A TRIPHASE**

## **ASYNCHRONOUS MACHINE SUPPLIED**

### **WITH A SINGLE-PHASE SOURCE**

**Author: Ignacio García-Atance**

Director: Jean-Claude Vannier

#### **ABSTRACT:**

The asynchronous machine is the electric machine most widely used in the industry. It is not expensive, and it is easily speed regulated by its source frequency. That is the reason why many machines and tools are equipped with these kind of motors in a wide range of working posts of many different industries. For example, tools like winding machines, conveyor belts, pumping machines, cutting machines, milling cutters, drills and lathes will use them.

The problem of this motor comes from the need of the triphase currency to make it work. There may be industries where there has been a change of the counters from triphase to single-phase counters, or where they just want to re-use a non-used existent machine that is already owned. It is a problem that any engineer may have to face in order not to incur in unnecessary expenses. With this project we will manage to use the triphase motors supplied with a single-phase source with reasonable performances.

The project will consist in finding the way to make the triphase machine work with a single-phase source, modelling it with the software Matlab/Simulink and to find the best value for the capacitor used for the studied machine.

The project will be composed by two parts: The study of the asynchronous machine and the study of the asynchronous triphase machine supplied by a single-phase source.

To make a systematic study of the problem, both parts will be divided in three mean points:

1. Establish the equations that take part in the proper functioning of the system.
2. Modelling of these equations in the Matlab software
3. Simulation of the results

To conclude, the project will end with a comparative study of the results of both simulations to be able to deduce conclusions and possible improvements.

To make the supply with the single-phase source a specific connexion is needed. This connexion will be also expressed in the electrical equations describing the system. This full equations system will describe the functioning of the machine and will be modelled with the software Simulink for the ulterior simulation and extraction of results.

The ensemble of equations that are studied, modified, and modelled that describes the functioning of the machine are the dynamic equations that rules the movement of the machine with the fundamental equation of the dynamics, the electric equations of the connexion and the machine, the flux equations, and the mathematic tool used to manipulate and lighten the resolution of the system, the Park transformation.

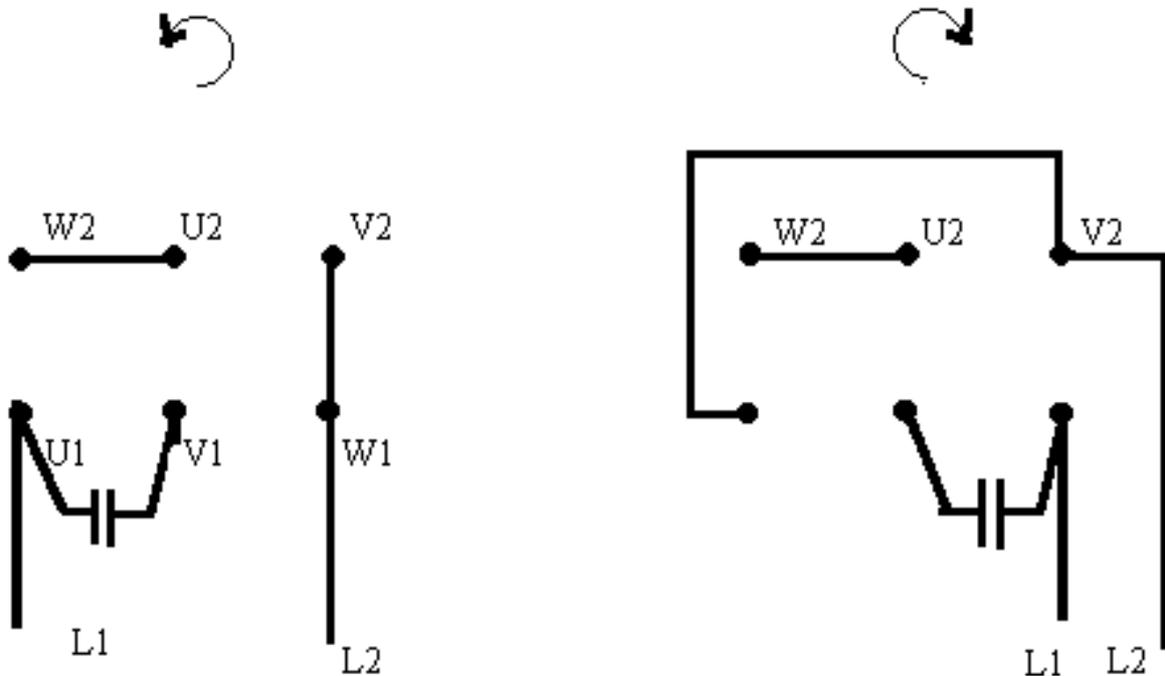


Figure 1 Diagram of the connection of the single-phase source to the asynchronous triphase machine

After the study and the theoretical conception of the system we will use the software Matlab/Simulink as we had already told. The objective is to conceive an appropriated and functional model of the two machines, the triphase asynchronous machine and the triphase asynchronous machine supplied with a single-phase source.

With this model and with a correct parameterisation of our studied machine we will be able to produce graphs of the different parameters of the functioning of the machine such as speed, Joule dissipation, performance, currencies, fluxes, couples etc.

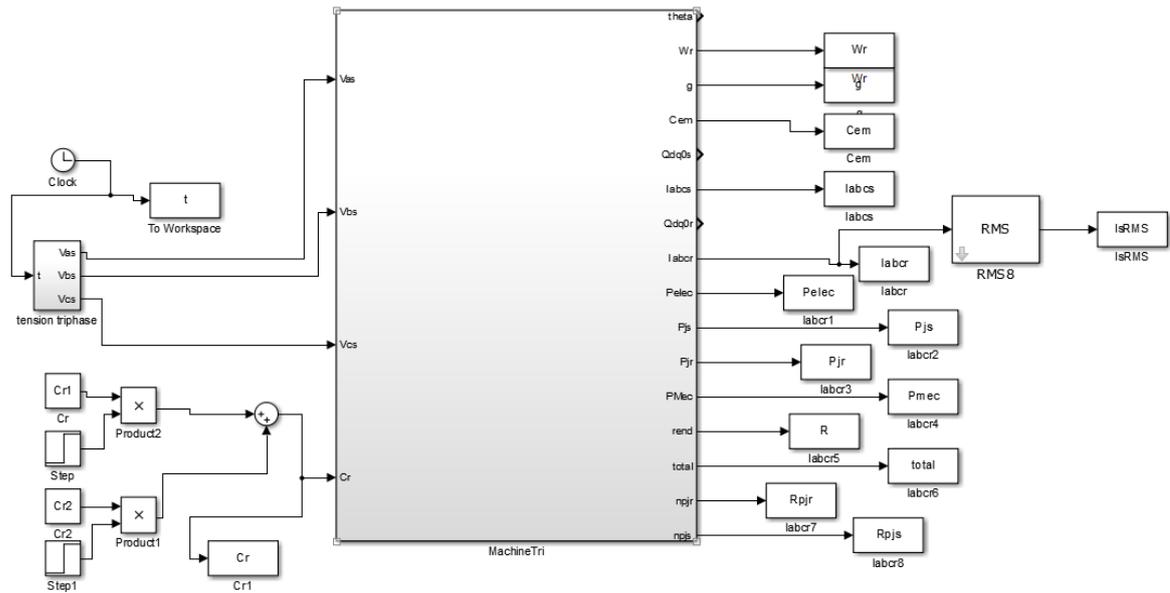


Figure 1 Simulink block of the modelling of the tri-mono machine with the Park equations

With the data obtained from the simulations we will proceed to a comparative study to deduce conclusions about this functioning method proposed, its advantages and its limitations.

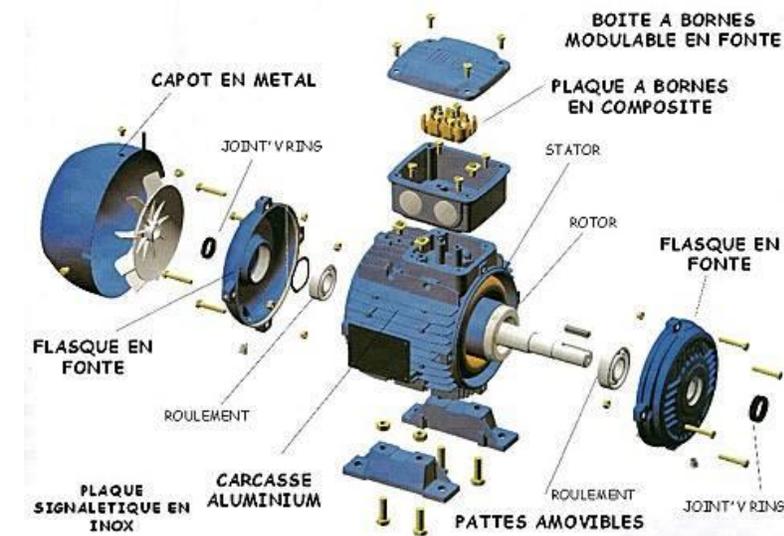


# MEMORIA



## Proyecto de Fin de Grado

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica



*Ilustración 1 Explosionado de la máquina asíncrona trifásica*

**Realizado por : Ignacio García-Atance**

**Dirigido por : Dr. Jean-Claude Vannier**

## Tabla de contenidos

<b>1. Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>1.1 Presentación del proyecto</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Tratamiento del problema</b> : .....	<b>5</b>
<b>2.1 Estudio del motor asíncrono trifásico</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 Presentación del motor asíncrono trifásico .....	5
2.1.2 Funcionamiento y puesta en ecuaciones : máquina trifásica .....	7
2.1.3 Adaptación de las ecuaciones a una alimentación monofásica: .....	11
<b>2.2 Modelización e implementación</b> : .....	<b>13</b>
2.2.1 Transformación de Park .....	14
2.2.2 Implementación de las ecuaciones de Park .....	17
2.2.3 Análisis y verificación de los resultados del modelo trifásico : .....	18
<b>2.3 Estudio del motor asíncrono trifásico-monofásico</b> .....	<b>28</b>
2.3.1 Implementación de la transformada de Park en monofásico .....	28
2.3.2 Implémentation et simulation du modèle monophasé. ....	29
2.3.3 Análisis de los resultados de la simulación : .....	30
2.3.4 Comparación de la alimentación trifásica y monofásica: .....	39
2.3.5 Desconexión de la capacidad : .....	43
<b>3 Conclusión</b> .....	<b>45</b>
<b>4 Referencias</b> .....	<b>46</b>
<b>5 Agradecimientos</b> .....	<b>47</b>

## Tabla de figuras

Ilustración 1 Explosionado de la máquina asíncrona trifásica .....	0
Ilustración 2 Esquema de bobinados de la máquina asíncrona trifásica .....	6
Ilustración 3 Esquema de cableado de la máquina asíncrona alimentada en monofásica .....	12
Ilustración 4 Bloque de implementación de la máquina trifásica en Simulink.....	13
Ilustración 5 Representación gráfica de las relaciones entre arrollamientos.....	15
Ilustración 6 Bloque de la implementación de las ecuaciones de Park en Simulink .....	17
Ilustración 7 Par electromagnético de la máquina trifásica .....	19
Ilustración 8 Esquema de par y modos de funcionamiento de la máquina trifásica .....	19
Ilustración 9 Deslizamiento de la máquina trifásica.....	20
Ilustración 10 Zoom sobre las velocidades de rotación en RP de la máquina trifásica.....	21
Ilustración 11 Corrientes estáticas de la máquina trifásica en carga y vacío.....	22
Ilustración 12 Zoom sobre el RP de las corrientes rotóricas de la máquina trifásica.....	23
Ilustración 13 Corrientes rotóricas de la máquina trifásica en carga y vacío .....	23
Ilustración 14 Potencia mecánica instantánea y en porcentaje .....	25
Ilustración 15 Pérdidas Joule en el estator de la máquina trifásica .....	26
Ilustración 16 Pérdidas Joule en el rotor de la máquina trifásica .....	27
Ilustración 17 Bloque Simulink creado de la máquina con alimentación monofásica .....	29
Ilustración 18 Par electromagnético de la máquina tri-mono para los 5 condensadores .....	30
Ilustración 19 Oscilaciones del par electromagnético de la máquina tri-mono para los 5 condensadores.....	31

Ilustración 20 Par electromagnético medio de la máquina tri-mono para los 5 condensadores.....	32
Ilustración 21 Velocidad de rotación de la máquina tri-mono para los 5 condensadores.....	33
Ilustración 22 Oscilaciones de la velocidad de rotación de la máquina tri-mono para los 5 condensadores.....	34
Ilustración 23 Oscilaciones de la Corriente estatórica $I_{as}$ de la máquina tri-mono para los 5 condensadores.....	35
Ilustración 24 Corriente estatórica $I_{cs}$ de la máquina tri-mono para los 5 condensadores .	35
Ilustración 25 Pérdidas Joule en el rotor de la máquina tri-mono.....	36
Ilustración 26 Rendimiento perdido en Joule estatóricas .....	37
Ilustración 27 Rendimiento de la máquina asíncrona alimentada en mono .....	38
Ilustración 28 Pares máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica .....	40
Ilustración 29 Ilustración 27 Pares medios de la máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica.....	41
Ilustración 30 Ilustración 27 Velocidades de la máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica .....	41
Ilustración 31 Ilustración 27 Rendimiento de la máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica .....	42
Ilustración 32 Rendimiento de la máquina asíncrona alimentada en mono con desconexión de capacidad .....	43

## 1. Introducción

### 1.1 Presentación del proyecto

El motor asíncrono es el motor eléctrico más utilizado en la industria. Es poco costoso y es robusto y su control en velocidad es fácil a través de la frecuencia de alimentación. Por ello se equipa con este tipo de motor a gran parte de las máquinas y útiles de trabajo en la mayoría de los puestos de trabajo en la industria como por ejemplo en las bobinadoras, cintas mecánicas, para el bombeo, compresores, máquinas de corte y fresado, máquinas de perforado, tornos etc.

Pero el problema de éste motor surge de la necesidad de alimentarlo en corriente trifásica para hacerlo funcionar. Ya que en industrias o locales en los que se ha podido hacer un cambio de contadores pasando de trifásica a monofásica, o en los que se quiere reciclar un motor asíncrono ya en posesión, es un problema al que se puede confrontar un ingeniero para evitar incurrir en gastos no necesarios al poder, como se va a desarrollar en el proyecto, utilizar los motores trifásicos alimentándolos con corriente monofásica únicamente.

Para ello se pueden adoptar diferentes soluciones tales como:

- Reemplazar el motor trifásico por uno monofásico: caro al tener que comprar un nuevo motor y más aún si el motor ha de tener algún tipo de característica particular para adaptarse a su entorno de trabajo o función.
- Instalar electrónica de potencia: podemos solucionar el problema gracias a un sistema de convertidores que es una solución buena pero también muy costosa.
- Instalar un condensador de desfase de una bobina: que representa la solución más simple y barata ya que se recicla el motor ya existente y es la que se va a desarrollar en el proyecto.

De esta forma, el proyecto consiste en encontrar una solución para poder hacer funcionar la máquina trifásica a partir de una fuente monofásica; modelizarlo a través del software informático de simulación Matlab/Simulink y encontrar el valor de condensador óptimo para una aplicación dada de la máquina estudiada.

## 2. Tratamiento del problema :

El proyecto se compone de dos estudios: estudio de la máquina asíncrona y estudio de la máquina asíncrona alimentada en monofásica.

Para hacer un estudio sistemático, cada uno de los casos que conforman el proyecto se ha dividido en tres partes principales:

1. Establecer las ecuaciones que toman parte en el funcionamiento de dicho sistema.
2. Modelizar dichas ecuaciones en el software Matlab
3. Simular los resultados

Y para concluir se cierra el proyecto con un estudio comparativo de los resultados de ambas simulaciones para la extracción de conclusiones.

### 2.1 Estudio del motor asíncrono trifásico

#### 2.1.1 Presentación del motor asíncrono trifásico

El motor asíncrono trifásico está compuesto por su estator (parte inductora) y el rotor (parte inducida).

El estator:

El estator se compone de  $3 \cdot p$  bobinas alimentadas por un sistema trifásico de frecuencia  $f$ . (Siendo  $p$  el número de pares de polos de la máquina). Estas  $3 \cdot p$  bobinas, bajo alimentación trifásica, crean un campo magnético giratorio con una pulsación llamada pulsación de sincronismo de  $\Omega_s$  que se reparte sinusoidalmente a lo largo del entrehierro de la máquina.

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f,$$

$p$  = número de pares de polos

$\Omega_s$  = velocidad angular en [rad/s]

El rotor :

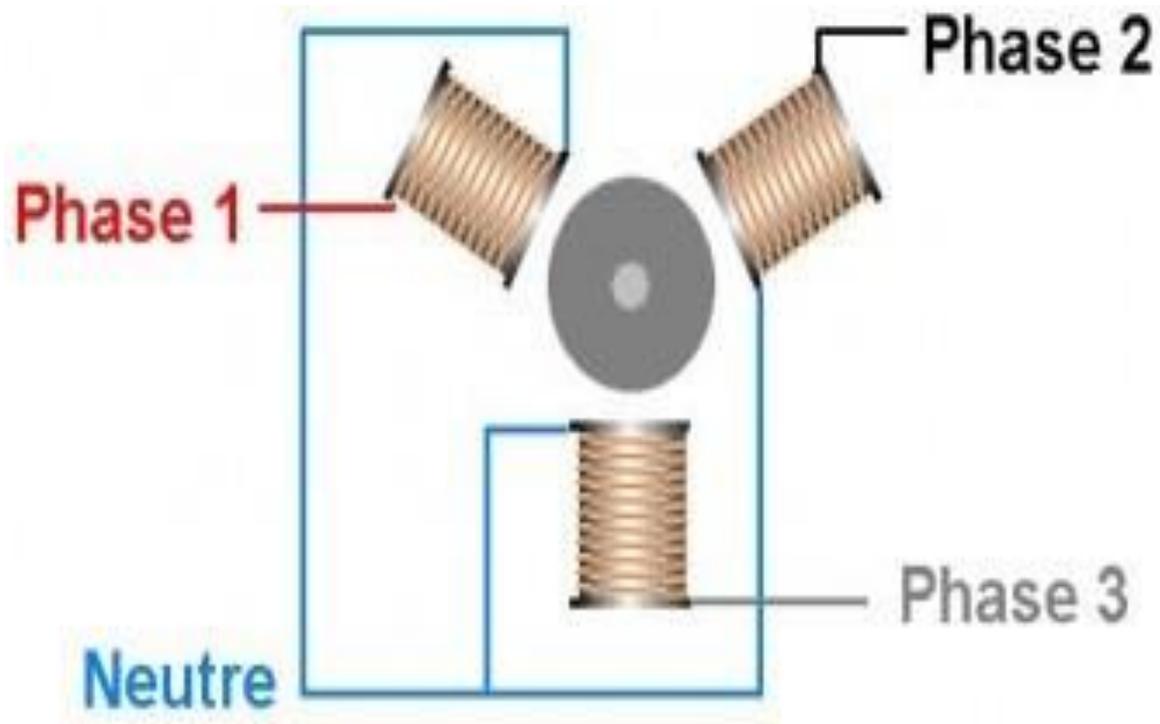
El rotor de la máquina asíncrona trifásica puede ser de “caja de ardilla” o bobinado según su construcción, sin poseer en ninguno de los casos ninguna conexión con el

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

estátor. De esta forma el rotor constituye un circuito eléctrico cerrado donde se van a crear corrientes inducidas que inducirán la rotación del rotor del motor y su puesta en marcha, girando éste siempre a una velocidad menos que la del motor síncrono.

Decimos que el motor se desliza con respecto al campo magnético giratorio creado por el estátor y hablamos del deslizamiento que va a depender de la carga.

Definimos el deslizamiento  $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$  (adimensional) (2)



*Ilustración 2 Esquema de bobinados de la máquina asíncrona trifásica*

## 2.1.2 Funcionamiento y puesta en ecuaciones : máquina trifásica

Los 3 bobinados del estátor están orientados a  $120^\circ$  los unos con respecto a los otros y son alimentados en corriente trifásica de tal manera que creen un campo magnético giratorio.

La velocidad de rotación de éste campo magnético se denomina velocidad de sincronismo cuyo valor es  $\Omega_s$  ( con una frecuencia de 50Hz para Europa).

Este campo giratorio estatórico es el que induce las corrientes rotóricas y la interacción entre ambas es la que hará girar el rotor a una pulsación ligeramente inferior a la correspondiente del campo giratorio estatórico y que dependerá inversamente de la carga acoplada al rotor.

De este modo, la modelización de la máquina asíncrona trifásica se hace a partir de sus ecuaciones eléctricas, sus ecuaciones magnéticas y sus ecuaciones mecánicas conjuntamente:

- Las ecuaciones eléctricas son las que determinan el funcionamiento de la máquina asíncrona se descomponen en dos niveles :
  - Estatóricas :

$$\mathbf{V_{as}} = \mathbf{R_{as}} \cdot \mathbf{I_{as}} + \left[ \frac{d\Phi_{as}}{dt} \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{V_{bs}} = \mathbf{R_{bs}} \cdot \mathbf{I_{bs}} + \left[ \frac{d\Phi_{bs}}{dt} \right] \quad (4)$$

$$\mathbf{V_{cs}} = \mathbf{R_{cs}} \cdot \mathbf{I_{cs}} + \left[ \frac{d\Phi_{cs}}{dt} \right] \quad (5)$$

Los valores  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$  et  $V_{cs}$  representan respectivamente las tensiones de los bobinados estatóricos a, b y c.y de mismo modo  $I_{as}$ ,  $I_{bs}$   $I_{cs}$ ,  $\Phi_{as}$ ,  $\Phi_{bs}$ ,  $\Phi_{cs}$  representan los valores de las corrientes y los flujos amgnéticos en los bobinados estatóricos a, b y c respectivamente.

- Rotóricas :

$$\mathbf{V_{ar}} = \mathbf{R_{ar}} \cdot \mathbf{I_{ar}} + \left[ \frac{d\Phi_{ar}}{dt} \right] \quad (6)$$

$$\mathbf{V_{bs}} = \mathbf{R_{br}} \cdot \mathbf{I_{br}} + \left[ \frac{d\Phi_{br}}{dt} \right] \quad (7)$$

$$\mathbf{V_{cr}} = \mathbf{R_{cr}} \cdot \mathbf{I_{cr}} + \left[ \frac{d\Phi_{cr}}{dt} \right] \quad (8)$$

Los valores  $V_{ar}$ ,  $V_{br}$  et  $V_{cr}$  representan respectivamente las tensiones de las fases rotóricas a, b y c y de la misma forma  $I_{as}$ ,  $I_{br}$ ,  $I_{cr}$ ,  $\Phi_{ar}$ ,  $\Phi_{br}$ ,  $\Phi_{cr}$  representan las corrientes y los flujos magnéticos de las fases rotóricas a,b y c respectivamente.

En nuestro caso, la máquina asíncrona es de caja por lo que el rotor está en corto circuito haciendo que las tensiones rotóricas  $V_{ar}$ ,  $V_{br}$  et  $V_{cr}$  sean nulas todo el tiempo.

- Las ecuaciones magnéticas representan y definen los flujos que reaccionan y se crean en la máquina y se pueden dividir también en dos niveles:

- Estatóricas (9) (10) (11) :

$$\Phi_{as} = L_{as} \cdot I_{as} + M_{abs} \cdot I_{bs} + M_{acs} \cdot I_{cs} + M_{rs} \cdot \cos(\theta) \cdot I_{ar} + M_{rs} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{br} + M_{rs} \cdot \cos\left(\theta + \frac{4\Pi}{3}\right) \cdot I_{cr}$$

$$\Phi_{bs} = L_{bs} \cdot I_{bs} + M_{bas} \cdot I_{as} + M_{bcs} \cdot I_{cs} + M_{rs} \cdot \cos(\theta) \cdot I_{br} + M_{rs} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{ar} + M_{rs} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{cr}$$

$$\Phi_{cs} = L_{cs} \cdot I_{cs} + M_{cas} \cdot I_{as} + M_{cbs} \cdot I_{bs} + M_{rs} \cdot \cos(\theta) \cdot I_{cr} + M_{rs} \cdot \cos\left(\theta - \frac{4\Pi}{3}\right) \cdot I_{ar} + M_{rs} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{br}$$

- Rotóricas (12) (13) (14):

$$\Phi_{ar} = L_{ar} \cdot I_{ar} + M_{abr} \cdot I_{br} + M_{acr} \cdot I_{cr} + M_{sr} \cdot \cos(\theta) \cdot I_{as} + M_{sr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{bs} + M_{sr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{4\Pi}{3}\right) \cdot I_{cs}$$

$$\Phi_{br} = L_{br} \cdot I_{br} + M_{bar} \cdot I_{ar} + M_{bcr} \cdot I_{cr} + M_{sr} \cdot \cos(\theta) \cdot I_{bs} + M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{as} + M_{sr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{cs}$$

$$\Phi_{cr} = L_{cr} \cdot I_{cr} + M_{car} \cdot I_{ar} + M_{cbr} \cdot I_{br} + M_{sr} \cdot \cos(\theta) \cdot I_{cs} + M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - \frac{4\Pi}{3}\right) \cdot I_{as} + M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \cdot I_{bs}$$

Estas ecuaciones de flujos pueden también expresarse de forma matricial como :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{abs} & M_{acs} & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ M_{bas} & L_{bs} & M_{bcs} & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cas} & M_{cbs} & L_{cs} & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) \\ M_{sr} \cos(-\theta) & M_{rs} \cos\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{rs} \cos\left(-\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ar} & M_{abr} & M_{acr} \\ M_{rs} \cos\left(-\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{rs} \cos(-\theta) & M_{rs} \cos\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{bar} & L_{br} & M_{bcr} \\ M_{rs} \cos\left(-\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{rs} \cos\left(-\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{rs} \cos(-\theta) & M_{car} & M_{cbr} & L_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$L_{as}$ ,  $L_{bs}$ ,  $L_{cs}$ ,  $L_{ar}$ ,  $L_{br}$ ,  $L_{cr}$  son respectivamente los valores de inductancias propias del estator y del rotor para cada fase a, b y c.

$M_{abs}$ ,  $M_{acs}$ ,  $M_{bas}$ ,  $M_{bcs}$ ,  $M_{cas}$ ,  $M_{cbs}$  son respectivamente los valores de inductancias mutuas entre las fases del estator.

$M_{abr}$ ,  $M_{acr}$ ,  $M_{bar}$ ,  $M_{bcr}$ ,  $M_{car}$ ,  $M_{cbr}$  son respectivamente los valores de inductancias mutuas entre las fases del rotor.

$M_{rs}$  et  $M_{sr}$  son las inductancias mutuas entre las fases del rotor y del estator.

$\theta$  es el ángulo de rotación, es decir, el ángulo de proyección de un flujo estatórico sobre otra fase rotórica o vicversa.

Cabe destacar llegados a este punto que a pesar de haber hecho la simplificación en nomenclatura de un modelo perfectamente equilibrado y simétrico para cada fase, la aplicación numérica se llevará a cabo de tal forma que se pueda dotar de valores diferentes de resistencia e impedancia para cada una de las fases, es decir, que no se harán las simplificaciones propias de un modelo perfectamente equilibrado como hipótesis de partida.

Remarcamos que la matriz puede escribirse de la forma siguiente:

$$L = \begin{bmatrix} L_{ms} & P(\theta) \\ P(-\theta) & L_{mr} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Siendo :

$$L_{ms} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{abs} & M_{acs} \\ M_{bas} & L_{bs} & M_{bcs} \\ M_{cas} & M_{cbs} & L_{cs} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$L_{ms}$  representa los valores de inductancias propias y mutuas del estátor.

$$L_{mr} = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{abr} & M_{acr} \\ M_{bar} & L_{br} & M_{bcr} \\ M_{car} & M_{cbr} & L_{cr} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$L_{mr}$  representa los valores de inductancias propias y mutuas del rotor.

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

- Puesta en ecuaciones de la parte mecánica:

La energía magnética de la máquina asíncrona puede calcularse a través de la siguiente expresión matemática:

$$W = \frac{1}{2} (\mathbf{I}_s^t \cdot \Phi_s + \mathbf{I}_r^t \cdot \Phi_r) \quad (19)$$

De esta forma podemos deducir el par electromagnético como la derivada parcial de la energía con respecto al ángulo mecánico de rotación:

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta} = 3 \cdot p \cdot \Phi_r^2 \cdot \frac{W_r}{R_r} \quad (20)$$

De donde podemos deducir a su vez para cada fase que el par electromecánico es:

$$C_{ema} = p \cdot \Phi a r^2 \cdot \frac{W_r}{R_{ar}} \quad (21)$$

$$C_{emb} = p \cdot \Phi b r^2 \cdot \frac{W_r}{R_{br}} \quad (22)$$

$$C_{emc} = p \cdot \Phi c r^2 \cdot \frac{W_r}{R_{cr}} \quad (23)$$

Siendo el par electromagnético total la suma de estos tres pares de cada fase :

$$C_{em} = C_{ema} + C_{emb} + C_{emc} \quad (24)$$

Y finalmente, la velocidad de rotación es calculada a partir de la ecuación fundamental de la dinámica como :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r \quad (25)$$

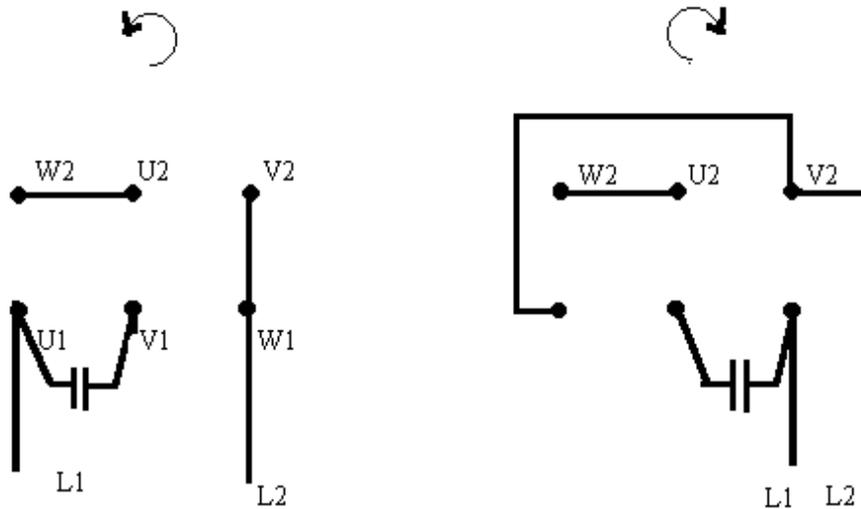
### 2.1.3 Adaptación de las ecuaciones a una alimentación monofásica:

Esta parte del proyecto consiste en manipular las ecuaciones ya expuestas de la máquina asíncrona trifásica para adaptarlas a la alimentación con tensión monofásica.

El primer paso consiste en introducir las nuevas ecuaciones eléctricas que responden a la conexión que vamos a utilizar para adaptar el sistema:

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Esquema del cableado y conexiones :



*Ilustración 3 Esquema de cableado de la máquina asíncrona alimentada en monofásica*

- 1- Conectamos dos bobinados en serie, por ejemplo el a y el b, y con los bornes libres alimentamos el conjunto en serie con la alimentación monofásica disponible E.
- 2- El bobinado restante c es conectado en serie con un condensador y a su vez se conecta este bloque serie con la alimentación monofásica disponible (el valor de la capacidad del condensador será evocado ulteriormente).

De esta forma lograremos crear un campo magnético desfasado del primero la mitad de un periodo y de esta forma, gracias a estos dos campos, la máquina puede arrancar.

- Ecuaciones resultantes de esta conexión :

- $E = V_{as} + V_{bs}$  (26)

- $E = V_{cap} + V_{cs}$  (27)

- $I_{cs} = C \frac{dV_{cap}}{dt}$  (28)

- $I_{as} = -I_{bs}$  (29)

## 2.2 Modelización e implementación :

En esta fase reagrupamos todas las ecuaciones antes evocadas para su simulación y resolución temporal.

Para ello, lo primero realizado ha sido la implementación del modelo trifásico para verificar su eficacia, velocidad de resolución y simulación y verificar que efectivamente están correctas.

Así tras el modelado de las ecuaciones literales y tras la creación de subsistemas en bloques Simulink el sistema ha quedado configurado de la manera mostrada a continuación:

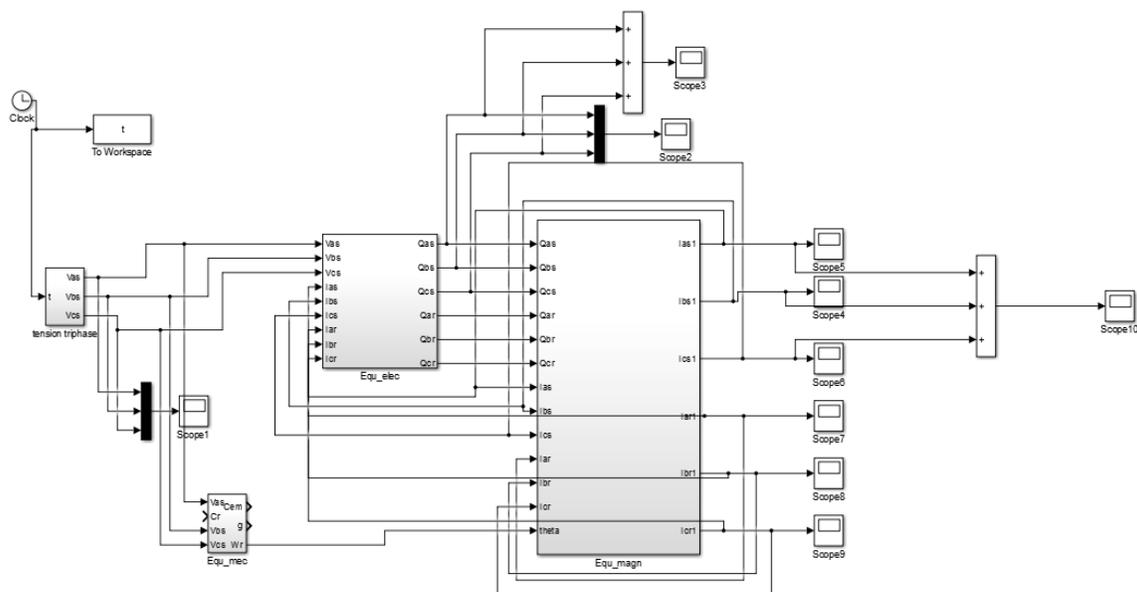


Ilustración 4 Bloque de implementación de la máquina trifásica en Simulink

Donde tras describir las ecuaciones en el software Simulink de Matlab hemos remarcado que la resolución de este sistema tan complejo convergía muy lentamente para ciertos valores y para otros divergía completamente.

Por ello después de múltiples intentos de implementación de las ecuaciones en diferentes versiones de las mismas por ejemplo a través de la integración o derivación de las variables etc. Hemos constatado que el sistema es simplemente demasiado pesado para ser manipulado como tal debido a su complejidad y hemos buscado un mecanismo para

transformarlo en uno más compacto y simple a resolver. Para ello nos hemos apoyado en la herramienta matemática de la transformada de Park que será desarrollada más adelante.

## 2.2.1 Transformación de Park

La transformación de Park es una herramienta matemática utilizada en la electrotecnia con el objetivo de modelizar un sistema trifásico como un modelo bifásico. Se trata de un cambio de variable como cambio de base. De esta forma se establecen los tres nuevos ejes tradicionalmente llamados d, q y 0 con los que se pueden expresar también las magnitudes de tensiones, corrientes y flujos.

Sean a, b y c los ejes de la base inicial del sistema trifásico y d, q y 0 el de la base transformada, a título ejemplificador de la transformación de las corrientes podría ser la matriz de cambio de base siguiente (aunque podría aplicarse sobre tensiones o flujos):

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Dando lugar a la matriz de cambio de base inversa :

$$\begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \end{bmatrix} \quad (31)$$

De esta forma, la transformada dq0 permite que el sistema trifásico equilibrado transformado se componga de dos variables continuas en lugar de tres variables alternativas, lo que simplifica considerablemente la resolución del sistema de ecuaciones.

Tras esto, una vez calculadas las magnitudes en la base dq0 con la resolución del sistema, se puede utilizar la transformación inversa para hayar los valores reales trifásicos correspondientes.

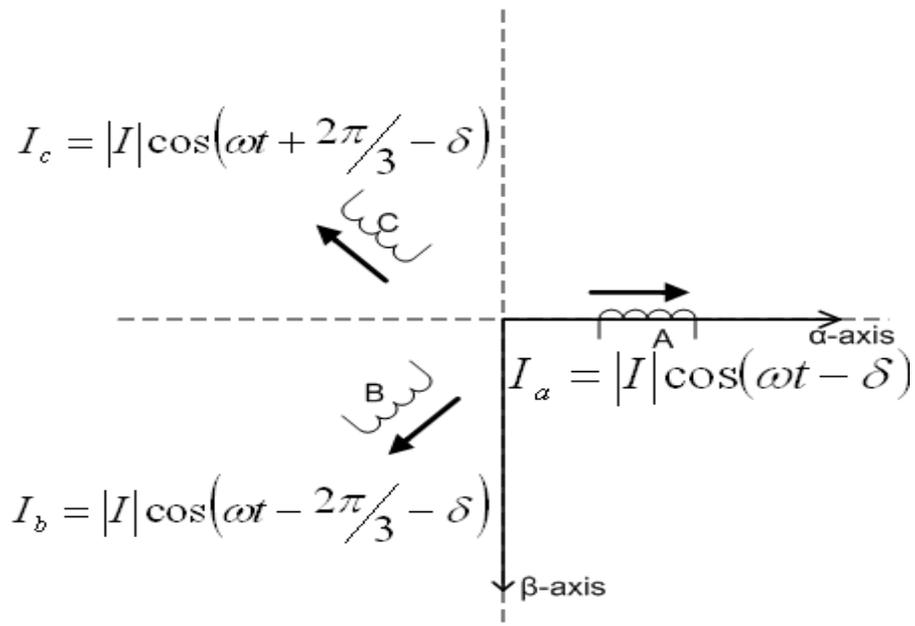


Ilustración 5 Representación gráfica de las relaciones entre arrollamientos

Por otra parte, con la transformación de las ecuaciones de los flujos y de las corrientes desde la base abc a la base dq0 obtenemos las siguientes ecuaciones:

- Ecuaciones de flujos estáticos :

$$\Phi_{ds} = L_{as} \cdot I_{ds} + M_{sr} \cdot I_{dr} \quad (32)$$

$$\Phi_{qs} = L_{bs} \cdot I_{qs} + M_{sr} \cdot I_{qr} \quad (33)$$

$$\Phi_{0s} = L_{sc} \cdot I_{0s} \quad (34)$$

- Ecuaciones de flujos rotóricos

$$\Phi_{dr} = L_{ar} \cdot I_{dr} + M_{rs} \cdot I_{ds} \quad (35)$$

$$\Phi_{qr} = L_{br} \cdot I_{qr} + M_{rs} \cdot I_{qs} \quad (36)$$

$$\Phi_{0r} = L_{sr} \cdot I_{0r} \quad (37)$$

Remarcamos que las ecuaciones que relacionan los flujos a las corrientes en la base dq0 son muy sencillas y se pueden expresar de forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{0s} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & 0 & 0 & M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bs} & 0 & 0 & M_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{0s} & 0 & 0 & 0 \\ M_{rs} & 0 & 0 & L_{dr} & 0 & 0 \\ 0 & M_{rs} & 0 & 0 & L_{qr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{0r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{0r} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Por lo tanto, de esta manera, podemos resolver el sistema fácilmente ya que además la matriz es inversible. Hallaremos las corrientes estatóricas y rotóricas en la base dq0 y utilizando la matriz inversa (30) podremos deducir las corrientes estatóricas y rotóricas en la base abc, por lo tanto, en los valores originales de nuestro sistema.

- Par electromagnético :

La potencia recibida por la máquina es :

$$P = \frac{3}{2} (V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} + V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr} + 2 V_{0s} \cdot I_{0s}) \quad (39)$$

Que se descompone en tres partes que comprenden :

- 1- Pérdidas por efecto Joule :

$$P_j = R_s(I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r(I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (40)$$

- 2- Variación de la energía electromagnética

- 3- Puissance Mécanique :

$$P_{mec} = \frac{3}{2} (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} \quad (41)$$

De donde el par electromecánico se puede expresar como :

$$C_{mec} = \frac{3}{2} p \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (42)$$

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

Añadiendo además al par la ecuación fundamental de la dinámica podemos deducir la velocidad de rotación como hemos hecho anteriormente para la máquina trifásica.

### 2.2.2 Implementación de las ecuaciones de Park

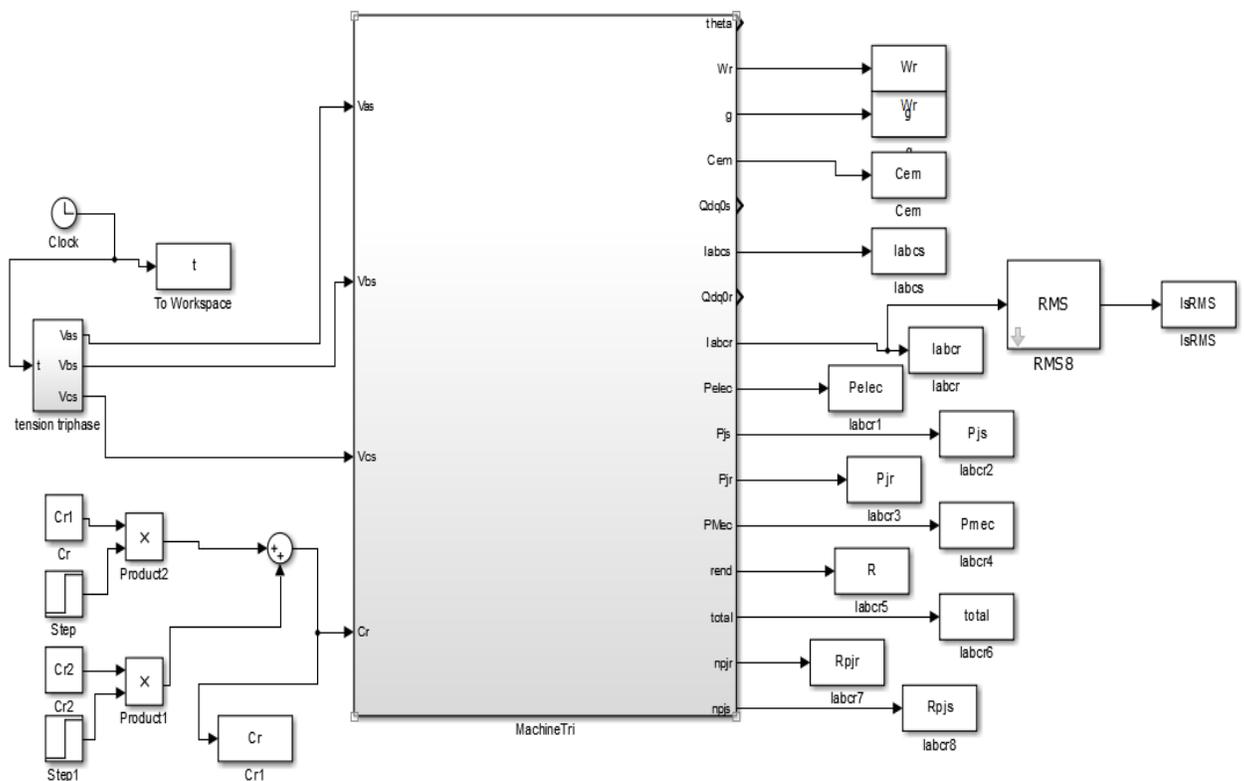


Ilustración 6 Bloque de la implementación de las ecuaciones de Park en Simulink

Tras haber implementado las distintas ecuaciones evocadas anteriormente en el párrafo anterior, obtenemos el modelo que figura aquí encima. Gracias a este modelo desarrollado en el software Simulink hemos podido hacer tests para verificar las características de este modo de funcionamiento de la máquina.

### 2.3.2 Análisis y verificación de los resultados del modelo trifásico :

Para poder hacer tests sobre el modelo hay que definir los diferentes valores utilizados en la máquina y que son parámetros de la simulación:

- Parámetros estatóricos :
  - Tensión estatórica :  $V_{as} = V_{bs} = V_{cs} = 220 \text{ V}$
  - Resistencia estatórica:  $R_{as} = R_{bs} = R_{cs} = 0.1185 \text{ ohm}$
  - Inductancia estatórica :  $L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = 0.005974 \text{ H}$
  - Inductancia mutua estatórica :  
 $M_{abs} = M_{acs} = M_{bcs} = M_{bas} = M_{cas} = M_{cbs} = 0.005974 \text{ H}$
  - Frecuencia nominal :  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ Rad/s}$
  - Número de pares de polos :  $p = 4$
  
- Parámetros rotóricos :
  - Resistencia rotórica:  $R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = 0.1185 \text{ ohm}$
  - Inductancia rotórica :  $L_{ar} = L_{br} = L_{cr} = 0.005974 \text{ H}$
  - Inductancia mutua rotórica :  
 $M_{abr} = M_{acr} = M_{bcr} = M_{bar} = M_{car} = M_{cbr} = 0.005974 \text{ H}$
  - Frotamiento viscoso :  $f_v = 0.001$
  - Inercia del rotor :  $J = 1$

Las simulaciones de la máquina se harán siempre en vacío y en carga con un par resistente de  $C_r=30\text{Nm}$  si no se especificase otro valor en el ensayo.

Par electromagnético **Cem**:

Remarcamos que :

- El par electromagnético consta de un régimen transitorio de 0.3 segundos en vacío y de 0.9 segundos en carga y se debe a que la carga introduce un retardo al oponerse al par electromagnético en la ley fundamental de la dinámica.
- Además en los dos casos (ensayo en carga y en vacío) el par de arranque  $C_d$  es de 270Nm por lo que podemos inferir que el par de arranque no depende del par resistente que se le acople al rotor.
- En régimen permanente los dos pares llegan al mismo valor constante igual al par resistente que va a dominar sobre el par generado por el frotamiento viscoso.

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- También constatamos que las dos curvas de par tienen la misma forma que la vista teóricamente para el régimen motor de la máquina trifásica asíncrona.

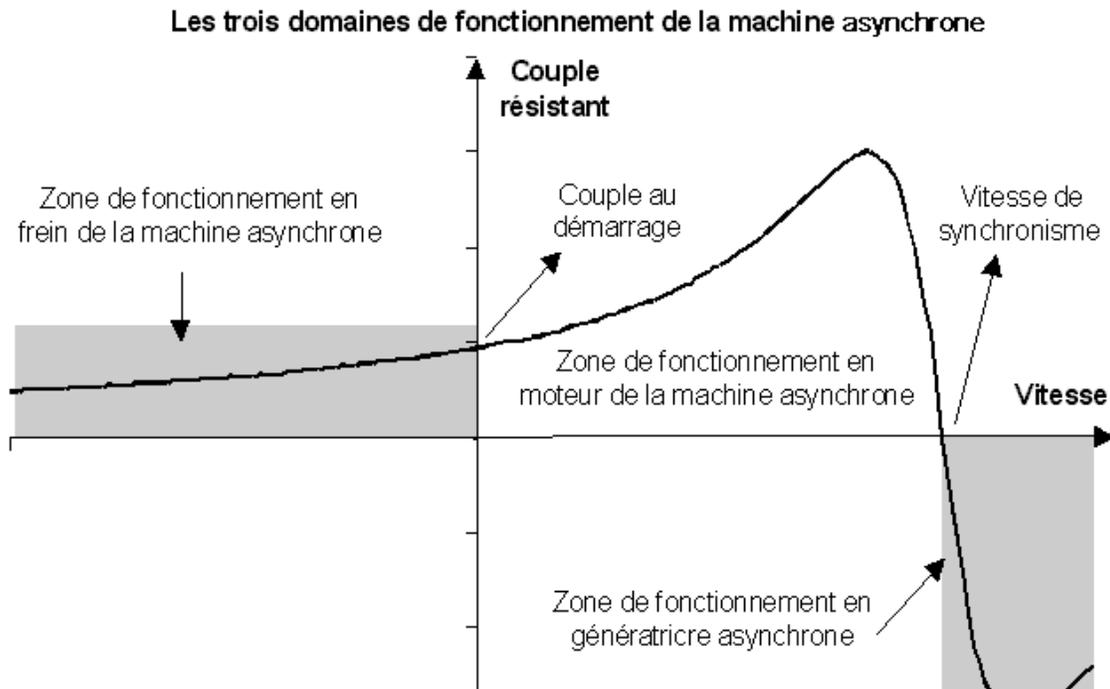


Ilustración 7 Par electromagnético de la máquina trifásica

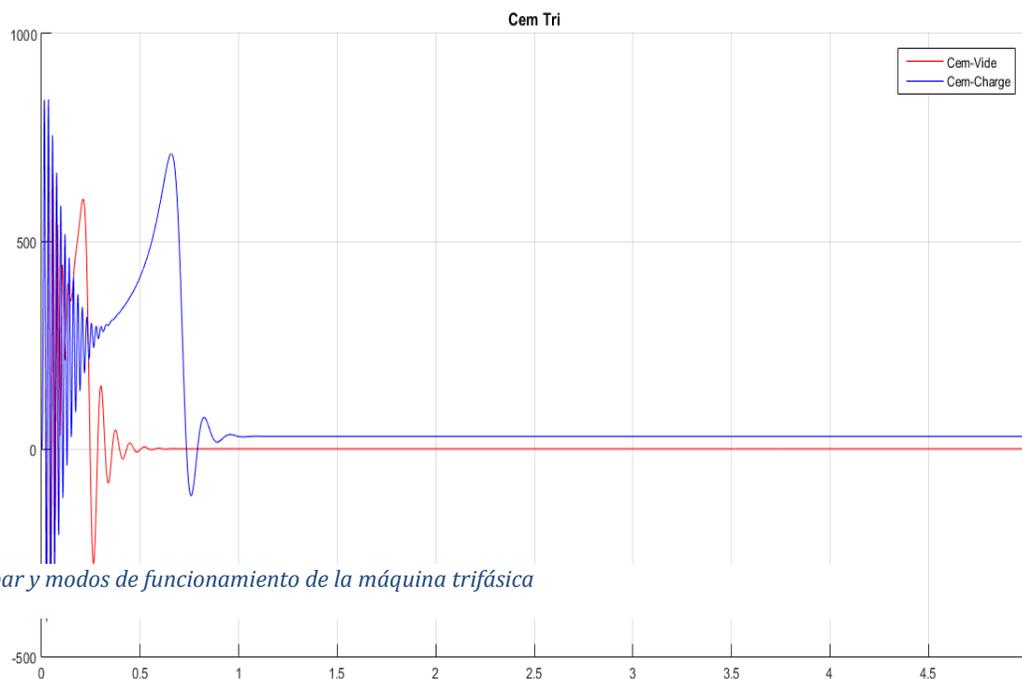
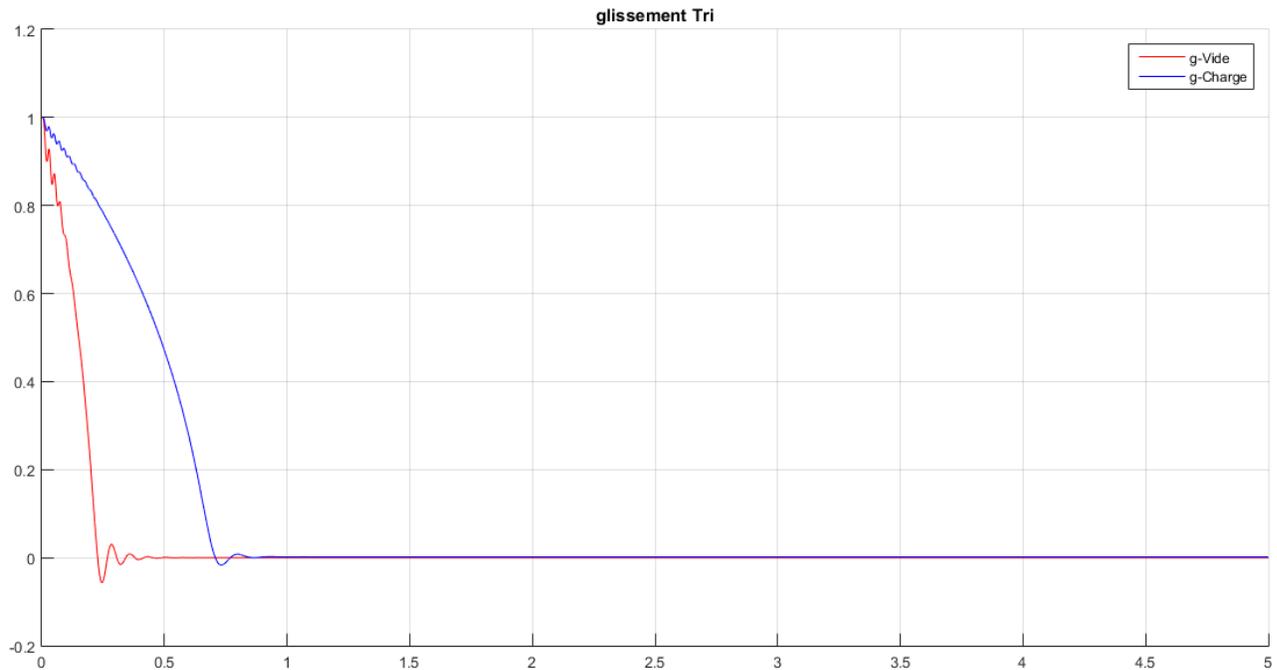


Ilustración 8 Esquema de par y modos de funcionamiento de la máquina trifásica

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Deslizamiento  $g$  :



*Ilustración 9 Deslizamiento de la máquina trifásica*

Remarcamos que :

- Cuando la máquina asíncrona está bajo carga el deslizamiento tiene un retardo creado por el par resistente que ralentiza el comportamiento dinámico de la misma.
- En régimen permanente los dos deslizamientos valen  $g=0$  en vacío y  $g=0.002$  bajo carga y se debe a la bajada de la velocidad en régimen permanente en ambos regímenes. Lo podemos constatar en esta gráfica

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

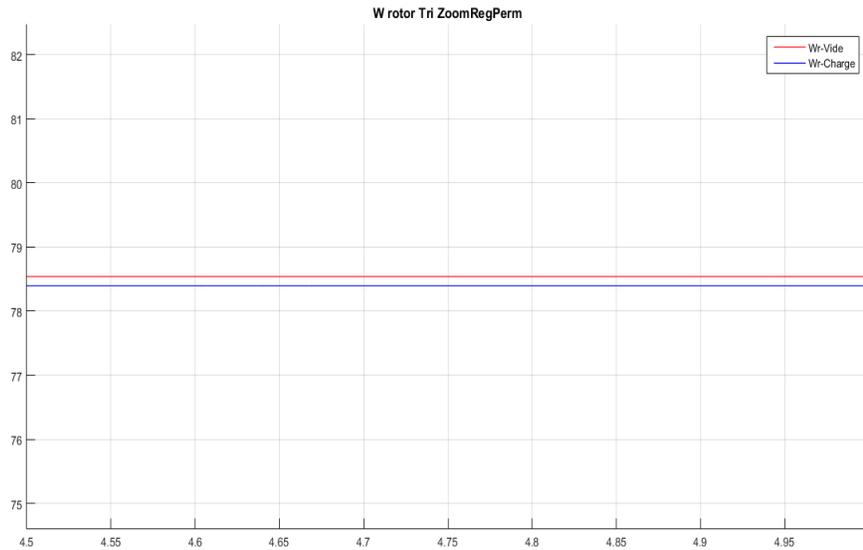


Ilustración 10 Zoom sobre las velocidades de rotación en RP de la máquina trifásica

Podemos señalar que en régimen permanente no encontramos oscilaciones (contrariamente a cuando la máquina es alimentada por tensión monofásica como veremos en la parte de simulaciones monofásicas).

- Corriente estatórica :

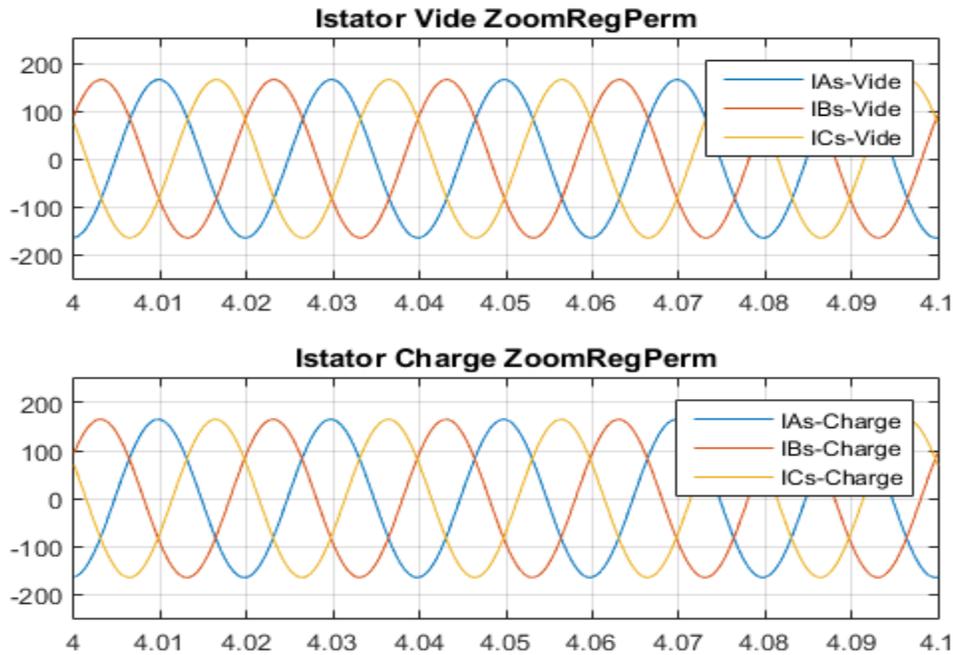


Ilustración 11 Corrientes estatóricas de la máquina trifásica en carga y vacío

Sobre las corrientes estatóricas debemos remarcar que éstas son perfectamente sinusoidales ya que la máquina es equilibrada por sus parámetros y por lo tanto las tres corrientes están desfasadas de  $\frac{2\pi}{3}$  radianes formando como hemos dicho un sistema trifásico equilibrado.

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Corriente rotórica :

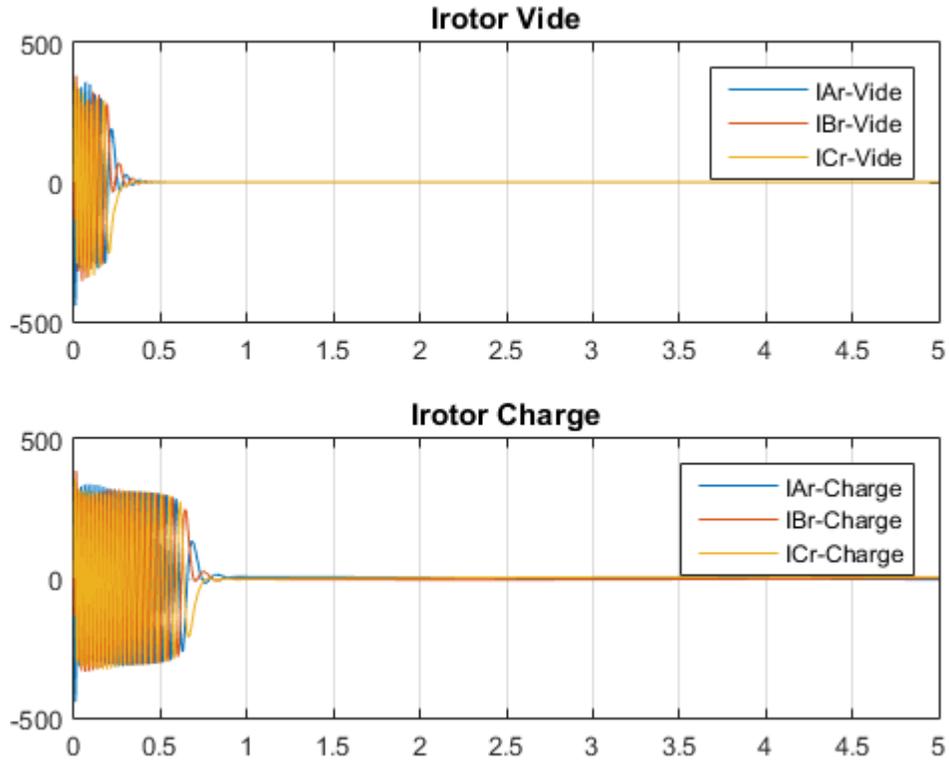


Ilustración 12 Corrientes rotóricas de la máquina trifásica en carga y vacío

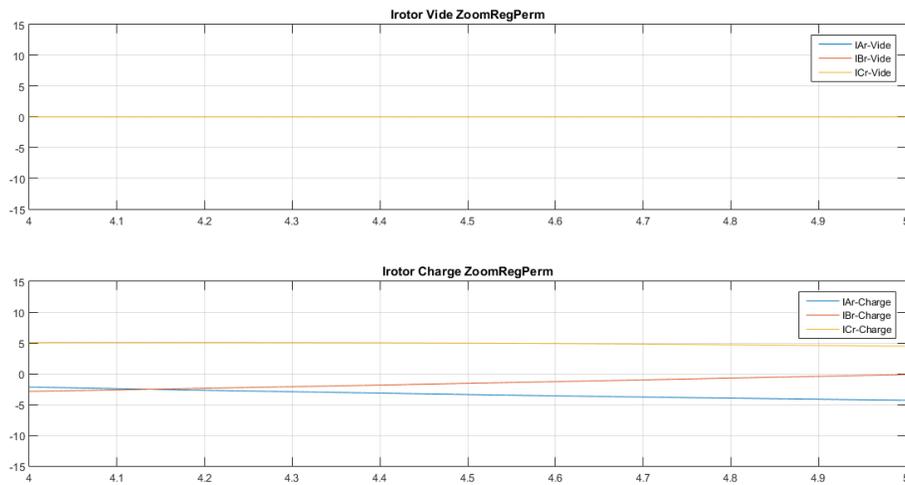


Ilustración 13 Zoom sobre RP de las corrientes rotóricas de la máquina trifásica

La pulsación de la corriente rotórica depende del deslizamiento  $g$  por la relación  $\mathbf{W}_r = g \cdot \mathbf{W}_s$ . Para el caso de vacío donde  $g$  es prácticamente nulo  $W_r$  será prácticamente nulo también haciendo las corrientes casi constantes y 0, mientras que en carga  $W_r$  es diferente a la anterior ya que hay una ligera aumentación de  $g$ .

Análisis energético :

Con el objetivo de poder evaluar los aspectos energéticos de la máquina asíncrona también hemos estudiado diferentes indicadores haciendo un ensayo de carga a 500Nm que corresponden al par máximo registrado para nuestra máquina trifásica en el instante  $t=3$  segundos.

Para este ensayo obtenemos las siguientes figuras con los siguientes valores :

- Potencia mecánica instantánea :

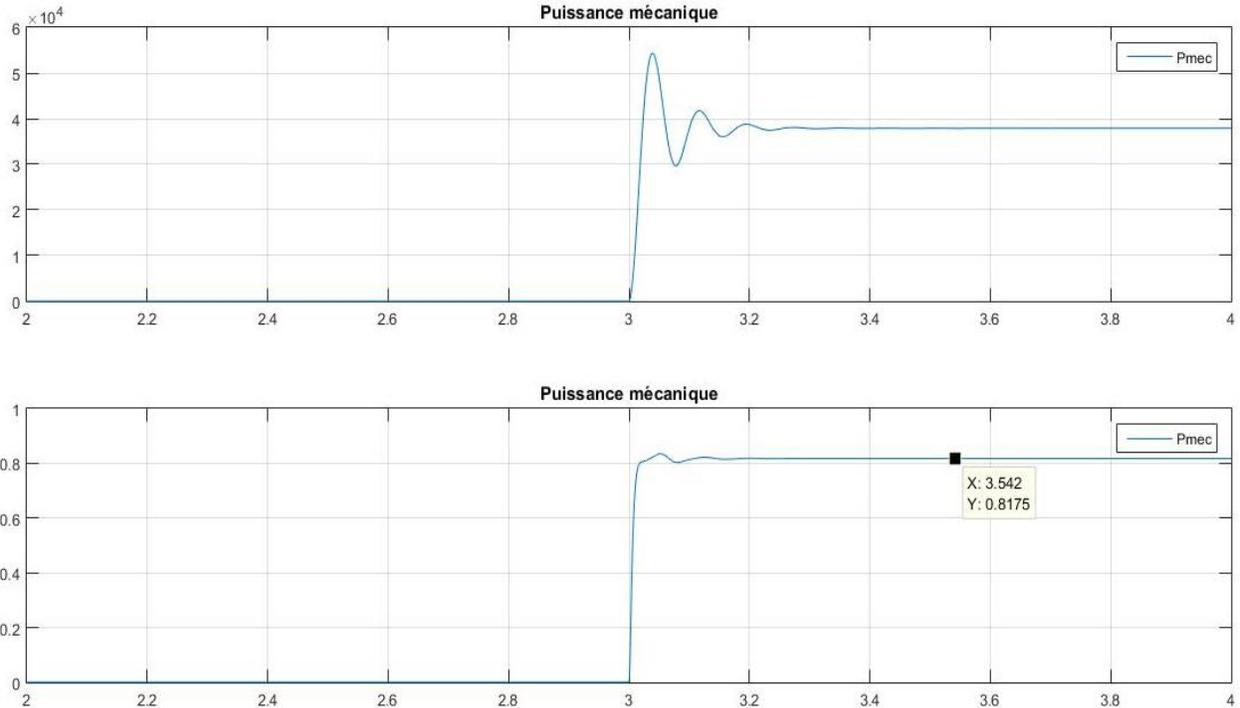


Ilustración 14 Potencia mecánica instantánea y en porcentaje

La primera figura corresponde a la potencia mecánica instantánea desarrollada por el motor y la segunda es el porcentaje de ésta con respecto a la potencia total consumida por la máquina, por lo tanto, una visión de rendimiento.

Remarcamos que en vacío la potencia desarrollada es nula ya que el par desarrollado es nulo porque no hay carga a rotar. Pero mientras que se va cargando el eje la potencia desarrollada aumenta bruscamente hasta representar el 80% de la total consumida que en otros términos es el rendimiento de la máquina.

Pérdidas de Joule estáticas :

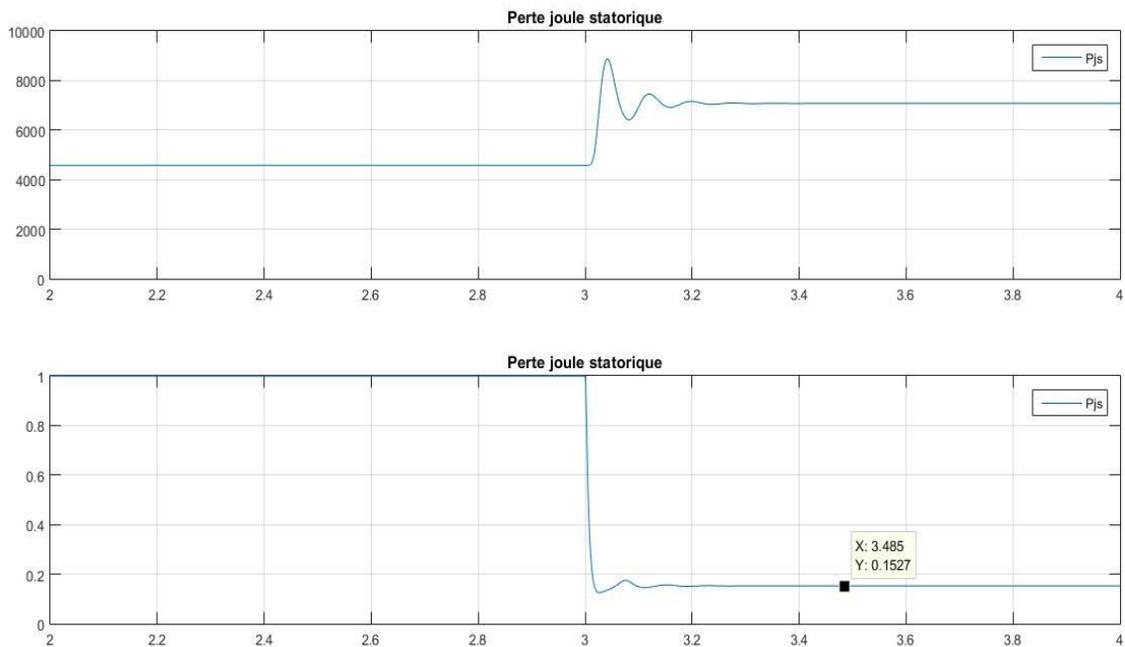


Ilustración 15 Pérdidas Joule en el estator de la máquina trifásica

La primera figura corresponde a las pérdidas estáticas instantáneas y la segunda es su porcentaje con respecto a la potencia total consumida por la máquina trifásica.

De esta manera podemos ver que en vacío la potencia estática representa casi la totalidad de las pérdidas de la máquina, es decir, toda la energía consumida por la máquina se pierde en las pérdidas por efecto Joule en forma de calor en vacío, sin embargo en carga en régimen permanente este porcentaje disminuye ya que la mayoría de la energía se convierte en útil en la carga en forma de potencia mecánica.

## Pérdidas por efecto Joule rotóricas:

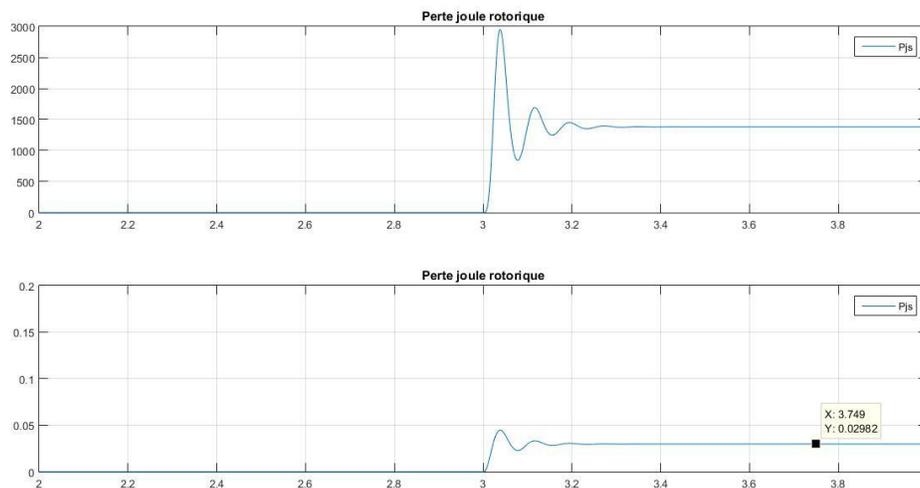


Ilustración 16 Pérdidas Joule en el rotor de la máquina trifásica

La primera figura corresponde a las pérdidas de Joule rotóricas instantáneas y la segunda es el porcentaje con respecto a la potencia total consumida por la máquina trifásica.

Además podemos observar que en vacío la potencia rotórica representa aproximadamente el 0% de las pérdidas totales de la máquina debido al aumento del deslizamiento  $g$  que se aproxima a 0 haciendo las corrientes rotóricas aproximadamente nulas o también la resistencia rotórica se hace infinita, de donde las corrientes rotóricas son nulas.

Sin embargo bajo carga acoplada al eje el porcentaje de pérdidas aumenta en régimen permanente ya que  $g$  aumenta y por lo tanto la resistencia rotórica disminuye, lo que conlleva una aumentación de las corrientes rotóricas y un mayor consumo en pérdidas por efecto Joule en forma de calor.

Tras estas verificaciones del modelo elaborado en régimen de alimentación trifásica, lo tomamos como válido y procedemos al caso de la máquina en régimen de alimentación monofásica a través de las conexiones mostradas anteriormente.

## 2.3 Estudio del motor asíncrono trifásico-monofásico

### 2.3.1 Implementación de la transformada de Park en monofásico

En las diferentes partes precedentes hemos introducido las ecuaciones eléctricas, magnéticas y mecánicas que componen el comportamiento de la máquina asíncrona trifásica, del mismo modo que las ecuación transformadoras de Park para poder implementar el modelo trifásico.

En esta parte se desarrolla la adaptación de la transformada de Park para poderla utilizar en el modelo monofásico de igual manera simplificadora que en el trifásico.

Utilizando las ecuaciones (26) y (28) y la transformada de Park directa e inversa para los flujos y las corrientes podemos simplificar la resolución del problema a la resolución del siguiente sistema lineal:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} - \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ 0 \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{as} & \frac{\sqrt{3}}{2}L_{as} & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & \frac{\sqrt{3}}{2}M_{sr} & 0 \\ -\frac{l_{as}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}L_{as} & 0 & -\frac{M_{sr}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}M_{sr} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 2 & 0 & 0 & 0 \\ M_{rs} & 0 & 0 & L_{dr} & 0 & 0 \\ 0 & M_{rs} & 0 & 0 & L_{qr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{0r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{0r} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Sistema cuya resolución nos permite encontrar los valores de corrientes en la base de Park, para después, utilizando las diferentes transformadas, obtener también los valores de tensión, de corriente, de par y velocidad en la base a b c.

## 2.3.2 Implémentation et simulation du modèle monophasé.

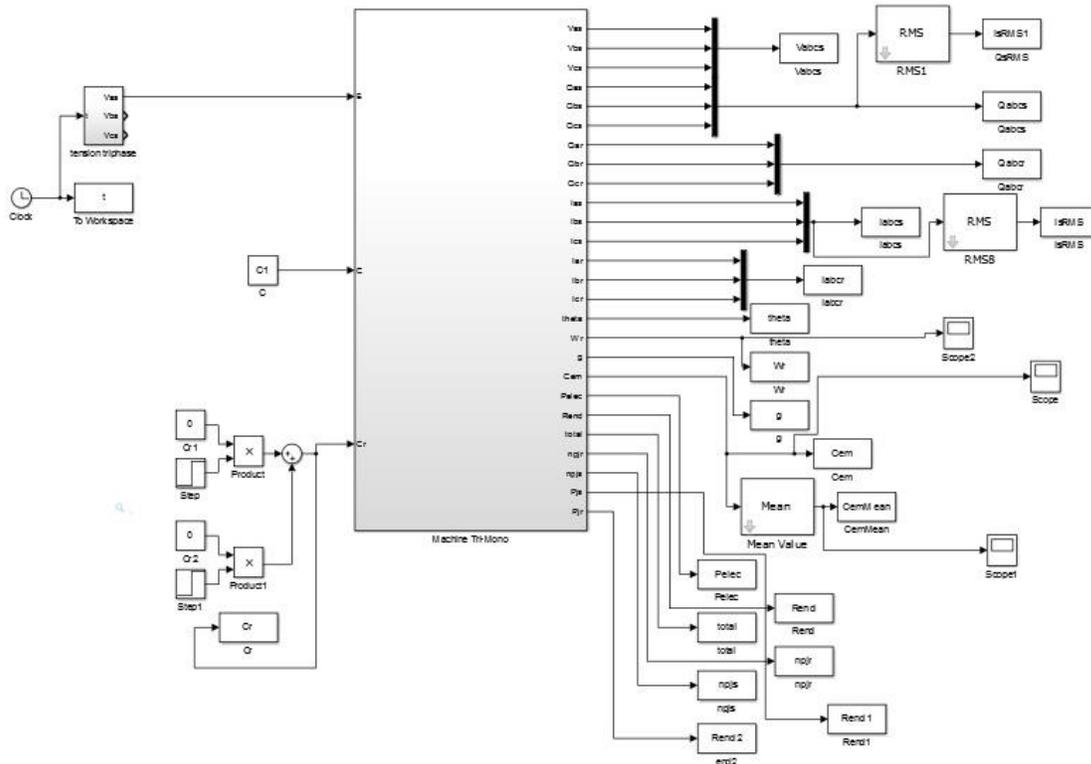


Ilustración 17 Bloque Simulink creado de la máquina con alimentación monofásica

Tras implementar de nuevo las ecuaciones descritas anteriormente en el software simulink, simulamos nuestro modelo para caracterizar las características de la máquina asíncrona alimentada con una fuente de tensión monofásica.

En la parte que continúa, las simulaciones del modelo se harán inicialmente en vacío y variando el valor del condensador utilizado con el objetivo de hacer un estudio y escoger el condensador que mejor se adapte a nuestra máquina en estudio.

## 2.3.3 Análisis de los resultados de la simulación :

Los valores de los condensadores con los que se han realizado los ensayos han sido :

- $C0=0.0016$  F
- $C1=0.0032$  F
- $C2=0.0064$  F
- $C3=0.0096$  F
- $C4=0.0128$  F

Los resultados de las simulaciones han sido :

- Par electromagnético :

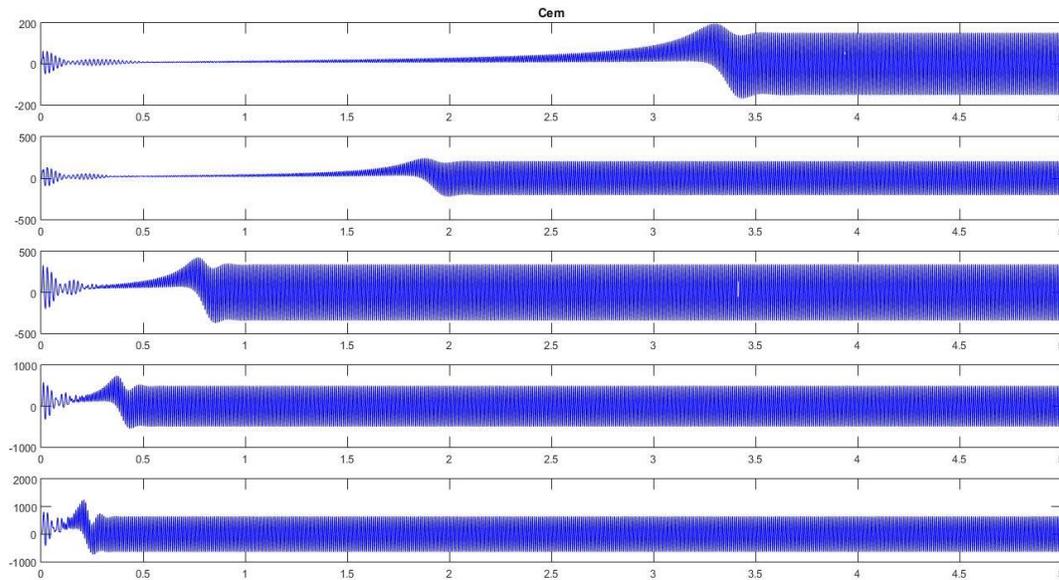
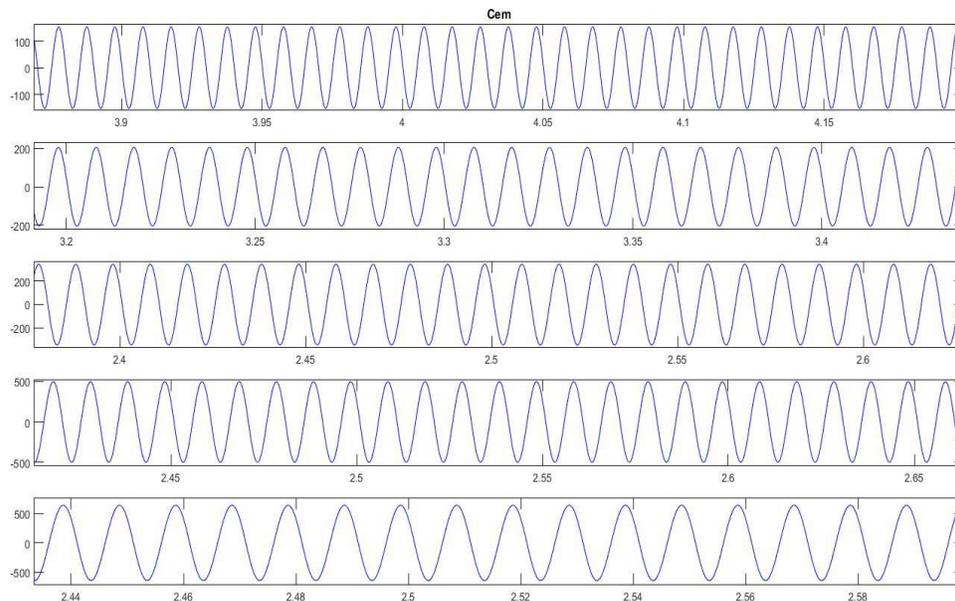


Ilustración 18 Par electromagnético de la máquina tri-mono para los 5 condensadores

Remarcamos que :

- El par electromagnético afecta a la duración de la parte transitoria del arranque o comportamiento dinámico de la máquina. Si aumentamos el valor del condensador la duración de éste transitorio disminuye. Por ejemplo para



el condensador de  $C_0=0.0016$  F el transitorio es de 3.4 segundos mientras que si multiplicamos el valor del condensador por dos la duración del transitorio disminuye hasta 2.9 segundos.

- Haciendo un zoom sobre la parte de las figuras en régimen permanente podemos observar las oscilaciones que tiene el par que aumentan con el valor del condensador lo que introducirá oscilaciones más grandes en la velocidad, parámetro que ha de tenerse en cuenta para la elección del condensador apropiado puesto que una oscilación en velocidad acusada ejerce esfuerzos sobre el rotor que pueden dañarlo.
- Por otro lado, la aumentación del valor de la capacidad hace aumentar también el valor de par de arranque y del par máximo, parámetros a tener en cuenta también puesto que son importantes para el uso de la máquina.

*Ilustración 19 Oscilaciones del par electromagnético de la máquina tri-mono para los 5 condensadores*

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

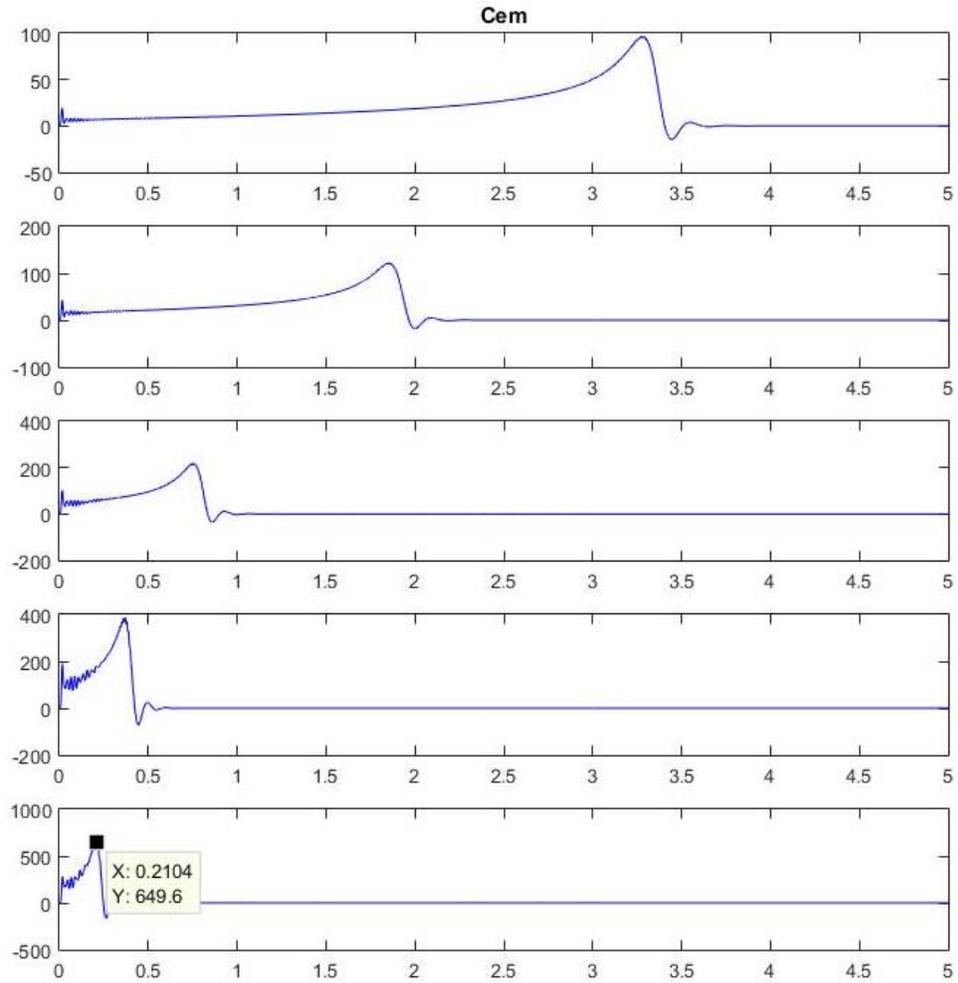
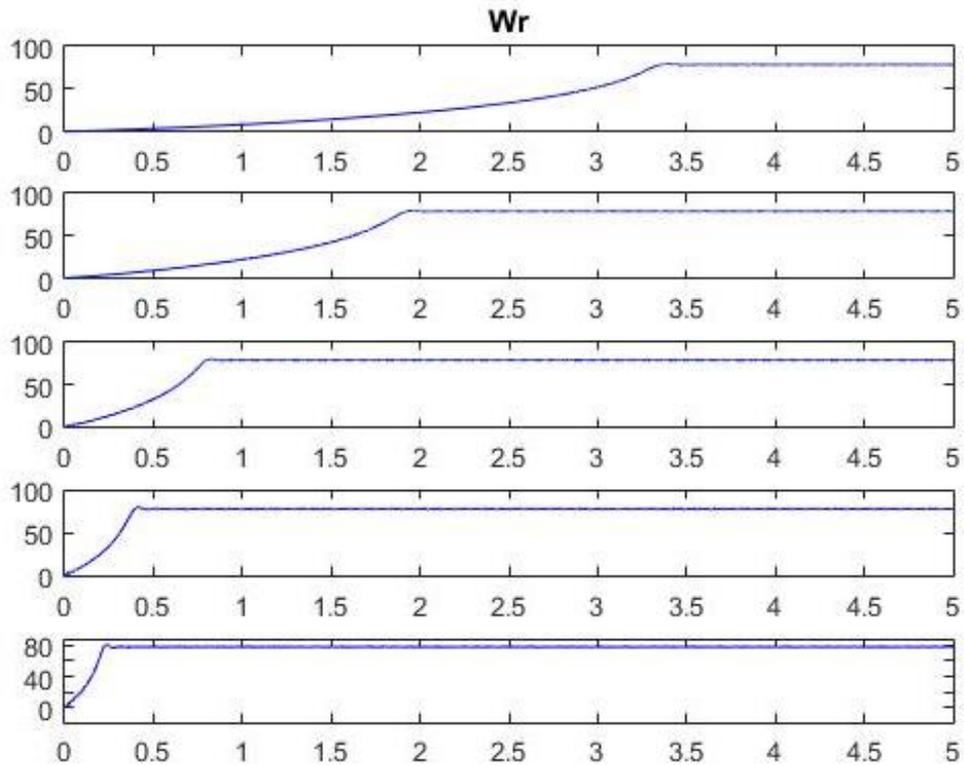


Ilustración 20 Par electromagnético medio de la máquina tri-mono para los 5 condensadores

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Velocidad rotórica :

Para los diferentes valores de condensador simulamos las velocidades rotóricas de la máquina trabajando en vacío:



*Ilustración 21 Velocidad de rotación de la máquina tri-mono para los 5 condensadores*

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Como habíamos remarcado anteriormente, el valor del condensador influye sobre el tiempo de respuesta, aumentando éste inversamente al valor del condensador conectado a la máquina.
- De esta forma, dado que la aumentación de la capacidad hace oscilar más el par electromagnético de la máquina, también lo hará la oscilación de la velocidad que aumentará con la aumentación del valor de la capacidad.

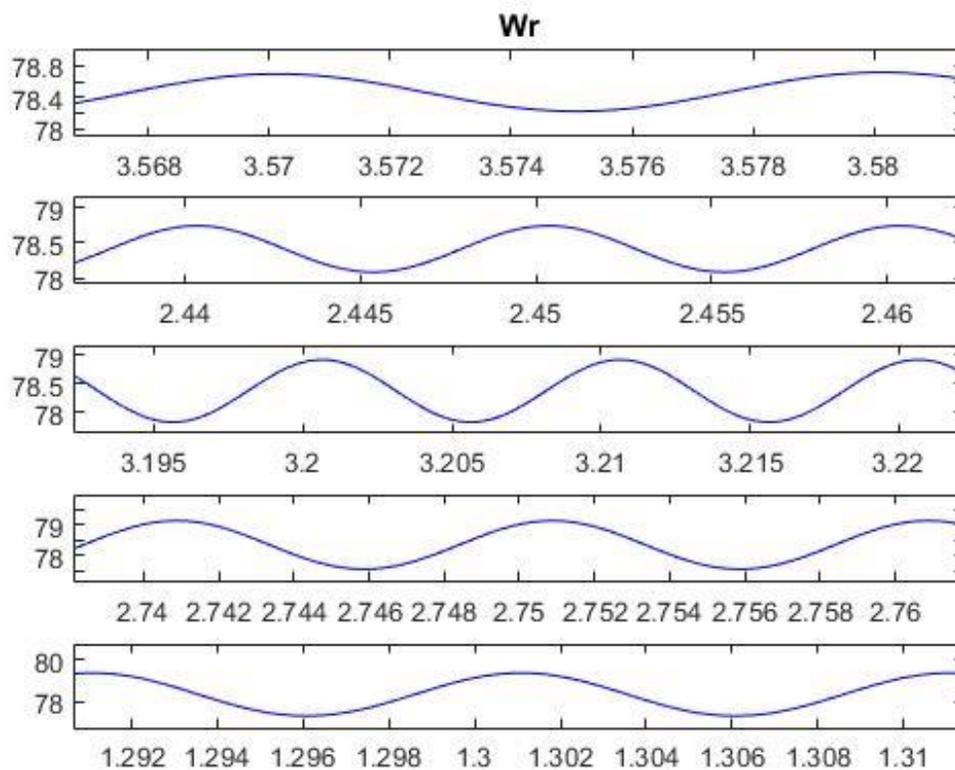
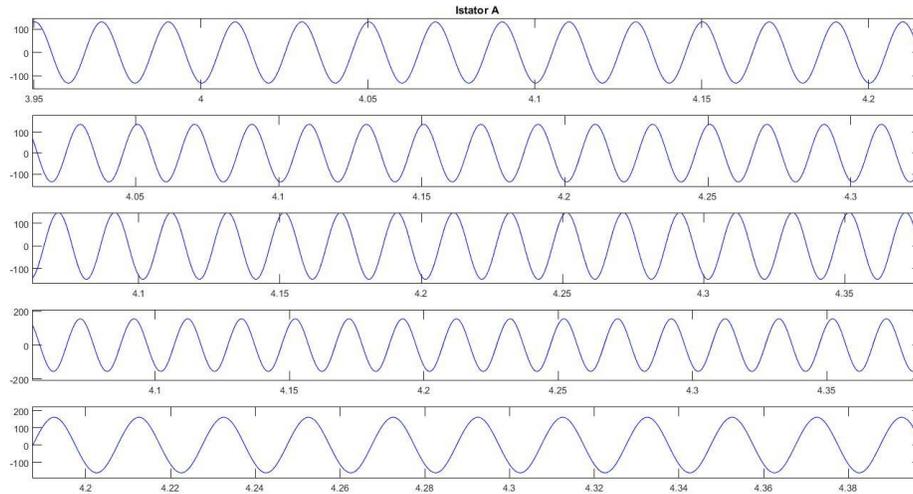


Ilustración 22 Oscilaciones de la velocidad de rotación de la máquina tri-mono para los 5 condensadores

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Corriente estatórica :

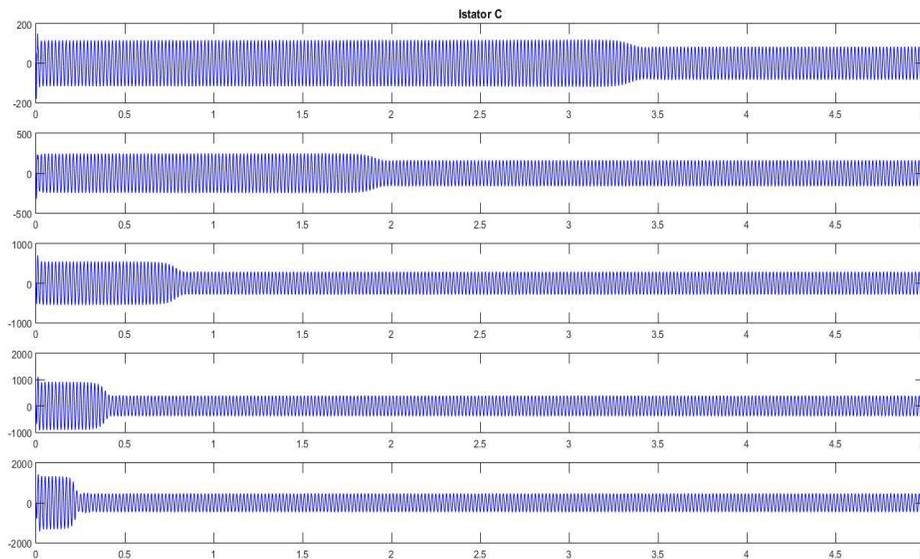
- Corriente estatórica **I<sub>as</sub>**:



*Ilustración 23 Oscilaciones de la Corriente estatórica  $I_{as}$  de la máquina tri-mono para los 5 condensadores*

Remarcamos que las corrientes estatóricas  $I_{as}$  e  $I_{bs}$  no se ven afectadas por el cambio del valor del condensador ya que éste no tiene efecto sobre ellas.

- Corriente estatórica **I<sub>cs</sub>** :

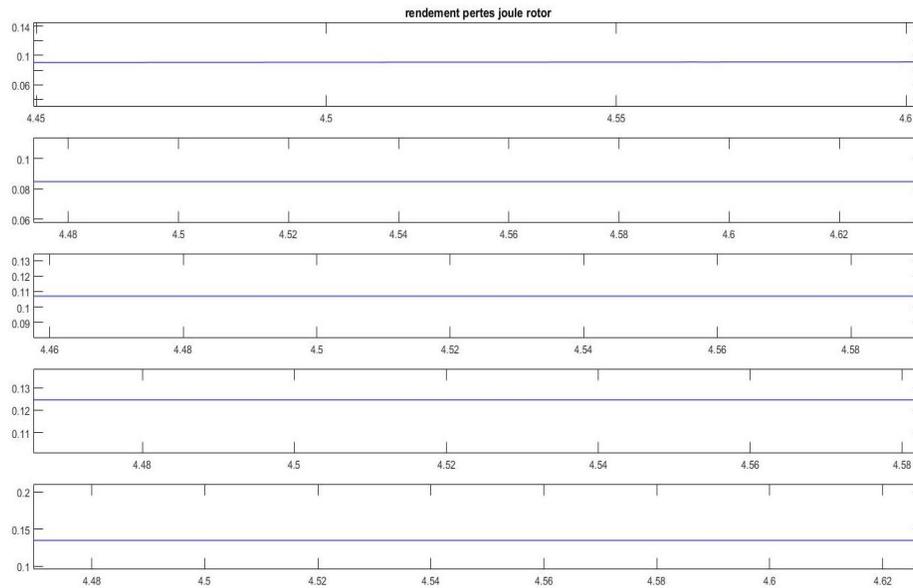


*Ilustración 24 Corriente estatórica  $I_{cs}$  de la máquina tri-mono para los 5 condensadores*

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

Para la corriente  $I_{cs}$  remarcamos que el condensador hace variar las oscilaciones. Estas oscilaciones aumentan con el valor del condensador y han de ser tomadas en cuenta puesto que si son demasiado grandes en valor eficaz podrían conllevar a la destrucción de la máquina a causa de una saturación directamente por la corriente tan elevada que puede llegar hasta 1500 A en el caso del condensador más grande ensayado.

- Pérdidas de Joule en el rotor :

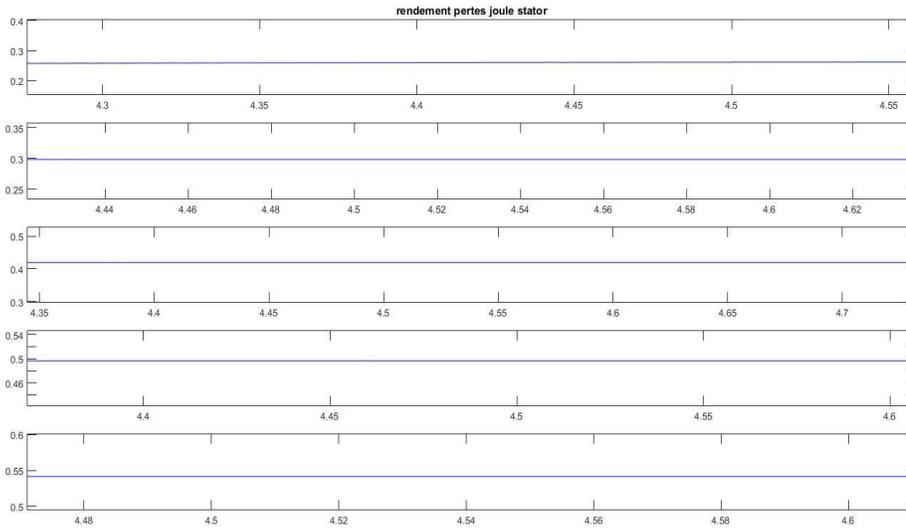


*Ilustración 25 Pérdidas Joule en el rotor de la máquina tri-mono*

Remarcamos que la variación del valor del condensador no influye en las pérdidas de joule rotóricas.

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Pérdidas de Joule estáticas :



*Ilustración 26 Rendimiento perdido en Joule estáticas*

Las pérdidas de Joule estáticas aumentan con la aumentación del valor del condensador por lo que el rendimiento de la máquina se verá afectado paralelamente como vamos a ver.

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Rendimiento de la máquina asíncrona trifásica alimentada en monofásica: :

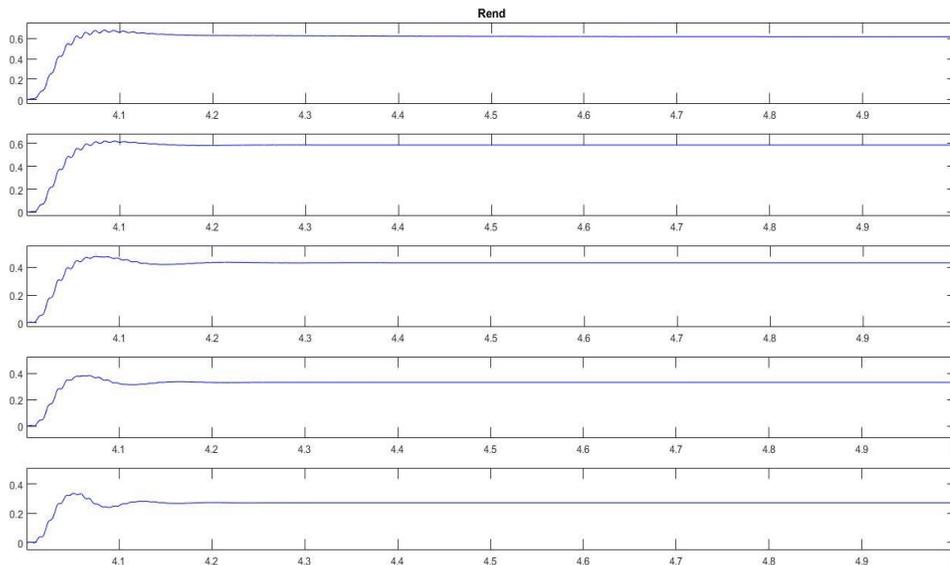


Ilustración 27 Rendimiento de la máquina asíncrona alimentada en mono

Si aumentamos el valor de la capacidad el rendimiento de la máquina disminuye, por lo que este parámetro ha de tenerse en cuenta también para no empeorar mucho el rendimiento a la vez que se busca un compromiso para obtener a la vez un par de arranque y máximo necesarios.

Por lo que para poder escoger el valor de la capacidad a utilizar han de tenerse en cuenta los siguientes criterios :

- Duración de la fase transitoria.
- Par de arranque y par máximo.
- Oscilaciones del par y por lo tanto de la velocidad de rotación.
- Oscilación de la corriente **Ics**.
- Rendimiento de la máquina y pérdidas.

Por lo que, atendiendo a los criterios ya evocados, escogeremos para este caso en particular la capacidad  $C2=0.0064$  que nos permitirá obtener las siguientes características en nuestra máquina asíncrona alimentada en monofásica:

- Rendimiento  $N = 50\%$ .
- Par de arranque  $Cd = 45 \text{ N. m.}$
- Par máximo  $Cm = 255 \text{ N. m.}$

- Oscilación en la velocidad  $\Delta\Omega = 0.8 \text{ rad/s}$ .
- Pérdidas de Joule rotóricas  $N_s = 45\%$ .
- Pérdidas de Joule estatoricas  $N_r = 4.8\%$ .

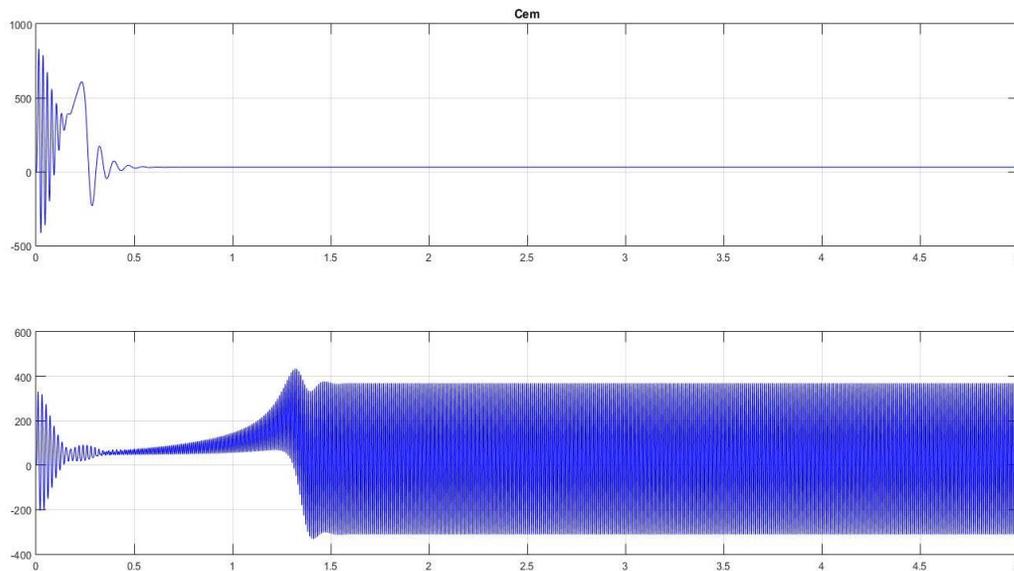
### 2.3.4 Comparación de la alimentación trifásica y monofásica:

En esta parte comparamos las características de la máquina alimentada en trifásica con las de la máquina alimentada en monofásica ya habiendo escogido el condensador óptimo y ambas bajo las mismas condiciones de carga de  $C_r = 30 \text{ Nm}$ .

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Par electromagnético:

Remarcamos que:



*Ilustración 28 Pares máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica*

- El par de la máquina alimentada en monofásica tiene importantes oscilaciones sin embargo el de trifásica no las tiene.
- Además el transitorio de la máquina alimentada en monofásica es mayor que el de la alimentada en trifásica
- Los pares desarrollados en trifásica son más grandes que los desarrollados en monofásica, y podemos remarcar que el par de arranque es hasta 4 veces más grande en trifásica que en monofásica.

## Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- El par de arranque y el par máximo de ambas máquinas guardan una relación de  $\frac{1}{4}$  del par monofásico sobre el trifásico.

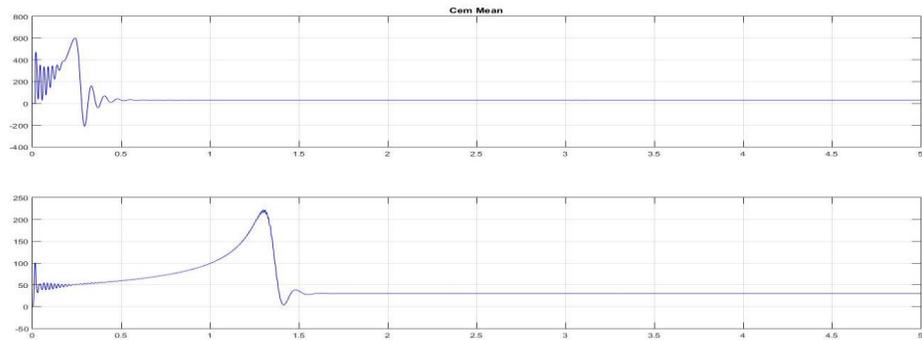


Ilustración 29 Ilustración 27 Pares medios de la máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica

- Velocidad de rotación :

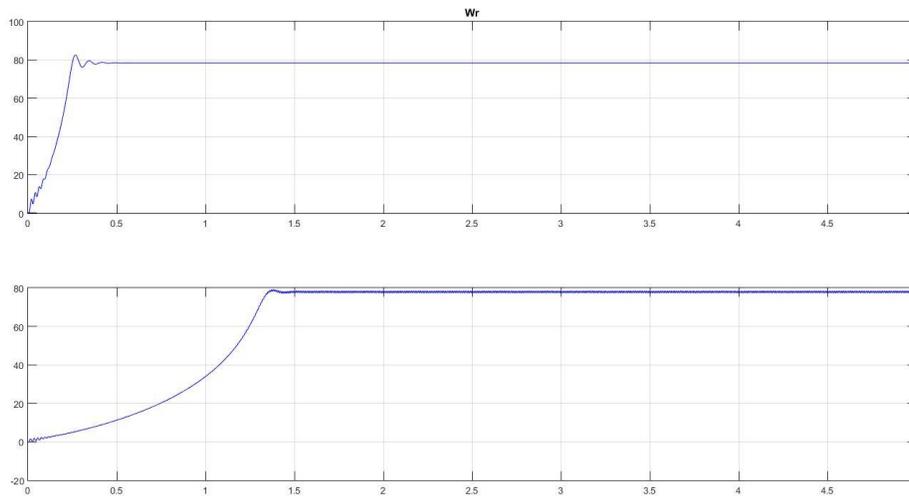
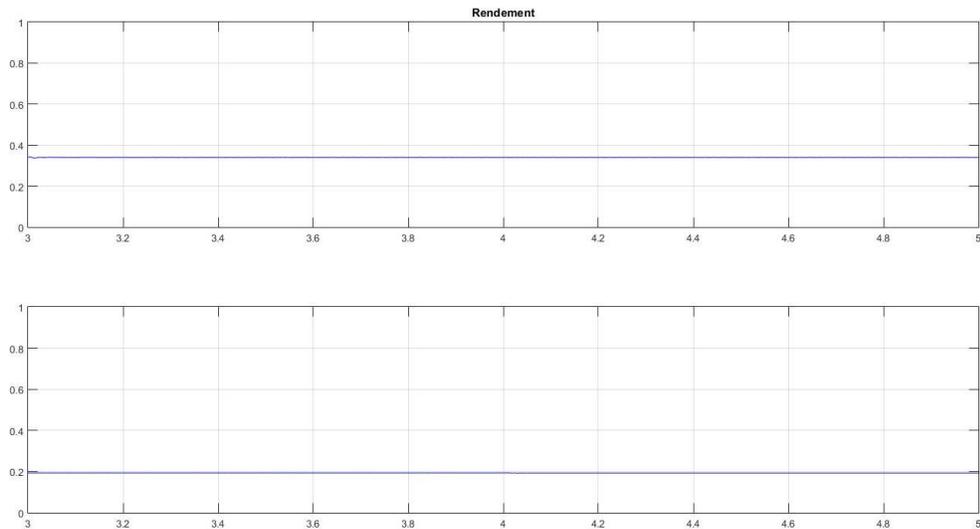


Ilustración 30 Ilustración 27 Velocidades de la máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica

- Los tiempos de respuesta en monofásica son superiores a los de la respuesta trifásica al ser su par electromagnético inferior.
- En régimen permanente la velocidad oscila en monofásica mientras que no ocurre así con la alimentación trifásica.

# Modelización de un motor asíncrono trifásico alimentado en corriente monofásica

- Rendimiento :



*Ilustración 31 Ilustración 27 Rendimiento de la máquina asíncrona alimentada en trifásica y en monofásica*

- El rendimiento de la máquina asíncrona trifásica es superior al rendimiento cuando se alimenta en monofásica, es decir, para generar el mismo par en el eje la máquina trifásica consumirá menor cantidad de energía que si se alimentase en monofásica.

Con todos estos datos podemos concluir en que al alimentar la máquina trifásica con una red monofásica y usando un condensador las características de explotación de la máquina se degradan pudiendo decir que la máquina perderá entorno al 75% de sus prestaciones y además se consumirá más energía para hacer el mismo trabajo que con la alimentación trifásica.

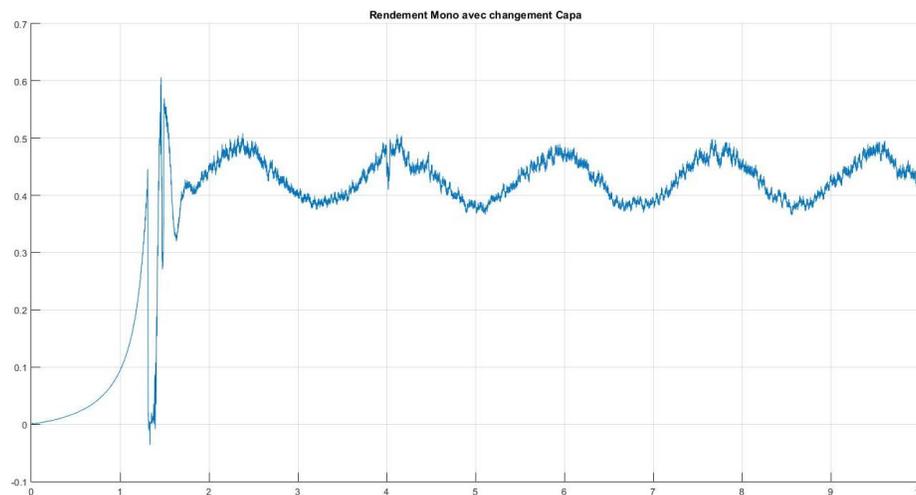
Por lo que con objeto de mejorar este rendimiento se puede pensar en desconectar la capacidad una vez la máquina se encuentra en su régimen permanente de explotación, etapa siguiente en nuestro estudio para analizar sus efectos y mejoras.

## 2.3.5 Desconexión de la capacidad :

La desconexión de la capacidad se la hacemos cuando el motor ha alcanzado el 90% de la velocidad de rotación en régimen permanente.

El análisis se va a centrar en las prestaciones en cuanto a rendimiento y el par otorgado por la máquina en régimen permanente.

- Rendimiento:



*Ilustración 32 Rendimiento de la máquina asíncrona alimentada en mono con desconexión de capacidad*

- Si comparamos el rendimiento de la máquina sin el condensador y con el condensador podemos observar que éste pasa de 0.2 a 0.45, llegando a ser incluso mayor que el rendimiento de la propia máquina trifásica, aunque hay que recordar que estamos bajo unas condiciones de carga de 30Nm que no es el valor nominal de par de la máquina en condiciones normales que sería mucho mayor.
- Sin embargo aparecen oscilaciones en el rendimiento, es decir, que el par también oscila de manera muy acusada.

- Par electromagnético :
  - El par máximo de la máquina se degrada. El par pasa de 255Nm a 100Nm y en otras palabras podemos decir que el poder de la máquina se reduce a la mitad de las características con condensador conectado.

También estas características han de influir y son limitadoras a la hora de elegir desconectar o no la capacidad para mejorar el rendimiento y reducir el consumo, ya que en este caso por ejemplo no se podría desconectar si en régimen permanente necesitásemos desarrollar un par mayor a  $C_{max} = 100 \text{ N.m}$ , ya que la máquina se detendría.

### 3 Conclusión

En conclusión, en el modelo estudiado se han descrito y estudiado las diferentes ecuaciones que intervienen en el funcionamiento de la máquina asíncrona trifásica alimentada en monofásica. Luego se ha simulado el funcionamiento gracias a la implementación de estas ecuaciones en un modelo gracias a Simulink para hacer una resolución temporal de las mismas y después se han analizado los resultados obtenidos.

Así podremos concluir que el funcionamiento de la máquina asíncrona trifásica alimentada en monofásica es posible en determinados casos siempre a través de un estudio y selección de la capacidad adecuada para tener unas buenas prestaciones.

Para ello se deberán tener en cuenta el par resistente y las tasas de oscilación admisibles en par y por lo tanto en velocidad para la máquina y la función a desempeñar además de las propias características de par máximo y corriente.

Por lo tanto la solución de alimentar en monofásico ha de ser tomada en cuenta pero siempre teniendo en cuenta sus limitaciones y las restricciones que impondrá a la máquina.

## 4 Referencias

- Collins, 1992. Torque and slip behavior of single-phase induction motors driven from variable-frequency supplies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 710-15
- Chee-Mun Ong, 1998. Dynamic Simulation of Electric machinery usmg *MATLABSIMULINK*, Prentice Hall.
- N. Abdel-Rahim and A. Shaltout, Operation of single-phase induction motor as two-phase motor, Sevilla, Spain, 2002.
- D S Henderson, Variable Speed Electric Drives - Characteristics and Applications.
- Theodore Wilidi.1997. Electrical Machine Drives and Power System Prentice Hall, Inc.
- Farzan RashidiSensorless Speed Control of Induction Motor Derives Using Robust Intelligent Controller.

## 5 Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer el Dr. Jean-Claude Vannier su apoyo, sus comentarios y sus consejos a lo largo del desarrollo de este proyecto. Ha estado presente para dirigirme y responder a mis dudas con el fin de vencer todos los problemas y salvedades que me he ido encontrando.

Querría también agradecer a ICAI y a Centrale-Supélec la posibilidad que me han brindado con el programa de la doble titulación y la posibilidad de desarrollar este proyecto para pasar de la teoría aprendida a su puesta en uso.

Por último quería agradeceré a mi familia pues ha supuesto un gran apoyo durante mi estancia en el extranjero y les quiero mucho.

Ignacio García-Atance

# ANEXOS



# **ANEXO A : código de los principales módulos**



# ANEXO A: Código de los principales módulos

## ParamV5.m

```
%PARAMETRES
close all;
clear all;

%%emps de simulation
T=5;

%General
E=220;
f=50;
w=2*pi*f;
p=4;
j=1; %inertie du rotor
jext=0; %inertie de la charge
fv=0.001;%frottement visqueux

%Donnes machine
Rr=1.115*0.1;
Rs=1.115*0.1;
Ls=0.005974;
M=Ls;
Mrs=M;
Mms=M;
Mmr=M;
Lr=0.009;
ws=w/p;

%Valeurs simulation Mono
C1=0.00318;
C2=C1/10;
C=C1;
Los=Ls/10;
Lor=Lr/10;

%Couple avec échelon en 3s

%%Cr1=1;
%%Cr2=Cr1*2;
Couple=30; %couple initial
CoupleEchelon=0;%échelon Cr+Cr2

%valeurs internes de la machine
Ras=Rs;
Rbs=Rs;
Rcs=Rs;

Rar=Rr;
Rbr=Rr;
Rcr=Rr;

Las=Ls;
```

```

Lbs=Ls;
Lcs=Ls;

Lar=Lr;
Lbr=Lr;
Lcr=Lr;

Mabs=Mms;
Macs=Mms;
Mbas=Mabs;
MbcS=Mms;
Mcas=MacS;
Mcbs=MbcS;

Mabr=Mmr;
Macr=Mmr;
Mbar=Mabr;
Mbcr=Mmr;
Mcar=Macr;
Mcbcr=Mbcr;

% Ls1=Ls-Mms;
% Lr1=Lr-Mmr;
% M1=Mms/2*3;
%
% Los=Ls1/10;
% Lor=Lr1/10;

% Matrix
L=[3/2*Ls sqrt(3)/2*Ls 0 3/2*Mms sqrt(3)/2*Mms 0; -Ls/2 -sqrt(3)/2*Ls
Los -Mms/2 -sqrt(3)/2*Mms 0 ;1/2 -sqrt(3)/2 2 0 0 0 ;Mmr 0 0 Lr 0 0; 0
Mmr 0 0 Lr 0 ;0 0 0 0 0 Lor];
L1=[Ls 0 0 Mms 0 0; 0 Ls 0 0 Mms 0 ;0 0 Los 0 0 0 ;Mmr 0 0 Lr 0 0; 0
Mmr 0 0 Lr 0 ;0 0 0 0 0 Lor];

% L=[3/2*Ls1 sqrt(3)/2*Ls1 0 3/2*M1 sqrt(3)/2*M1 0;
% -Ls1/2 -sqrt(3)/2*Ls1 Los -M1/2 -sqrt(3)/2*M1 0 ;
% 1/2 -sqrt(3)/2 2 0 0 0 ;
% M1 0 0 Lr1 0 0;
% 0 M1 0 0 Lr1 0 ;
% 0 0 0 0 0 Lor];
% L1=[Ls1 0 0 M1 0 0;
% 0 Ls1 0 0 M1 0 ;
% 0 0 Los 0 0 0 ;
% M1 0 0 Lr1 0 0;
% 0 M1 0 0 Lr1 0 ;
% 0 0 0 0 0 Lor];

```

## SimulationsTri.m

```

%% execution de simulations Tri

%% besoin d'executer le fichien 'parametres' avant

%% Essais simulation Tri 5s
%% Tri: Tg,TWr,TCem,Tt + Charge/Vide

```

```

%% simulation Tri Vide et Charge

%vide Couple=0Nm
Cr1=0;
Cr2=0;
jext=0;

SimOut = sim('TriMachineInt');

TgVide=g;
TWrVide=Wr;

TCemVide=Cem;
TCrVide=Cem;

TIabcsVide=Iabcs;
TIabcrVide=Iabcr;
TIsRMSVide=IsRMS;

TtVide=t;
Pjsvide=Pjs;
Pjrvide=Pjr;
Pmecvide=Pmec;
Rvide=R;
totalvide=total;
Rpjrvide=Rpjr;
Rpjsvide=Rpjs;

%charge Couple=20Nm
Cr1=Couple;
Cr2=CoupleEchelon;
jext=2*j;

SimOut = sim('TriMachineInt');

TgCharge=g;
TWrCharge=Wr;

TCemCharge=Cem;
TCrCharge=Cem;

TIabcsCharge=Iabcs;
TIabcrCharge=Iabcr;
TIsRMSCharge=IsRMS;

Pjscharge=Pjs;
Pjrcharge=Pjr;
Pmeccharge=Pmec;
Rcharge=R;
totalcharge=total;
Rpjrcharge=Rpjr;
Rpjscharge=Rpjs;
TtCharge=t;
jext=0;

```

## SimulationsMono.m

```
% execution de simulations Mono

% besoin d'executer le fichier 'parametres' avant
T=5;

% Essais simulation Mono T s
% Mono: g,Wr,Cem,t + Charge/Vide + numCondensateur

% simulation monophasé Vide et Charge avec 2 condensateurs differents

% %%C1
C=C;
    %vide Couple=0Nm
    Cr1=0;
    Cr2=0;
    jext=0;

    SimOut = sim('MonoMachine');

    gVide1=g;
    WrVide1=Wr;

    CemVide1=Cem;
    CrVide1=Cr;
    CemMeanVide1=CemMean;

    VabcsVide1=Vabcs;

    QabcsVide1=Qabcs;
    QabcrVide1=Qabcr;

    IabcsVide1=Iabcs;
    IsRMSVide1=IsRMS;
    IabcrVide1=Iabcr;

    tVide1=t;

    %charge Couple=15Nm
    Cr1=Couple;
    Cr2=CoupleEchelon;
    jext=2*j;

    SimOut = sim('MonoMachine');

    gCharge1=g;
    WrCharge1=Wr;

    CemCharge1=Cem;
    CrCharge1=Cr;
    CemMeanCharge1=CemMean;

    VabcsCharge1=Vabcs;
```

```

QabcsCharge1=Qabcs;
QabcrCharge1=Qabcr;

IabcsCharge1=Iabcs;
IsRMSCharge1=IsRMS;
IabcrCharge1=Iabcr;

tCharge1=t;

jext=0;

%%C2
C=C1*2;
%vide Couple=0Nm
Cr1=0;
Cr2=0;

SimOut = sim('MonoMachine');

gVide2=g;
WrVide2=Wr;

CemVide2=Cem;
CrVide2=Cr;
CemMeanVide2=CemMean;

VabcsVide2=Vabcs;

QabcsVide2=Qabcs;
QabcrVide2=Qabcr;

IabcsVide2=Iabcs;
IsRMSVide2=IsRMS;
IabcrVide2=Iabcr;
tVide2=t;

%charge Couple=15Nm
Cr1=Couple;
Cr2=CoupleEchelon;
jext=2*j;

SimOut = sim('MonoMachine');

gCharge2=g;
WrCharge2=Wr;

CemCharge2=Cem;
CrCharge2=Cr;
CemMeanCharge2=CemMean;

VabcsCharge2=Vabcs;

QabcsCharge2=Qabcs;
QabcrCharge2=Qabcr;

IabcsCharge2=Iabcs;
IsRMSCharge2=IsRMS;
IabcrVide2=Iabcr;

```

## SimuPlotsMono.m

```
close all;
%%simu mono

% %%C0
% C=C1/2;
%
%
% SimOut = sim('MonoMachine');
%
% gVide0=g;
% WrVide0=Wr;
%
% CemVide0=Cem;
% CrVide0=Cr;
% CemMeanVide0=CemMean;
%
% VabcsVide0=Vabcs;
%
% QabcsVide0=Qabcs;
% QabcrVide1=Qabcr;
%
% IabcsVide0=Iabcs;
% IsRMSVide0=IsRMS;
% IabcrVide0=Iabcr;
%
% RendVide0=Rend;
% npjsVide0=npjs;
% npjrVide0=npjr;
% PmecVide0=Pmec;
%
% tVide0=t;
% %%
% C=C1;
%
% SimOut = sim('MonoMachine');
%
% gVide1=g;
% WrVide1=Wr;
%
% CemVide1=Cem;
% CrVide1=Cr;
% CemMeanVide1=CemMean;
%
% VabcsVide1=Vabcs;
%
% QabcsVide1=Qabcs;
% QabcrVide1=Qabcr;
%
% IabcsVide1=Iabcs;
% IsRMSVide1=IsRMS;
% IabcrVide1=Iabcr;
%
% RendVide1=Rend;
% npjsVide1=npjs;
% npjrVide1=npjr;
% PmecVide1=Pmec;
```

```

%
%
% tVide1=t;
%
%
%
% %%C2
% C=C1*2;
% %vide Couple=0Nm
% Cr1=0;
% Cr2=0;
%
% SimOut = sim('MonoMachine');
%
% gVide2=g;
% WrVide2=Wr;
%
% CemVide2=Cem;
% CrVide2=Cr;
% CemMeanVide2=CemMean;
%
% VabcsVide2=Vabcs;
%
% QabcsVide2=Qabcs;
% QabcrVide2=Qabcr;
%
% IabcsVide2=Iabcs;
% IsRMSVide2=IsRMS;
% IabcrVide2=Iabcr;
%
% RendVide2=Rend;
% npjsVide2=npjs;
% npjrVide2=npjr;
% PmecVide2=Pmec;
%
% tVide2=t;
%
% %%C3
% C=C1*3;
% %vide Couple=0Nm
% Cr3=0;
% Cr3=0;
%
% SimOut = sim('MonoMachine');
%
% gVide3=g;
% WrVide3=Wr;
%
% CemVide3=Cem;
% CrVide3=Cr;
% CemMeanVide3=CemMean;
%
% VabcsVide3=Vabcs;
%
% QabcsVide3=Qabcs;
% QabcrVide3=Qabcr;
%
% IabcsVide3=Iabcs;
% IsRMSVide3=IsRMS;
% IabcrVide3=Iabcr;
%
% RendVide3=Rend;

```

```

%      npjsVide3=npjs;
%      npjrVide3=npjr;
%      PmecVide3=Pmec;
%
%      tVide3=t;
%
%      %%C4
%      C=C1*4;
%      %vide Couple=0Nm
%      Cr1=0;
%      Cr2=0;
%
%      SimOut = sim('MonoMachine');
%
%      gVide4=g;
%      WrVide4=Wr;
%
%      CemVide4=Cem;
%      CrVide4=Cr;
%      CemMeanVide4=CemMean;
%
%      VabcsVide4=Vabcs;
%
%      QabcsVide4=Qabcs;
%      QabcrVide4=Qabcr;
%
%      IabcsVide4=Iabcs;
%      IsRMSVide4=IsRMS;
%      IabcrVide4=Iabcr;
%
%      RendVide4=Rend;
%      npjsVide4=npjs;
%      npjrVide4=npjr;
%      PmecVide4=Pmec;
%
%      tVide4=t;
%
%      %%plots

%%Plots Mono

%%W
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,WrVide0,'b');title('Wr');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,WrVide1,'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,WrVide2,'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,WrVide3,'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,WrVide4,'b');

axis([0 5 -20 ws+10]);
close;

%%Cem
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,CemVide0,'b');title('Cem');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,CemVide1,'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,CemVide2,'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,CemVide3,'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,CemVide4,'b');

```

```

close;

%%CemMean
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,CemMeanVide0,'b');title('Cem');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,CemMeanVide1,'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,CemMeanVide2,'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,CemMeanVide3,'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,CemMeanVide4,'b');

%%Istator A
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,IabcsVide0(:,1),'b');title('Istator
A');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,IabcsVide1(:,1),'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,IabcsVide2(:,1),'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,IabcsVide3(:,1),'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,IabcsVide4(:,1),'b');

close;

%%Istator C
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,IabcsVide0(:,3),'b');title('Istator
C');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,IabcsVide1(:,3),'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,IabcsVide2(:,3),'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,IabcsVide3(:,3),'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,IabcsVide4(:,3),'b');

close;

%%Rend
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,RendVide0,'b');title('Rend');axis([4 5
0 1]);
subplot(5,1,2),plot(tVide1,RendVide1,'b');axis([4 5 0 1]);
subplot(5,1,3),plot(tVide2,RendVide2,'b');axis([4 5 0 1]);
subplot(5,1,4),plot(tVide3,RendVide3,'b');axis([4 5 0 1]);
subplot(5,1,5),plot(tVide4,RendVide4,'b');axis([4 5 0 1]);

close;

%%njps
figure;grid;
hold;

```

```

subplot(5,1,1),plot(tVide0,npjsVide0,'b');title('rendement pertes
joule stator');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,npjsVide1,'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,npjsVide2,'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,npjsVide3,'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,npjsVide4,'b');

close;

%%njpr
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,npjrVide0,'b');title('rendement pertes
joule rotor');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,npjrVide1,'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,npjrVide2,'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,npjrVide3,'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,npjrVide4,'b');

close;

%%Pmec
figure;grid;
hold;
subplot(5,1,1),plot(tVide0,PmecVide0,'b');title('Puissance
mecanique');
subplot(5,1,2),plot(tVide1,PmecVide1,'b');
subplot(5,1,3),plot(tVide2,PmecVide2,'b');
subplot(5,1,4),plot(tVide3,PmecVide3,'b');
subplot(5,1,5),plot(tVide4,PmecVide4,'b');

```

**ANEXO B : Listado de archivos**  
**MATLAB/SIMULINK**



# ANEXO B: Listado de archivos Matlab/Simulink

Todos los archivos del proyecto se encuentran (originalmente) en una carpeta llamada Projet, donde se pueden encontrar los siguientes tipos de archivo:

Formato	Descripción
.m	Archivo de código Matlab, funciones.
.fig	Archivos gráficos de los datos.
.mat	Archivos de datos guardados desde Matlab
.mdl	Modelos Simulink

Organizados por grupos los archivos son los siguientes:

Archivo de parámetros:

-ParamV5.m

Archivos de modelización:

-TriMachineInt.mdl

-testDeuxMachines.mdl

-MonoMachine.mdl

Archivos de simulación y obtención de datos:

-simuPlotMono.m

-simulationsTri.m

-simulationsMono.m

-simulationsDeuxMachines.m

-MonoChangementCapa.m

Archivos de organización de la información:

-simuPlotMono.m

-plotsVideCharge.m

-plotsTriMono.m

-plotsC1C2.m

-comparaisonTriMono.m

-plotsTri.m

-plotsMono.m

plotsMono2.m



# **PRESUPUESTO**



## PRESUPUESTO:

### **1. Recursos:**

#### 1.1 Recursos Materiales:

- Ordenador portátil Toshiba Satellite
- Software Matlab con Simulink
- Espacio de trabajo y acceso a biblioteca

#### 1.2 Recursos Humanos:

- Ingeniero en Electromecánica

Que ha llevado a cabo el estudio, diseño y ensayos con el reparto de horas siguiente:

Preparación teórica	30h
Modelización con Software	150h
Ensayos y pruebas	60h
Redacción y maquetación de la documentación	60h
<b>TOTAL</b>	<b>300h</b>

### **2. Precios unitarios:**

La vida útil de los medios utilizados es de dos años y el tiempo en que se ha llevado a cabo el desarrollo del proyecto ha sido de 6 meses, por lo que el precio unitario de los recursos será una cuarta parte de su coste de compra.

#### **Material de instalación del software:**

<b>Recurso</b>	<b>Coste Unitario</b>
Portátil Toshiba Satellite	500 €
Software Matlab/Simulink	750 €

#### **Material de trabajo:**

<b>Recurso</b>	<b>Coste Unitario</b>
Acceso a biblioteca	50 €
Espacio de trabajo	50 €

#### **Salarios:**

<b>Recurso</b>	<b>Sueldo por hora</b>
Ingeniero en Electromecánica	90 €

### **3. Sumas parciales:**

<b>Recurso</b>	<b>Coste</b>
Portátil Toshiba Satellite	500 €
Software Matlab/Simulink	750 €
Acceso a biblioteca	50 €
Espacio de trabajo	50 €
<b>TOTAL Materiales</b>	<b>1350 €</b>

<b>Recurso</b>	<b>Salario</b>
Ingeniero en Electromecánica	27.000 €

### **4. Presupuesto:**

Total Materiales:	1350 €
Total Salarios:	27.000 €
Total presupuesto	28.350 €
21% I.V.A.	5953,5 €

**COSTE DEL PROYECTO: 34.303,5 €**

Ignacio García-Atance

