



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## Caracterización, obtención y validación del modelo dinámico de un motor de inducción con rotor devanado para su utilización como DFIG.

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Autor:** José Miguel Bañón Martín  
**Director:** Francisco de Asís Ruz Vila

Cartagena, 23 de mayo de 2016



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



## Índice

1. Objeto.....	6
2. Símbolos y abreviaciones .....	7
3. Motores eléctricos .....	9
3.1. Diferencias entre motores eléctricos.....	9
3.2. Motores de inducción .....	10
3.2.1. Estructura .....	10
3.2.2. Funcionamiento .....	12
3.3. Circuito equivalente .....	12
4. Normativa.....	13
4.1. Introducción .....	13
4.2. Norma UNE-EN-60034-2 .....	13
4.2.1. Objeto y campo de aplicación .....	14
4.2.2. Normas de consulta .....	14
4.2.3. Términos y definiciones .....	15
4.2.4. Símbolos y abreviaciones .....	15
4.2.5. Requisitos básicos .....	15
Categorías de ensayos.....	15
4.2.6. Incertidumbre.....	15
4.2.7. Requisitos en los ensayos.....	16
4.3. Métodos de ensayo para la determinación del rendimiento y determinación del rendimiento para máquinas de inducción .....	16
5. Caracterización del motor .....	17
5.1. Maquinaria y accesorios utilizados .....	18
5.1.1. Motor .....	18
5.1.2. Freno mecánico .....	20
5.1.3. Polímetro.....	20
5.1.4. Wattímetro trifásico.....	21
5.1.5. Fuente de continua .....	22
5.1.6. Servofreno.....	22
5.1.7. Accesorios .....	23
5.2. Medida de las resistencias del estator y rotor.....	24
5.2.1. Resistencia del estator .....	25
5.2.2. Resistencia del rotor.....	26
5.2.3. Resistencia de estator y rotor .....	27

5.3.	Relación de transformación del motor .....	27
5.4.	Ensayo de vacío .....	28
5.4.1.	Pérdidas en el cobre, mecánicas y en el entrehierro .....	30
5.4.2.	Resultados de los ensayos.....	35
5.5.	Ensayo rotor bloqueado.....	40
5.5.1.	Resultados obtenidos de los ensayos.....	43
5.6.	Ensayo de la curva de carga .....	52
	Resultados del ensayo de la curva de carga.....	54
5.6.1.	Inductancia de dispersión total.....	57
5.6.2.	Determinación de la inductancia de dispersión total a partir del ensayo de la curva de carga .....	57
5.6.3.	Inductancia de magnetización $L_m$ y tensión $U_m$ a partir del ensayo de carga. ....	63
5.6.4.	Inductancia de dispersión del estator y del rotor .....	66
5.7.	Inductancias para cálculos a flujo constante .....	69
5.8.	Ensayo de deceleración.....	71
6.	Servofreno.....	76
6.1.	Active Servo.....	77
7.	Obtención del modelo matemático del motor .....	82
7.1.	Introducción .....	82
7.2.	Modelo matemático físico de un motor de inducción.....	82
7.3.	Modelo dinámico del motor de inducción en dq.....	87
7.3.1.	Ecuaciones eléctricas y de par en la máquina generalizada .....	88
7.4.	Aplicación en motores de inducción .....	90
7.4.1.	Transformada de Clark .....	90
7.4.2.	Transformada de Park .....	90
7.4.3.	Transformada de Blondel.....	91
8.	Modelo matemático en Matlab/Simulink.....	91
8.1.	Simulación del motor mediante el modelo matemático de Matlab.....	92
8.2.	Simulación creando un nuevo modelo matemático .....	97
9.	Conclusiones.....	110
10.	Bibliografía .....	111
10.1.	Bibliografía básica .....	111
10.2.	Bibliografía complementaria.....	111
10.2.1.	Libros .....	111
10.2.2.	Apuntes .....	111
10.2.3.	Publicaciones.....	111

11.	Referencias.....	112
11.1.	Figuras .....	112
11.2.	Tablas .....	114
11.3.	Gráficas.....	115

## 1. Objeto

En este proyecto se pretende realizar la caracterización de un motor trifásico de inducción de rotor devanado. Siguiendo los pasos y especificaciones que nos indique la norma UNE.

Las máquinas eléctricas juegan un papel muy importante en la actualidad, tanto como generador como motor. Nuestro trabajo irá enfocado a una máquina de inducción ampliamente utilizada en la industria. Para entrar en contacto con el mundo de las máquinas eléctricas utilizaremos una serie de libros básicos sobre este tema, en ellos podremos encontrar los principios básicos por los que se rigen. Debemos centrarnos tras tener unos conocimientos básicos en los motores eléctricos y profundizar en los motores de inducción que es el objeto de estudio de este trabajo.

Podremos obtener la información principal sobre motores de inducción, su estructura, funcionamiento, fórmulas básicas, ensayos... Con los cuales ir teniendo una idea bastante general del trabajo que debemos realizar.

Sin embargo la información que se nos incluye en estos libros es demasiado aproximada en la mayoría de aspectos. Por lo tanto para hacer un estudio más avanzado del motor y poder obtener un modelo dinámico preciso no nos podremos basar en los pasos que se nos indican. Es por ello que debemos basarnos en informaciones mucho más específicas que nos indiquen como obtener todos los parámetros del motor necesario. Para ello tendremos que profundizar en una normativa que nos ayude a realizar los ensayos adecuadamente. Como en la bibliografía básica del trabajo a realizar se nos indica que será la UNE-60034 no tenemos que realizar ninguna elección de normativa.

La normativa UNE 60034 está dividida en diferentes partes. Como nuestro estudio debe basarse en caracterizar el motor la más importante es la parte dos de la norma. La cual se divide a su vez en tres subpartes, nos interesará la primera de ellas ya que es para los casos generales de motores recogidos en la norma UNE 60034 parte 1. Los otros dos casos son para maquinaria muy grande o bien alimentadas con convertidor. En este documento podremos encontrar de una manera muy extensa diferentes métodos para determinar las pérdidas y rendimiento de la máquina. Es por ello que será una herramienta de trabajo fundamental para nosotros.

En la UNE 60034-2-1 se recoge la información necesaria para realizar los diferentes ensayos de una manera adecuada. También nos indica como tratar los datos obtenidos en los ensayos para obtener diferentes parámetros del motor. Tanto resistencias o inductancias internas como diferentes pérdidas que se producen en el motor.

Aparte de la norma UNE 60034-2 existen otras partes de la norma que nos indican casos específicos y en algunos de ellos sobre como obtener los ensayos y valores del motor de una manera mucho más detallada. Sin embargo para nuestro tipo de motor, de inducción de rotor devanado, no existe. Pero si tenemos una normativa específica para los motores de jaula de ardilla que también son de inducción. De esta manera aunque no sea la norma dedicada a nuestro motor si nos servirá de referencia para la realización de ciertos ensayos, cuando la parte dos de la norma no nos proporcione suficiente información. La parte que hemos comentado es la 28.

Para la realización de los ensayos en el laboratorio también serán de utilidad los diferentes catálogos y manuales básicos de la empresa Lucas Nülle (Fabricante de los equipos utilizados). Ya que en ellos podremos ver diferentes conexiones del cableado, información

básica de la maquinaria utilizada así como aprovechar todos los elementos de seguridad de los que disponen los equipos. Igualmente el software “Active Servo”, de la misma empresa, será utilizado para el servofreno e incluye diferentes manuales de utilización y ejemplos de pruebas del motor.

La caracterización del motor que realizaremos siguiendo la norma UNE tiene como objetivo poder obtener más adelante el modelo dinámico del motor. Para ello se utilizará el libro “Control of electrical drives” de Werner Leonhard, en concreto el capítulo referido a “Symmetrical Three-Phase AC Machines”. En esta parte del libro nos aparecerán diferentes modelos de máquinas de corriente alterna, así como modelos específicos de máquinas de inducción dependiendo de diferentes casos. También nos servirá de apoyo los apuntes “Fundamentos del análisis dinámico de las máquinas asíncronas o de inducción” de máquinas eléctricas del departamento de electricidad de la UPCT. Una vez tengamos la información necesaria para saber el modelo dinámico de un motor de inducción adaptaremos los resultados de la caracterización de nuestro motor para obtener el suyo.

A la hora de conseguir el modelo dinámico también tendremos que ver el que nos da la herramienta de trabajo Matlab. Ya que contiene su herramienta de simulación “Simulink” y en ella se encuentran modelos de motores eléctricos. Y nos servirán como base para nuestro estudio además de ser utilizado después para la validación del modelo.

## 2. Símbolos y abreviaciones

C	Constante de deceleración
$\cos\varphi$	Es el factor de potencia
f	es la frecuencia de alimentación en Hz
I	Es la intensidad media de línea en A
J	Inercia
$k_{\theta}$	es el factor de corrección de temperatura
L	Inductancia
n	es la velocidad de funcionamiento en $s^{-1}$
p	es el número de pares de polos
P	es la potencia en W
$P_0$	es la potencia de entrada en vacío en W
$P_1$	Potencia de entrada, excluyendo excitación en W
$P_2$	Potencia de salida en W
$P_b$	Pérdidas en las escobillas
$P_{cu}$	Pérdidas en el cobre

$P_{fe}$	son las pérdidas en el hierro, W
$P_{fw}$	Pérdidas de rozamiento y ventilación
$P_L$	son pérdidas en carga, W
$P_C$	Pérdidas constantes, W
$P_{LL}$	Pérdidas de carga adicionales
$P_T$	son las pérdidas totales, W
$R$	Resistencia del devanado, $\Omega$
$R_{ll}$	resistencia media entre fases, $\Omega$
$s$	es el deslizamiento, en valor por unidad de la velocidad síncrona
$T$	es el par de la máquina en N·m
$U$	es la tensión media en bornes, V
$U_0$	es la tensión en vacío en bornes, V
$U_N$	es la tensión asignada en los bornes, V
$T$	Par
$X$	es la reactancia, $\Omega$
$Z$	Impedancia, $\Omega$
$\psi$	Flujo magnético

Hay una serie de subíndices que se usarán repetidamente con algunos de los valores anteriores y son:

a,b,c	Referidas a cada fase del motor
D,Q	Referidas a las coordenadas d-q del estator
d,q	Referidas a las coordenadas d-q del rotor
SS	Estator con respecto a estator
SR	Estator con respecto a rotor
RS	Rotor con respecto a estator
RR	Rotor con respecto a rotor
ts	Total del estator
$\sigma_s$	Dispersión del estator
$\sigma_r$	Dispersión del rotor
$t\sigma$	Dispersión total

M	Mutua o magnetización
i	inicial
e	Carga
r	Resistente
fe	Hierro

### 3. Motores eléctricos

#### 3.1. Diferencias entre motores eléctricos

Nuestro estudio se basa en un motor de inducción de rotor devanado que nos servirá de ejemplo de como realizar la caracterización de uno de los motores más utilizados en la industria. Se estima que entorno al 80% son motores de inducción. Esto tiene diferentes razones que vamos a explicar a continuación.

En un comienzo de los motores eléctricos, el uso de la corriente continua fue el más utilizado debido a su fácil control. Teniendo como ventaja un control sencillo y una estructura fácil de entender. Como inconvenientes tenía un alto mantenimiento y no era adecuado para ambientes muy limpios.

Los motores de alterna presentan como principal ventaja tener un precio más bajo que normalmente es a partir de los 325Wattios, que serán la mayor parte de aplicaciones industriales importantes. Además de una operación muy fiable con un mantenimiento muy bajo. Condiciones que lo hacen mucho mejor que un motor de continua. Como desventajas tienen el no poder trabajar a velocidades muy bajas (1/3 de la velocidad base) por problemas térmicos. Algunos efectos que se producen en el motor como pueden ser las corrientes de Eddy. Y por último un control más complejo.

Sin embargo la mayor desventaja que siempre habían tenido los motores de inducción, un control complejo, se ha ido reduciendo debido al gran avance de la electrónica lo que nos permite un control muy preciso.

Los motores síncronos por su parte tendrán uso pero para aplicaciones normalmente inferiores a las 300 revoluciones por minuto. En estos casos su coste es inferior a los de inducción.

Por tanto llegamos a la conclusión de que el alto uso de los motores de inducción se debe principalmente a su coste y a la viabilidad actual para controladores complejos. Su coste es mejor a partir de 325Wattios lo que es una potencia baja para la industria. Además suelen ser más rentables que un motor síncrono a partir de las 600 revoluciones por minuto, y de un valor similar de las 300 a 600. Estas condiciones lo hacen el tipo de motor eléctrico más usado con entorno al 80%.

## 3.2. Motores de inducción

El motor de inducción como toda máquina eléctrica está constituido por uno o varios circuitos acoplados magnéticamente. Teniendo una parte fija, estator, y una parte móvil, rotor.

Este tipo de motores es uno de los motores más utilizados industrialmente, se estima que en torno al 80% de los motores eléctricos utilizados son de este tipo. Este éxito se debe a que son motores de construcción simple y al mismo tiempo son bastante robustos. También tiene un fácil mantenimiento.

Su principal inconveniente radicaba en la dificultad de regular la velocidad ya que dependía de la frecuencia. Y por ello solían ser sustituidos por motores de corriente continua. Pero los grandes avances en electrónica de potencia han hecho que este problema ya no exista. Debido a que actualmente mediante diferentes elementos podemos variar la frecuencia de la red a la que deseemos de manera mucho más sencilla que antiguamente.

### 3.2.1. Estructura

Como ya hemos denominado anteriormente el motor consta de una parte fija (estator) y otra móvil (rotor). En el estator se aplicará directamente la red para que este sea el inductor. Y el rotor por tanto será el inducido, las corrientes que circularán por él se deberán a la interacción de flujos con el estator.

El estator podríamos denominarlo como las partes fijas de la máquina que tienen la función de sostener la máquina. Pero ante todo también es la parte que incluirá los devanados inductores o primarios. Estará formado normalmente por chapas de acero de silicio con unas ranuras en su periferia interior en las que se incluirá un devanado trifásico distribuido. Es decir, se pondrán tres devanados- principales interconectados entre sí.



*Figura 1: Estator. Imagen obtenida en el proyecto "Diagnóstico en tiempo real de fallos en motores eléctricos alimentados desde variadores de frecuencia mediante inyección de una señal de alta frecuencia" De la Universidad de Oviedo.*

Aunque el estator no tiene cambios prácticamente comparado con el motor síncrono si lo tendrá el rotor, que presentará unas características diferentes. Tendremos dos tipos:

- Rotor de jaula de ardilla, este tipo tendrá una estructura que constará con una serie de barras conductoras dispuestas dentro de unas ranuras labradas dentro de grandes anillos denominados de cortocircuito. Este rotor no tendrá conexión directa con el exterior. Y su nombre proviene de que sus conductores si los vemos por si solos tienen similitud con las ruedas donde corren los hámsters o ardillas.

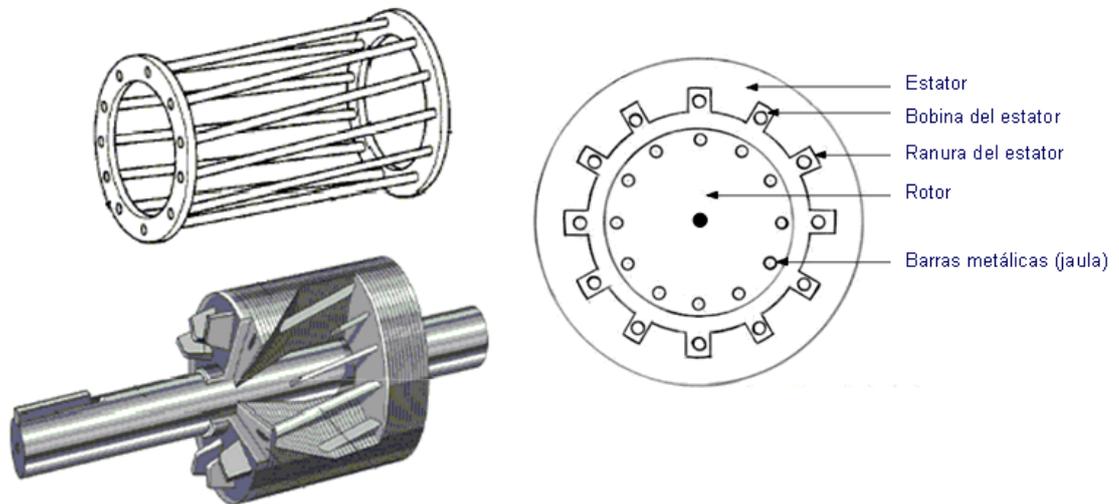


Figura 2: Rotor jaula de ardilla. Imagen obtenida de la web <http://www.tuveras.com>

- Por otra parte tenemos el rotor devanado o con anillos que tendrá un arrollamiento trifásico similar al que hemos visto en el estator. Con esta distribución tenemos accesible el rotor. Y también podemos añadirle resistencias para limitar las corrientes de arranque.

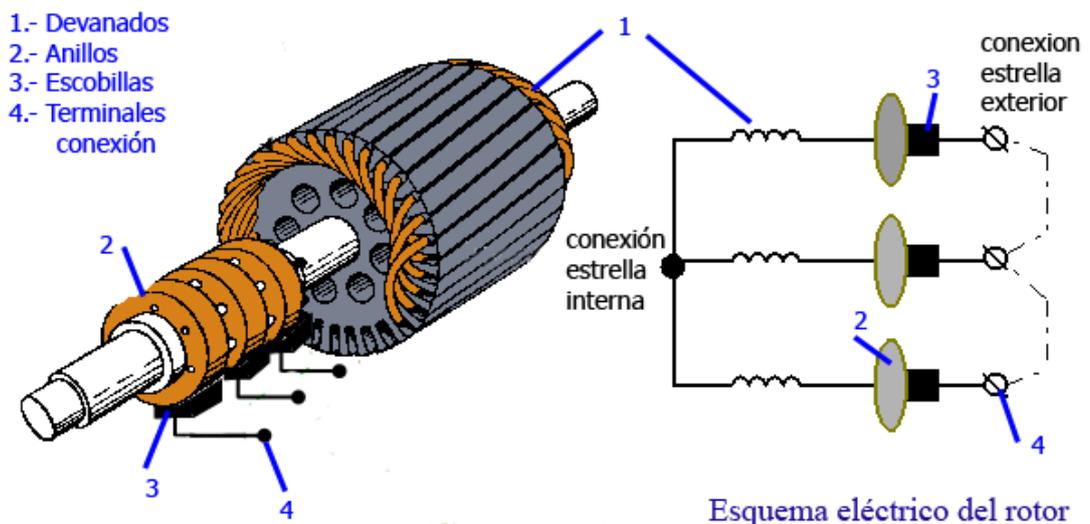
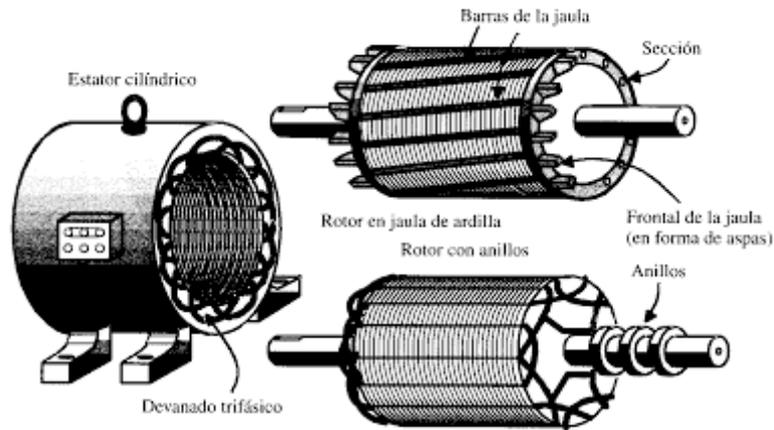


Figura 3: Rotor devanado o de anillos. Imagen obtenida de la web "<http://apuntescientificos.org>"

Las máquinas asíncronas aparte de disponer de estos dos elementos, tendrán otros elementos mecánicos para que se pueda llegar a dar el funcionamiento del motor. Estos son tapas o cubos, rodamientos, carcasas.



Tipos de máquinas asíncronas o de inducción.

Figura 4: Despiece de elementos de ambos tipos de motores. Imagen obtenida del blog <http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com.es>

### 3.2.2. Funcionamiento

El funcionamiento de un motor de inducción trifásico se basa en la conexión de sus devanados a la red equilibrada. Lo que provoca la circulación de corrientes trifásicas por ellos, que crean un campo magnético giratorio prácticamente senoidal. Teniendo entonces una velocidad angular o también conocida como de sincronismo.

El campo del estator junto a las corrientes del rotor produce un par de giro. El sentido del par de giro será tal que intentará oponerse a la causa que lo ha producido. Si finalmente dejamos que el rotor pueda girar libremente acabará acelerándose poco a poco. Sin embargo cuando empieza este movimiento la carga también provoca un par resistente que depende de la velocidad. Es por ello que la velocidad del rotor y el campo no pueden ser iguales. Ya que se anularían entre ellas y se reduciría la velocidad del motor. Es por ello que el motor gira de manera asíncrona, normalmente del 90 al 99% de la velocidad de sincronismo.

### 3.3. Circuito equivalente

Los motores de inducción tienen inducciones hacia el rotor como hemos comentado anteriormente. Normalmente la relación que existe es de tipo transformadora. Por ello el circuito equivalente por fase tenemos es muy similar al transformador. Tan solo tendrá una fuente de excitación. El modelo que se nos queda será el siguiente:

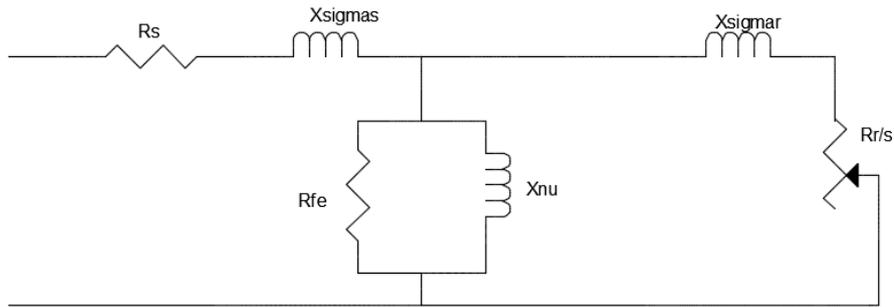


Figura 5: Circuito equivalente de un motor de inducción

Sin embargo el circuito anterior es bastante teórico. Esto se debe a que en la realidad nos encontramos con una serie de pérdidas aparte de las que hemos visto en este circuito equivalente que es el ideal. Pero nos servirá para tener una idea aproximada del funcionamiento del motor.

## 4. Normativa

### 4.1. Introducción

A la hora de realizar un trabajo de estas características podemos basarnos en diferentes normativas. En nuestro caso la elección es sencilla, por un lado el proyecto incluye como bibliografía básica normativa UNE (Una Norma Española) y por otro es para trabajo fin de grado realizado en España. Este tipo se engloba dentro de toda una serie de normas conjuntas en la unión europea. Un punto importante sobre las normas UNE, es no ser de obligado cumplimiento pero si recomendado. Por lo tanto a nivel nacional surgen legislaciones que como mínimo son igual de exigentes que la norma UNE. Sin embargo para el estudio realizado no existe legislación exacta, sin embargo es recomendado y común seguir la UNE para evitar problemas en las máquinas y accidentes.

Aparte de la normativa UNE, existe también la IEEE que también es muy extendida sobre todo en los países anglosajones. En nuestro caso no vamos a seguirla. Aunque sus recomendaciones suelen ser muy similares.

### 4.2. Norma UNE-EN-60034-2

La normativa principal a utilizar será la UNE 60034-2. La cual se encarga de los cálculos de rendimiento de motores dividiéndose en tres partes:

- 60034-2-1 → Máquinas ensayadas normalmente en carga
- 60034-2-2 → Máquinas grandes que los métodos anteriores serían poco económicos
- 60034-2-3 → Para máquinas alimentadas con convertidor.

Nuestro caso será el estudio de máquinas ensayadas normalmente en carga aunque en esta misma normativa se incluyen ensayos de vacío y otros tipos. Por lo tanto extenderemos a continuación más información de la normativa 60034-2-1

#### 4.2.1. Objeto y campo de aplicación

Esta norma forma parte de la IEC 60034 y está destinada a indicar los ensayos para determinar rendimientos además de métodos específicos para obtener pérdidas específicas.

Es de aplicación tanto a máquinas de corriente continua como alterna (Síncronas y asíncronas) dentro de los tamaños de la norma IEC 60034-1. Por lo tanto a nosotros nos interesará la parte que indica los ensayos para las máquinas asíncronas.

#### 4.2.2. Normas de consulta

La propia normativa nos indica algunas normas de consulta que podrían sernos de interés en algunos aspectos. Son las siguientes:

- IEC 60027-1 : Símbolos literales utilizados en electrotecnia. Parte 1: Generalidades
- IEC 60034-1: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento.
- IEC 60034-2A : Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2: Métodos para la determinación de las pérdidas y del rendimiento de las máquinas eléctricas rotativas a partir de los ensayos (Excepto máquinas para vehículos de tracción). Primer suplemento: Medida de las pérdidas por el método calorimétrico.
- IEC 60051-1: Instrumentos de medida eléctricos con indicación analógica por acción directa y sus accesorios. Parte 1: Definiciones y requisitos generales comunes a todas las partes.
- IEC 60034-29

No hemos tenido en cuenta para las normas de consulta aquellas que fueran para máquinas síncronas o motores de corriente continua. Y en adición a las normas indicadas en la UNE 60034-2-1 también tendremos como norma de consulta:

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

Debido a que el motor de jaula de ardilla y de rotor devanado son ambos de inducción comparten muchas características y similitudes. Y por tanto también será de interés esta normativa debido a que no existe una concreta orientada a los motores de inducción de rotor devanado. En esta norma se explica con más claridad algunas de los ensayos que vamos a realizar. La estructura de esta norma es similar a la 60034-2.1, tan solo resumiendo los apartados comunes y expandiendo el cálculo en los ensayos más comunes, por lo que no vamos a extender su explicación.

### 4.2.3. Términos y definiciones

La normativa 60034-2-1 que estamos estudiando se aplican los términos y definiciones de las normas IEC 60034-1 y 60051-1. Además de incluir algunas propias en el artículo 3. Algunos de los que nos interesan serán los ensayos de circuito equivalente, ensayo de vacío o rotor bloqueado. Además de la definición de una serie de pérdidas especiales.

### 4.2.4. Símbolos y abreviaciones

La normativa nos indica una serie de símbolos y abreviaciones utilizadas, en este proyecto se intentará hacer referencia de la misma manera a nuestros valores de estudio. Igualmente se contará con un apartado sobre símbolos y abreviaciones propias que se podrá consultar para ver si existen diferencias.

### 4.2.5. Requisitos básicos

#### Categorías de ensayos

Los ensayos podremos dividirlo en las siguientes categorías, las cuales serán utilizadas dependiendo del objeto de nuestro estudio.

- Entrada-salida
- Entrada-salida con dos máquinas en oposición
- Medir pérdidas reales en situaciones particulares
  - Pérdidas totales
  - Pérdidas separadas

En cada una de las categorías mencionadas se distinguirá dependiendo del motor eléctrico que tengamos. Nuestro estudio se realiza sobre un motor de inducción de rotor devanado. Por lo tanto debemos fijarnos en los apartados referidos a inducción.

En nuestro proyecto en primer lugar vamos a realizar mediciones de pérdidas reales, ya que el objeto de nuestro estudio en primer lugar es la determinación de los parámetros del motor. Y por tanto buscaremos las pérdidas separadas mediante el método del circuito equivalente. Que aunque tiene una incertidumbre media-alta nos será válida para comenzar el estudio. Y con los resultados obtenidos podremos completar los parámetros del circuito equivalente.

### 4.2.6. Incertidumbre

La norma nos indica tres niveles de incertidumbre para el rendimiento final obtenido dependiendo de la obtención de los valores:

- “Baja” si el rendimiento se basa en resultados de ensayos
- “Medio” Si se basa en aproximaciones limitadas

- “Alta” Si se basa en hipótesis

Así mismo la propia normativa nos indica unas tablas de los métodos preferentes para cada tipo de motor. Así como su incertidumbre.

#### 4.2.7. Requisitos en los ensayos

Los requisitos que se deben cumplir en los ensayos para realizarlos son los siguientes

- **Tensión de alimentación:** Debe cumplirse lo estipulado en los puntos 7.2 y 8.3.1 de la normativa IEC 60034-1.
- **Frecuencia:** La frecuencia debe estar en torno al +/- 0.3% de la asignada durante las medidas. Excepto en caso de circuito equivalente que es nuestro caso por lo tanto este punto no es necesario cumplirlo. Aunque siempre será aconsejable tener valores lo más cercanos posibles al asignado.
- **Instrumentación:** Los instrumentos deben ser lo más precisos posibles teniendo un valor mínimo de precisión de 0,2 con respecto a la norma IEC 60051.
- **Unidades:** Deben estar referidas al sistema internacional a no ser que se especifique lo contrario.
- **Resistencia:** También nos indica los pasos necesarios a realizar para la medida de las resistencias de motor dependiendo del tipo que tengamos.

### 4.3. Métodos de ensayo para la determinación del rendimiento y determinación del rendimiento para máquinas de inducción

El artículo 6 y 8 de la UNE-60034-2-1 ya empieza a explicarnos de una manera más avanzada los ensayos que debemos realizar, los métodos para determinar rendimientos o para obtener diferentes valores del motor. Los métodos utilizados se extenderán cuando se realicen en su apartado correspondiente de la memoria para evitar duplicidades. A continuación como resumen dejamos la tabla que nos da la propia normativa para ensayos en máquinas de inducción:

Tabla 2 – Máquinas de inducción

Método	Apartado	Método preferente	Dispositivos requeridos	Incertidumbre
<b>Directo</b>				
Medición de par	8.1.1	Para todas las monofásicas y polifásicas $\leq 1$ kW	Medidor de par / dinamómetro para plena carga	Baja
Ensayo de máquina calibrada	Anexo D		Máquina calibrada	Véase la nota 4
Ensayo en oposición con doble alimentación	8.1.2		Conjunto de máquinas para plena carga. Dos unidades idénticas	Baja
<b>Pérdidas totales</b>				
Método calorimétrico	Anexo D		Envolvente térmica especial	Véase la nota 4
Ensayo en oposición con alimentación única	8.2.1		Dos unidades idénticas (rotor bobinado)	Baja
<b>Suma de pérdidas, con y sin ensayo en carga</b>				
$P_{LL}$ determinada a partir de las pérdidas residuales	8.2.2.5.1	Trifásicas > 1 kW hasta 150 kW	Medidor de par / dinamómetro para $\geq 1,25 \times$ plena carga	Baja
$P_{LL}$ a partir del valor asignado	8.2.2.5.3			Media a alta
$P_{LL}$ a partir de los ensayos de rotor extraído y rotación inversa	8.2.2.5.2		Motor auxiliar con potencia asignada $\leq 5 \times$ pérdidas totales $P_T$	Alta
$P_{LL}$ a partir del ensayo Eh-estrella	8.2.2.5.4	(Véase la nota 3)	Resistencia para el 150% de la corriente de fase asignada	Media
<b>Suma de pérdidas, sin ensayo en carga</b>				
Corrientes, potencias y deslizamiento a partir del método de circuito equivalente $P_{LL}$ a partir del valor asignado	8.2.2.4.3		Si el equipo de ensayo para otros ensayos no está disponible (sin posibilidad de aplicar la carga asignada, ni de segunda máquina)	Media / alta
<p>NOTA 1 Debido a imprecisiones de la medición, la determinación de <math>P_{LL}</math> a partir de las pérdidas residuales se limita a coeficientes de correlación (véase 8.2.2.5.1.2) superiores a 0,95 y puede tener incertidumbres del rendimiento determinado superiores a <math>\pm 0,5\%</math>.</p> <p>NOTA 2 En la columna "Incertidumbre", "Baja" indica un procedimiento que determina todos los componentes de pérdidas a partir de ensayos; "Media" indica un procedimiento que se basa en un modelo físico simplificado de la máquina; "Alta" indica un procedimiento que no determina todos los componentes de pérdidas a partir de ensayos.</p> <p>NOTA 3 El método para <math>P_{LL}</math> a partir del ensayo Eh-estrella es adecuado para motores entre 1 kW y 150 kW; para características asignadas superiores está en estudio. El método requiere que el devanado pueda conectarse en estrella.</p> <p>NOTA 4 Incertidumbre a determinar.</p>				

Tabla 1: Ensayos para motores de inducción según normativa UNE-EN-60034-2-1

## 5. Caracterización del motor

Una vez estudiado los puntos más generales de la normativa vamos a proceder a realizar la caracterización del motor. Para ello nos basaremos en las normas ya mencionadas. Además de utilizar una serie de instrumentos y máquinas en el laboratorio. Con este estudio lo que pretendemos conseguir son los valores de las principales magnitudes eléctricas y mecánicas que tiene el motor eléctrico. Y gracias a ello poder simular más adelante un modelo matemático con herramientas informáticas.

La idea de realizar la caracterización de un motor puede ser por diferentes motivos. Por un lado puede ser el propio fabricante el que necesite realizar pruebas para comprobar que se cumplen los parámetros diseñados. Pero también puede resultar útil en las industrias donde se encuentran. Esto se debe a que con el tiempo pueden variar algunas de sus características lo

que puede ser conveniente modificar mínimamente el control para poder obtener un mejor rendimiento. Incluso en caso de que el fabricante no nos indique todos los parámetros del motor ya que en ciertas industrias necesitarán utilizar un motor de una manera no convencional.

Para proceder al cálculo de todos los valores necesarios vamos a ir realizando ensayos y con ellos ir obteniendo valores importantes para nuestro estudio. Seguiremos un orden muy similar al que nos proponer la normativa UNE-EN-60034-28.

A la hora de realizar los ensayos hemos decidido repetirlos tres veces cada uno. Para así evitar el mayor número de fallos posible. Por otro lado se ha esperado en la mayoría de casos de un día a otro para realizar las pruebas. De esta manera se ha intentado evitar que calentamientos de un ensayo anterior afectaran a los resultados.

## 5.1. Maquinaria y accesorios utilizados

### 5.1.1. Motor

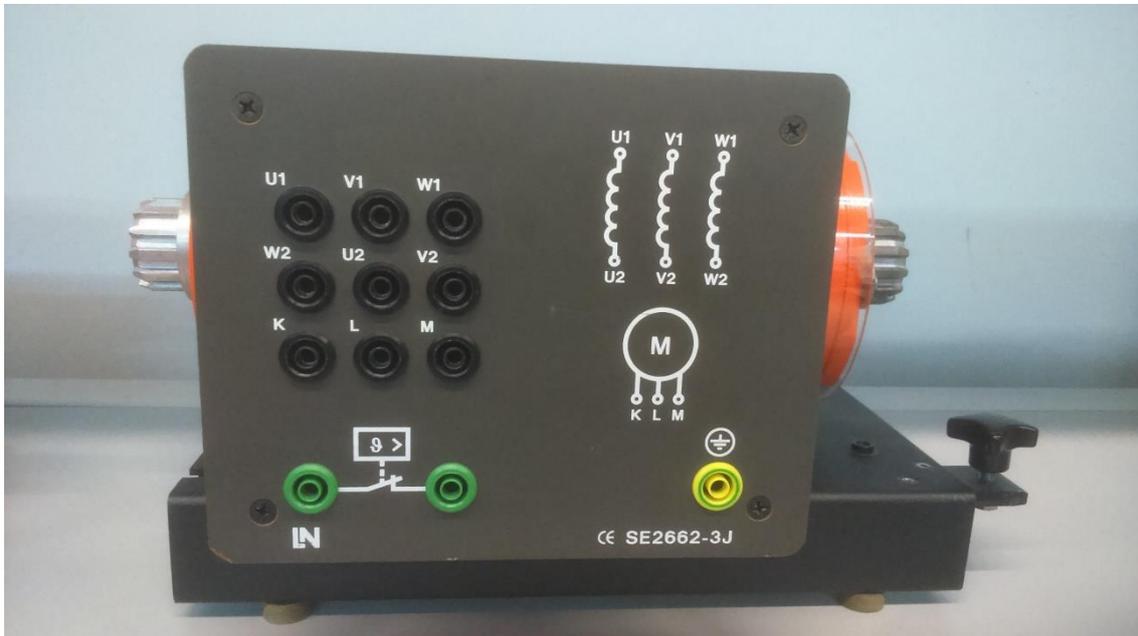


Figura 6: Motor de inducción del estudio



Figura 7: Motor de inducción del estudio



Figura 8: Chapa de características del motor

El motor a estudiar es de la marca Lucas Nülle de tipo trifásico y multifuncional siendo de rotor devanado. Tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión nominal: 400/230V . 50Hz
- Intensidad nominal: 1,16/2
- Velocidad nominal: 1420/1500 rpm
- Potencia nominal: 0.27kW
- Factor de potencia: 0.72
- Dimensiones: 340x210x210 mm (Ancho \* alto \* Profundidad)
- Peso: 10kg

### 5.1.2. Freno mecánico

Uno de los elementos que usaremos para nuestro estudio será un freno mecánico. Principalmente usado para los ensayos de rotor bloqueado. Lo preferimos a frenos o servofrenos de otro tipo ya que para conseguir una velocidad de rotación nula es el que mejor comportamiento presenta y no tiene problemas de recalentamientos.



*Figura 9: Freno mecánico*

### 5.1.3. Polímetro

El polímetro a utilizar será de tipo digital con 4 dígitos. No hemos estudiado las propiedades del polímetro, debido a que dentro de las normativas que deben cumplir las herramientas de medida podemos denominarlas suficientes. Y los 4 dígitos del polímetro son suficientes para las medidas que obtenemos. Ya que la variación del tercer o cuarto dígito no producen variaciones importantes en nuestros cálculos.



Figura 10: Polímetro digital

#### 5.1.4. Wattímetro trifásico

Como el motor con el que trabajamos es trifásico, nos será de gran ayuda un wattímetro de este tipo. Para evitar tener conexiones de varios monofásico o bien varios polímetros. Es por ello que utilizamos uno de tipo trifásico digital también con 4 dígitos. Lo que nos da suficiente precisión en los resultados.



Figura 11: Wattímetro digital. Displays. Y control.



Figura 12: Wattímetro digital. Bornes de conexión

#### 5.1.5. Fuente de continua

La normativa nos pide que para medir las resistencias lo hagamos mediante una fuente de continua. Nosotros utilizamos el modelo EXR355 de la marca TTI. Que nos dará una señal de continua de 0 a 35V y de 0 a 5 A. Lo que es suficiente para nuestro estudio.



Figura 13: Fuente de tensión continua.

#### 5.1.6. Servofreno

Para los casos en los que estemos interesados en controlar la velocidad de manera exacta el freno mecánico no nos servirá. Es por ello que utilizamos un servofreno con equipo de control.

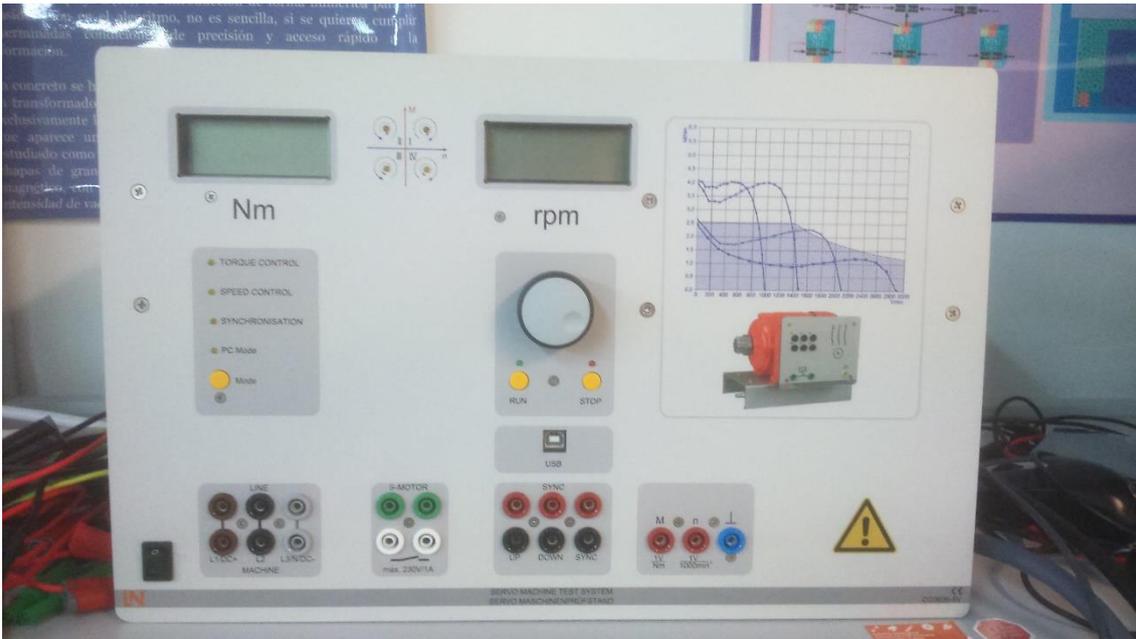


Figura 14: Unidad de control del servofreno

### 5.1.7. Accesorios

Utilizaremos cables adecuados (mirar tipo)

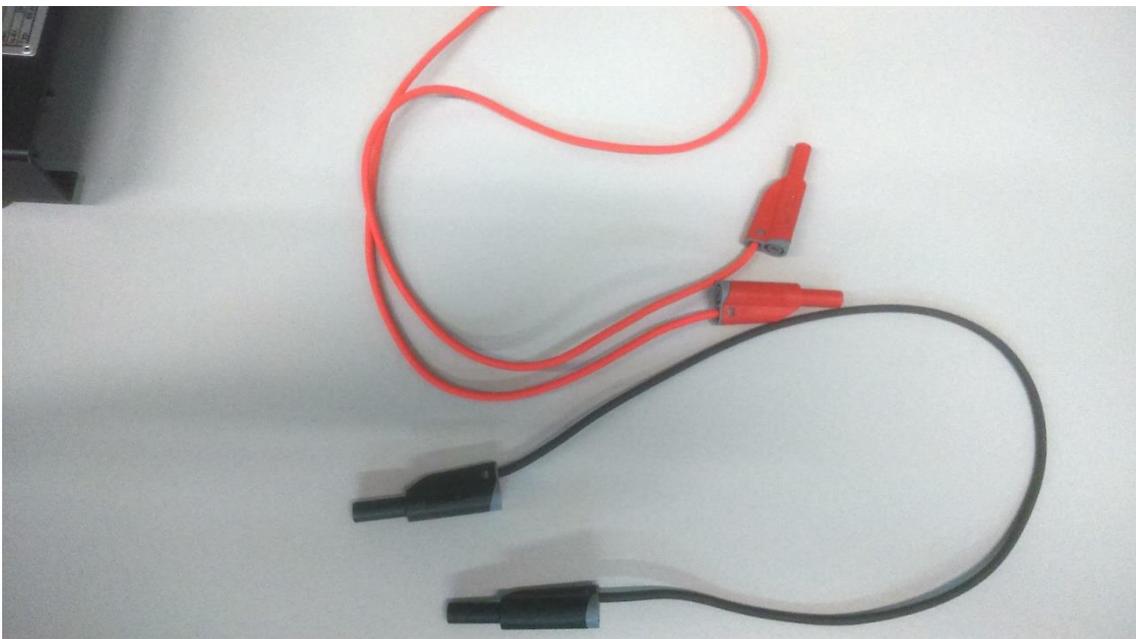


Figura 15: Cables de conexión del motor

En las siguientes imágenes veremos un elemento acoplador para conectar el eje al servofreno por ejemplo. Y por otro lado un componente de protección para evitar que se pueda acceder al eje cuando el motor está en marcha. En aplicaciones para el servofreno por ejemplo es un elemento obligatorio, sino se bloquea el control del servofreno.



Figura 16: Acoplamiento y protección para el motor.

## 5.2. Medida de las resistencias del estator y rotor

El primer ensayo a realizar será tan solo medir las resistencias del estator y rotor. Para medirlas, debido a que nuestro motor tiene la posibilidad de la conexión de los bornes desde U1 a U2, V1 a V2 y W1 a W2 podemos realizar la medición directamente sobre las mismas. Sin necesidad de calcular la resistencia de U a V y operar sobre ella dependiendo si está en estrella o triángulo.

Para poder realizar una buena medición deberemos realizar las mediciones aplicando una tensión continua sobre el devanado que se quiere medir. Y con la tensión e intensidad obtenidos realizar la ley de ohm para obtener la resistencia del estator. De esta manera seguiremos la normativa que nos indica la UNE 60034-2-1 en el apartado 5.7 que nos redirige a la UNE 60034-1. En caso de medir con un polímetro directamente podemos cometer errores debido a la parte inductiva.

En el caso del rotor debemos realizar el mismo procedimiento. Ya que en nuestro motor el rotor está accesible. Lo que no ocurre en otros casos. Sin embargo solo tendremos acceso a 3 de los 6 bornes del rotor. Por lo que las medidas obtenidas tendremos que rectificarlas para que realmente sean resistencias por fase.

Además deberemos rectificar la medición debido al efecto pelicular, que indica que la acumulación de la corriente se realiza de diferente manera en corriente continua y alterna.

La conexión del estator se hará según indican los esquemas siguientes. En el caso del estator se hará con U1-U2, V1-V2 y W1-W2 en el caso del rotor se hará con K-L, L-M y M-K. En los esquemas solo aparecerá la medición de una fase por simplicidad

Fuente de continua

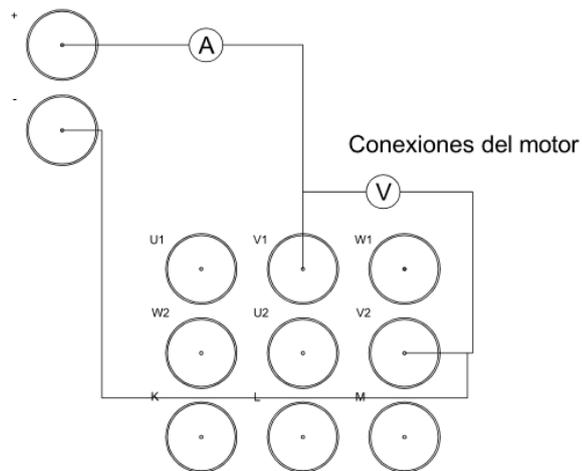


Figura 17: Conexión para la medición de la resistencia del estator

Fuente de continua

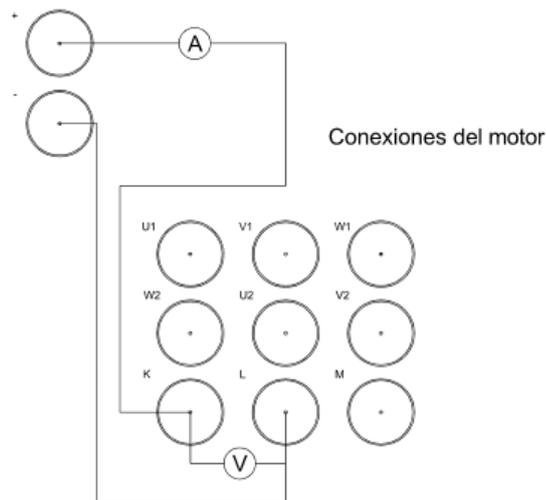


Figura 18: Conexión para la medición de la resistencia del rotor

### 5.2.1. Resistencia del estator

#### Ensayo 1

Tensión (V)	Intensidad (mA)	R( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )(50 Hz)
2,229	56,600	39,382	43,320
2,228	56,700	39,295	43,224
2,228	56,700	39,295	43,224
	<b>Promedio</b>	<b>39,324</b>	<b>43,256</b>

Tabla 2: resistencia del estator

### Ensayo 2

Tensión (V)	Intensidad (mA)	R( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )(50 Hz)
2,015	51,100	39,432	43,376
2,014	51,100	39,413	43,354
2,013	51,200	39,316	43,248
	<b>Promedio</b>	<b>39,387</b>	<b>43,326</b>

Tabla 3: Resistencia del estator

### Ensayo 3

Tensión (V)	Intensidad (mA)	R( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )(50 Hz)
2,009	51,600	38,934	42,828
2,011	51,600	38,973	42,870
2,001	51,600	38,779	42,657
	<b>Promedio</b>	<b>38,895</b>	<b>42,785</b>

Tabla 4: Resistencia del estator

### 5.2.2. Resistencia del rotor

Tensión (V)	Intensidad (mA)	R( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )(50 Hz)
1,017	144,900	7,019	7,720
1,045	128,000	8,164	8,980
1,036	132,400	7,825	8,607
	<b>Promedio:</b>	<b>7,669</b>	<b>8,436</b>

Tabla 5: Resistencia del rotor

### Ensayo 2

Tensión (V)	Intensidad (mA)	R( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )(50 Hz)
0,978	80,200	12,195	13,414
0,963	93,500	10,299	11,329
0,972	83,200	11,683	12,851
	<b>Promedio:</b>	<b>11,392</b>	<b>12,531</b>

Tabla 6: Resistencia del rotor

### Ensayo 3

Tensión (V)	Intensidad (mA)	R( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )(50 Hz)
0,907	87,400	10,378	11,415
0,904	88,400	10,226	11,249
0,914	84,400	10,829	11,912
	<b>Promedio:</b>	<b>10,478</b>	<b>11,526</b>

Tabla 7: Resistencia del rotor

#### 5.2.3. Resistencia de estator y rotor

El resultado de las resistencias después de realizar un promedio es el siguiente:

Resistencia del estator	Resistencia del rotor
43,122	10,831

Tabla 8: Resistencias de estator y rotor

#### 5.3. Relación de transformación del motor

No tenemos métodos matemáticos que nos indiquen la relación de transformación que existe en el bobinado del motor. En muchos casos se suelen utilizar valores típicos según el motor que se utilice. Nuestro motor es de rotor devanado y eso nos da ciertas ventajas a la hora de poder acceder a medidas directas del bobinado, como es este caso. Debido a que tenemos abierto los 6 terminales del estator y 3 del rotor, podemos hacer trabajar al motor como transformador si dejamos abierto el rotor. Y de esta manera sacar la relación de transformación que existe entre cada bobinado aplicando una tensión en el estator que se verá transformada en el rotor. A la hora de tomar las medidas se debe tener en cuenta que la tensión tiene una variación dependiendo si está o no en los picos de tensión. La normativa no indica nada al respecto de como hacer esta medición, solo nos indica valores que se pueden tomar en caso de no tenerla del fabricante. Siguiendo un poco el funcionamiento de otro tipo de ensayos se ha elegido, tomar varias mediciones a diferentes tensiones.

Los ensayos nos han dado los siguientes resultados:

#### Ensayo 1

Tensión estator	Tensión rotor	Relación
74,30	18,92	3,93
154,40	39,26	3,93
205,20	51,70	3,97
261,30	65,60	3,98
323,80	80,10	4,04
376,30	90,70	4,15
	<b>Promedio:</b>	<b>4,00</b>

Tabla 9: Relación de transformación estator-rotor

### Ensayo 2

Tensión estator	Tensión rotor	Relación
71,70	18,21	3,94
149,80	38,17	3,92
201,90	50,90	3,97
259,30	65,00	3,99
323,50	80,10	4,04
370,80	90,00	4,12
	<b>Promedio:</b>	4,00

Tabla 10: Relación de transformación estator-rotor

### Ensayo 3

Tensión estator	Tensión rotor	Relación
67,80	17,22	3,94
146,00	37,18	3,93
201,80	50,80	3,97
256,00	64,30	3,98
318,30	78,90	4,03
371,80	90,00	4,13
	<b>Promedio:</b>	4,00

Tabla 11: Relación de transformación estator-rotor

El resultado en las pruebas es bastante homogéneo y podemos decir que la relación de transformación es de 4.

## 5.4. Ensayo de vacío

El ensayo de vacío es uno de los más conocidos. Consiste simplemente en hacer funcionar el motor con alimentación nominal pero sin ninguna carga. Por lo que el circuito equivalente se reduce y será más sencillo obtener algunos parámetros. Al no tener carga, toda la potencia consumida serán pérdidas.

Conectamos el motor a tensión y frecuencia asignadas y las medidas mediante un wattímetro digital. Siguiendo la normativa UNE 60034-2-1-2009 en su punto 6.4.2.2. La medición realizada tenemos que esperar que se estabilice. Y cumpliendo la norma, nos indica que se considera estabilizada cuando la variación en 30 minutos no cambia más de un +-3%.

Además de nuevo la norma UNE 60034-2-1-2009 en su punto 6.4.2.3. Realizando las mismas conexiones que en el caso anterior vamos a ir tomando medidas desde un 125% de la tensión hasta un 20% de manera descendente. La norma nos indica un mínimo de 4 medidas del 125% al 50% y otras 3 mínimo de 50% a 20%. Tomando en cada intento I0, U0, P0, R0. En el

laboratorio no podemos subir la tensión a más de 380-390V por lo que no pasaremos de la tensión nominal. Pero si tomaremos más medidas en el rango que tenemos acceso.

La conexión del motor será medida mediante un wattímetro, y las conexiones serán como se indican a continuación. Cada amperímetro y voltímetro se refiere a una fase, y en la realidad la parte negativa se han conectado de manera común. En este caso no hay ninguna carga.

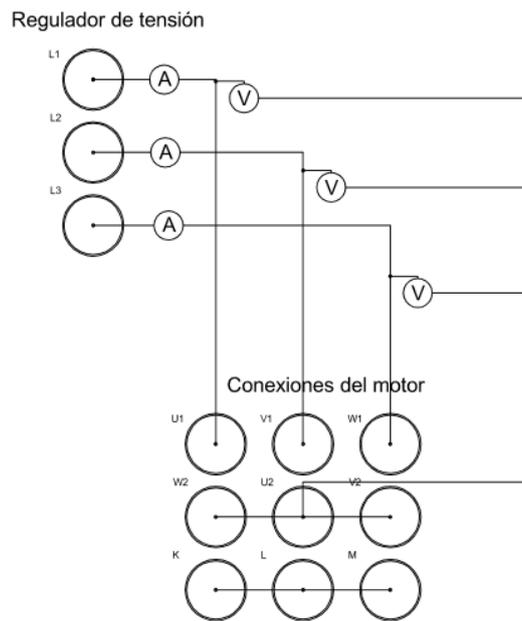


Figura 19 Conexión del motor en el ensayo de vacío

### Ensayo 1

Estado Un	U0 (V)	I0(A)	P0(W)
1	223,53	0,78	109,50
0,9	201,40	0,59	74,10
0,8	177,60	0,45	53,20
0,7	156,40	0,37	42,70
0,6	133,07	0,30	33,50
0,5	111,40	0,24	27,57
0,45	100,93	0,22	25,52
0,4	88,90	0,20	23,18
0,3	67,10	0,17	20,56
0,25	55,97	0,17	20,16

Tabla 12: Tabla de resultados tras el ensayo 1 de vacío

El valor de  $R_0$ , medido tras el último ensayo nos da: 37.6 ohmios

### Ensayo 2

Estado Un	U0 (V)	I0(A)	P0(W)
1	218,10	0,73	97,50
0,9	197,20	0,56	67,60
0,8	175,00	0,44	50,30
0,7	152,10	0,35	38,90
0,6	130,93	0,29	31,60
0,5	109,00	0,24	25,66
0,45	100,00	0,22	24,44
0,4	86,80	0,19	22,32
0,3	66,00	0,16	19,29
0,25	54,53	0,17	18,57

Tabla 13: Tabla de resultados tras el ensayo 2 de vacío

El valor de R0, medido tras el último ensayo nos da: 37.8 ohmios

### Ensayo 3

Estado Un	U0 (V)	I0(A)	P0(W)
1	224,77	0,79	113,70
0,9	201,97	0,60	76,00
0,8	179,23	0,46	55,30
0,7	159,17	0,38	43,70
0,6	135,53	0,30	34,60
0,5	79,50	0,25	24,71
0,45	101,13	0,22	24,75
0,4	92,10	0,20	22,12
0,3	68,73	0,17	19,53
0,25	56,27	0,16	19,11

Tabla 14: Tabla de resultados tras el ensayo 3 de vacío

El valor de R0, medido tras el último ensayo nos da: 37.4 ohmios

#### 5.4.1. Pérdidas en el cobre, mecánicas y en el entrehierro

Tras el ensayo de vacío y el resultado obtenido podemos dividir las pérdidas del vacío entre las del cobre, hierro y mecánicas. Las del cobre las suponemos calculables mediante la ecuación:

$$P_{cu} = 1.5 * I_0^2 * R_s$$

Ecuación 1: Pérdidas en el cobre

Al calcular las pérdidas en el cobre podemos dividir ahora la pérdidas de vacío en las que acabamos de calcular y las otras pérdidas que serán las del hierro y las pérdidas mecánicas.

### Ensayo 1

Estado Un	Pcu(W)	Pfe+Pmec
1	36,0674416	73,4325584
0,9	20,573002	53,526998
0,8	12,292496	40,907504
0,7	8,1645418	34,5354582
0,6	5,26539697	28,234603
0,5	3,50712992	24,0628701
0,45	2,88563978	22,6343602
0,4	2,34674424	20,8332558
0,3	1,73642535	18,8225746
0,25	1,80216473	18,3578353

Tabla 15: Pérdidas divididas del ensayo de vacío 1

*Ensayo 2*

Pcu(W)	Pfe+Pmec
31,6682806	65,83
18,8037725	48,80
11,7717629	38,53
7,48318541	31,42
4,99309091	26,61
3,34966771	22,31
2,77937983	21,66
2,14619812	20,17
1,57338628	17,72
1,62477207	16,95

Tabla 16: Pérdidas divididas del ensayo de vacío 2

*Ensayo 3*

Pcu(W)	Pfe+Pmec
37,1871552	76,51
21,3136954	54,69
12,7073885	42,59
8,6059057	35,09
5,52251747	29,08
3,61161278	21,10
2,83973377	21,91
2,41165992	19,71
1,67964911	17,85
1,5605082	17,55

Tabla 17: Pérdidas divididas del ensayo de vacío 3

Ahora podemos realizando los pasos especificados en la normativa podremos conseguir dividir las pérdidas mecánicas y del hierro. Para ello tendremos que seguir lo que nos indica la normativa 60034-2-1 8.2.2.3.2 sobre el cálculo sobre las pérdidas de vacío y ventilación, que son las mecánicas.

---

### 8.2.2.3.2 Pérdidas de rozamiento y ventilación

*A partir de los puntos de pérdidas en vacío determinados anteriormente, utilizar todos aquellos que no muestran un efecto de saturación significativo y dibujar una curva de pérdidas constantes ( $P_k$ ) frente a la tensión al cuadrado ( $U_{02}$ ). Extrapolar una línea recta hasta la tensión cero. La intersección con el eje de tensión cero son las pérdidas de rozamiento y de ventilación  $P_{fv}$ .*

---

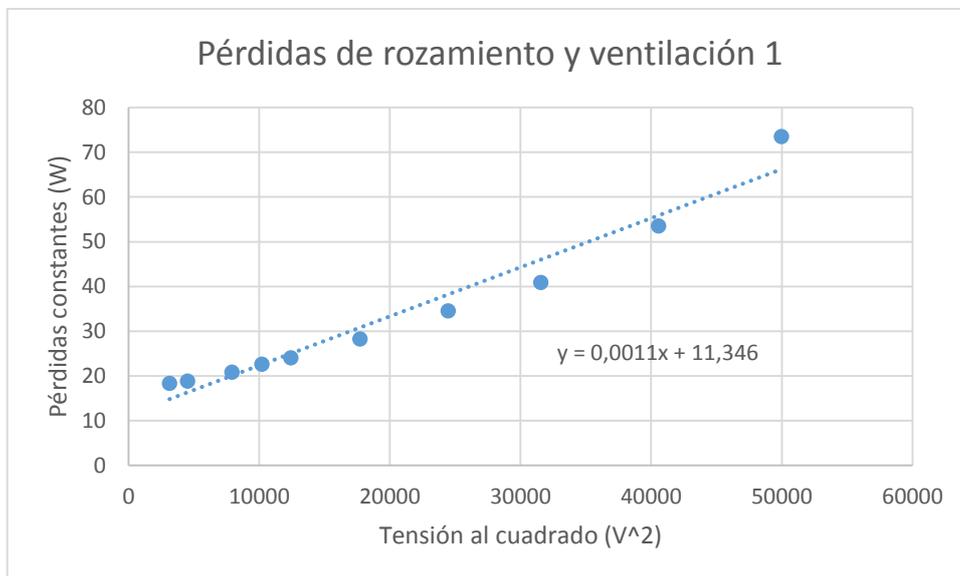


Gráfico 1: Tensión al cuadrado frente a pérdidas mecánicas y del hierro

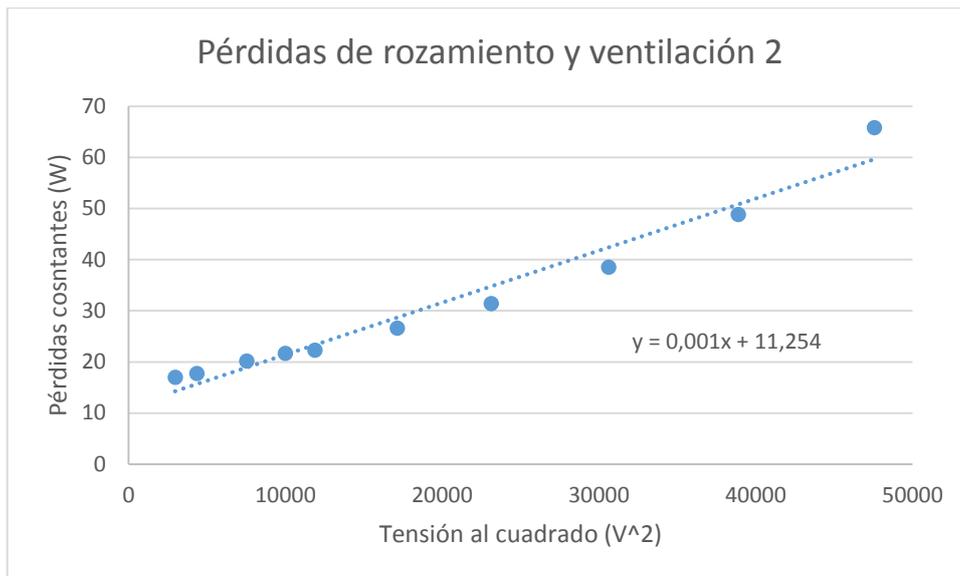


Gráfico 2: Tensión al cuadrado frente a perdidas mecánicas y del hierro 2

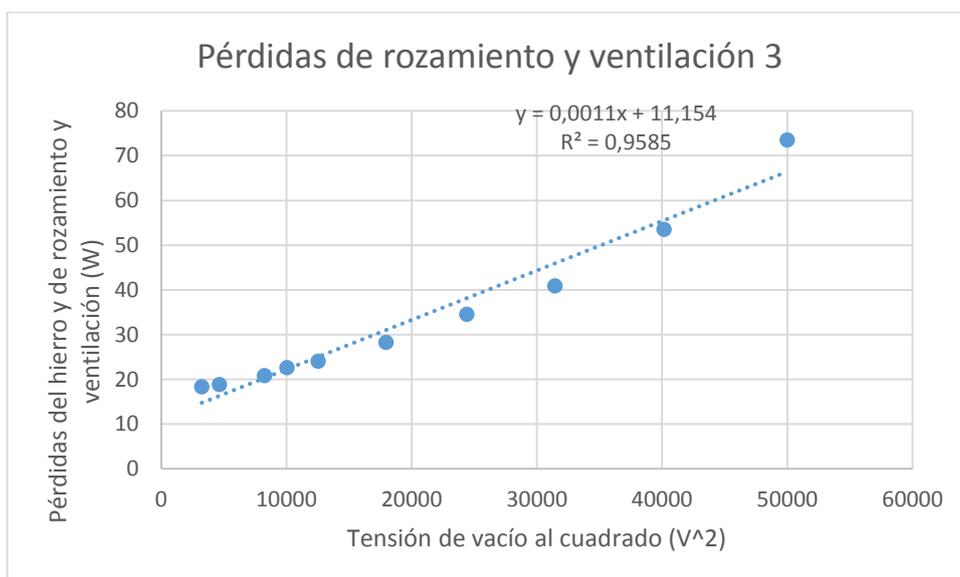


Gráfico 3: Tensión al cuadrado frente a perdidas mecánicas y del hierro 3

<b>Pérdidas de rozamiento y ventilación (W)</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Media</b>
	11,346	11,254	11,154	11,25133333

Tabla 18: Pérdidas de rozamiento y ventilación en los ensayos realizados

Como ya hemos obtenido las pérdidas del cobre y las de rozamiento y ventilación, ahora nos falta calcular las del hierro. Las Pérdidas del cobre serán constantes a una misma temperatura, que es el caso del motor en un funcionamiento normal después de un tiempo determinado, y las de rozamiento y ventilación son constantes también. Sin embargo las pérdidas en el hierro no son constantes y tendremos que calcularlas. Seguiremos la normativa siguiente:

### 8.2.2.3.3 Pérdidas en el hierro

---

*A partir de los valores de la tensión entre el 60% y 125% de la tensión asignada, trazar una curva de  $P_{fe} = P_k - P_{fw}$  en función de la tensión  $U_0$ . Las pérdidas en el hierro del punto de carga deseado se toman de la curva a tensión  $U_r$  que tiene en cuenta la caída de tensión resistiva en el devanado primario.*

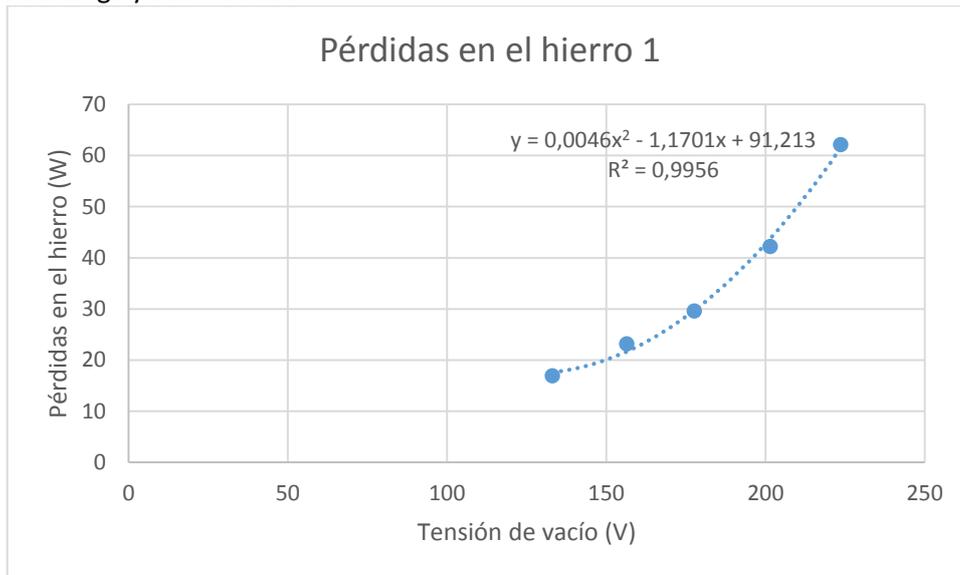
---

Por lo tanto vamos a realizar la diferencia entre  $P_k$  y  $P_{fw}$  de nuestro ensayo y realizar la gráfica. Además realizaremos una regresión lineal de segundo orden para facilitar más adelante si es necesario el punto  $U_r$  obtenido de la fórmula:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} * I * R_s * \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R_s * \sen\varphi\right)^2}$$

*Ecuación 2: Cálculo de la tensión del rotor*

Y los valores serán tomados según la normativa del apartado 6.4.4.2 que se refiere a los ensayos de carga y sus medidas.



*Gráfico 4: Pérdidas en el hierro 1*

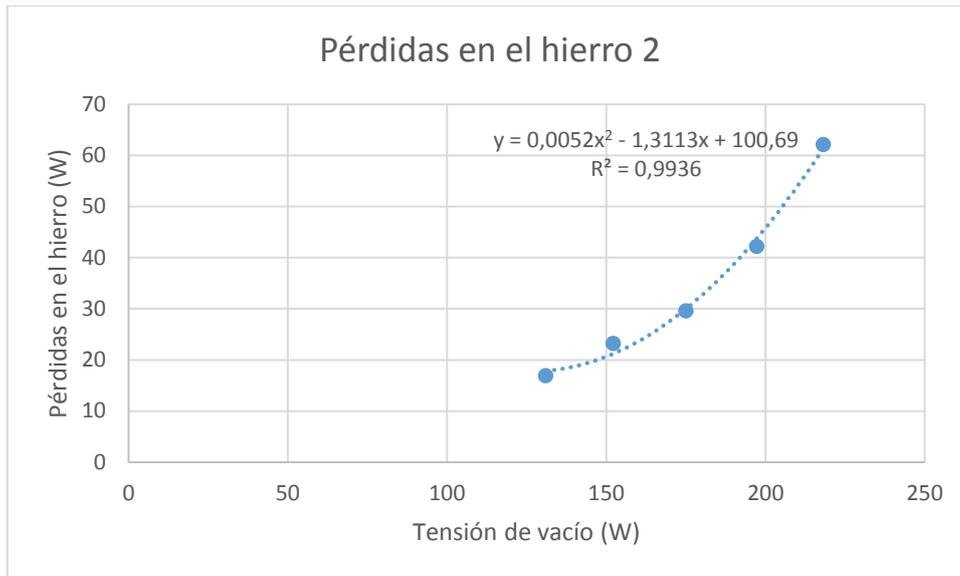


Gráfico 5: Pérdidas en el hierro 2

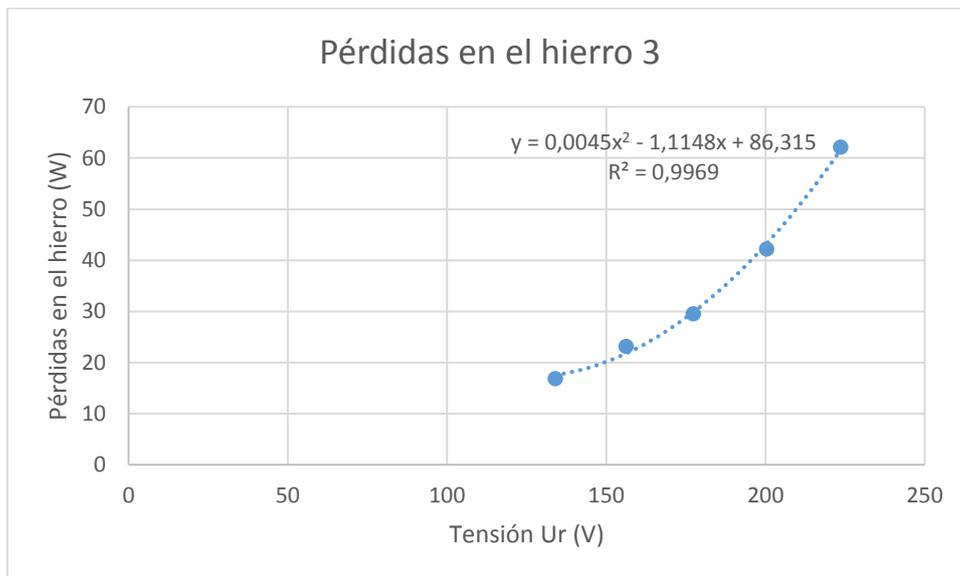


Gráfico 6: Pérdidas en el hierro 3

#### 5.4.2. Resultados de los ensayos

Una vez tenemos calculadas las diferentes pérdidas del motor que se pueden observar en este ensayo podemos proceder a calcular una serie de parámetros. En concreto debemos calcular la inductancia total del estator. Para ello vamos a seguir la norma UNE 60034-28 en su punto 7.3.2, que nos indica una serie de fórmulas.

$$Z_{s=0} = \frac{U}{I}$$

Ecuación 3: Impedancia de línea

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{3 * U * I}$$

Ecuación 4: Factor de potencia

$$R_{s=0} = Z_{s=0} * \cos\varphi$$

Ecuación 5: Resistencia a deslizamiento nulo

$$I_m = I$$

Ecuación 6: Intensidad de magnetización

$$X_{ts} = \sqrt{Z_{s=0}^2 - R_{s=0}^2}$$

Ecuación 7: Reactancia total del estator

$$L_{ts} = \frac{X_{ts}}{2\pi * f_N}$$

Ecuación 8: Inductancia total del estator

$$U_{i,s=0} = \sqrt{(U - R_{s=0} * I_m * \cos\varphi)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos\varphi)^2} * R_{s=0} * I_m\right)^2}$$

Ecuación 9: Tensión interna de la máquina

La norma nos indica que debemos calcular estos valores para todos los puntos obtenidos en el ensayo de vacío. Además nos pide una gráfica con la evolución de  $L_{ts}$  con respecto  $I_m$  y otra con respecto a  $U_{i,s=0}$ . Lo calcularemos para cada uno de los ensayos:

#### Ensayo 1

Ensayo 1	Zs=0 (Ω)	Rs=0(Ω)	Xts(Ω)	Lts(H)	cos fi	Uis=0(V)
1	287,44	34,26	285,39	0,91	0,12	220,42
0,9	342,91	40,79	340,47	1,08	0,12	198,61
0,8	391,19	47,84	388,25	1,24	0,12	175,01
0,7	422,70	56,50	418,91	1,33	0,13	153,67
0,6	447,83	63,80	443,27	1,41	0,14	130,44
0,5	459,38	72,12	453,69	1,44	0,16	108,73
0,45	458,86	77,80	452,21	1,44	0,17	98,12
0,4	448,16	80,40	440,89	1,40	0,18	86,13
0,3	393,24	85,63	383,80	1,22	0,22	64,03
0,25	321,96	77,38	312,52	0,99	0,24	52,86

Tabla 19: parámetros obtenidos del ensayo de vacío 1

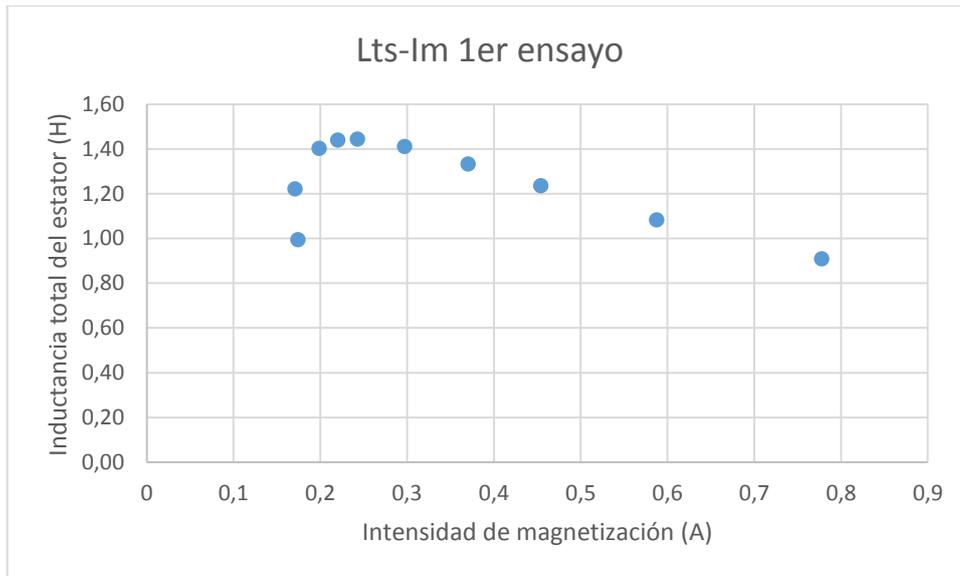


Gráfico 7: Relación Lts-Im 1er ensayo

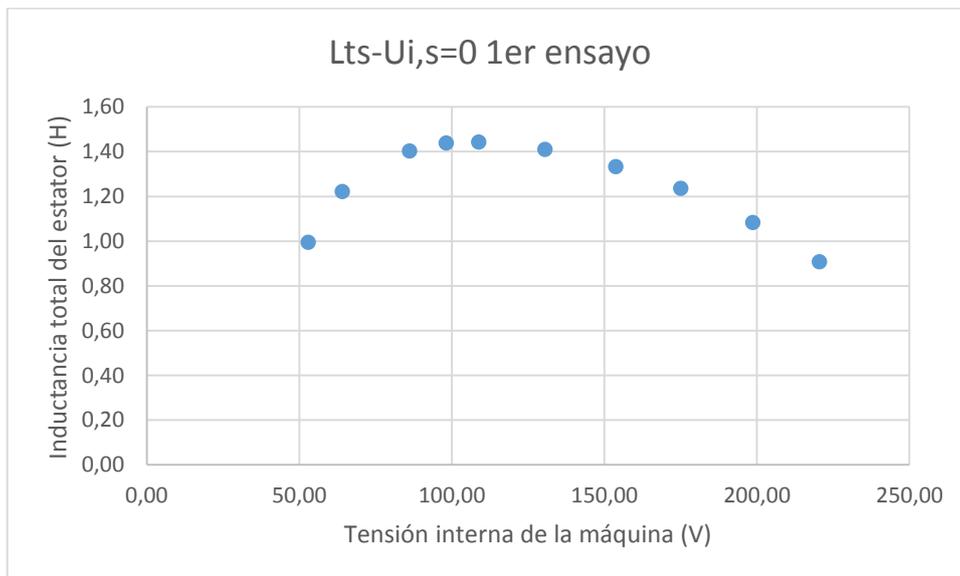


Gráfico 8: Relación Lts-Uis=0 1er ensayo

Ensayo 2

Ensayo 2	Zs=0 (Ω)	Rs=0(Ω)	Xts(Ω)	Lts(H)	cos fi	Uis=0(V)
1	299,04	34,20	297,08	0,95	0,11	215,30
0,9	350,89	39,62	348,65	1,11	0,11	194,74
0,8	393,55	45,98	390,86	1,24	0,12	172,67
0,7	429,01	53,47	425,67	1,35	0,12	149,80
0,6	452,12	61,02	447,98	1,43	0,13	128,62
0,5	459,53	65,50	454,84	1,45	0,14	106,86
0,45	462,82	74,30	456,82	1,45	0,16	97,50

<b>0,4</b>	457,16	82,48	449,66	1,43	0,18	84,07
<b>0,3</b>	405,99	81,51	397,72	1,27	0,20	63,44
<b>0,25</b>	330,10	69,51	322,70	1,03	0,21	52,22

Tabla 20: parámetros obtenidos del ensayo de vacío 2

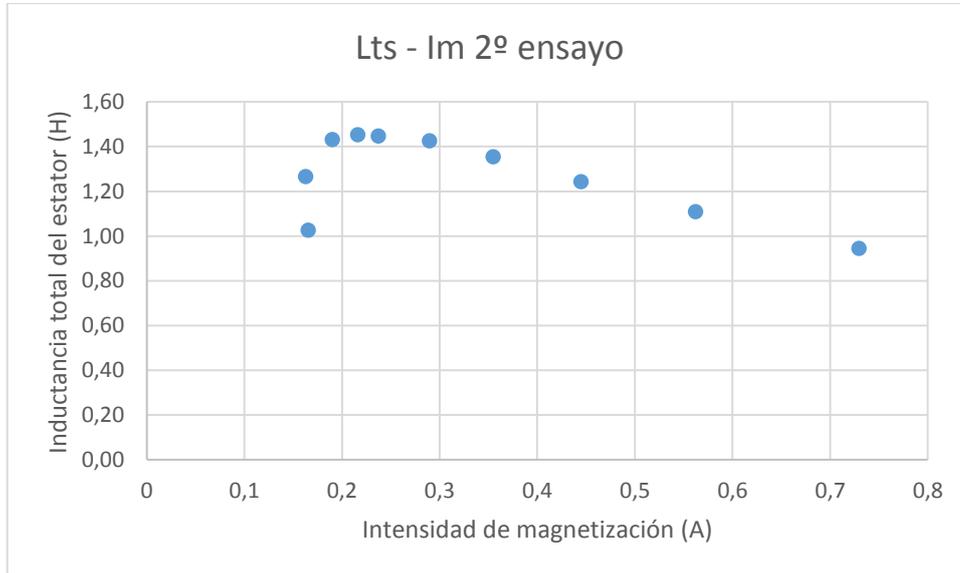


Gráfico 9: Relación Lts-Im 2º ensayo

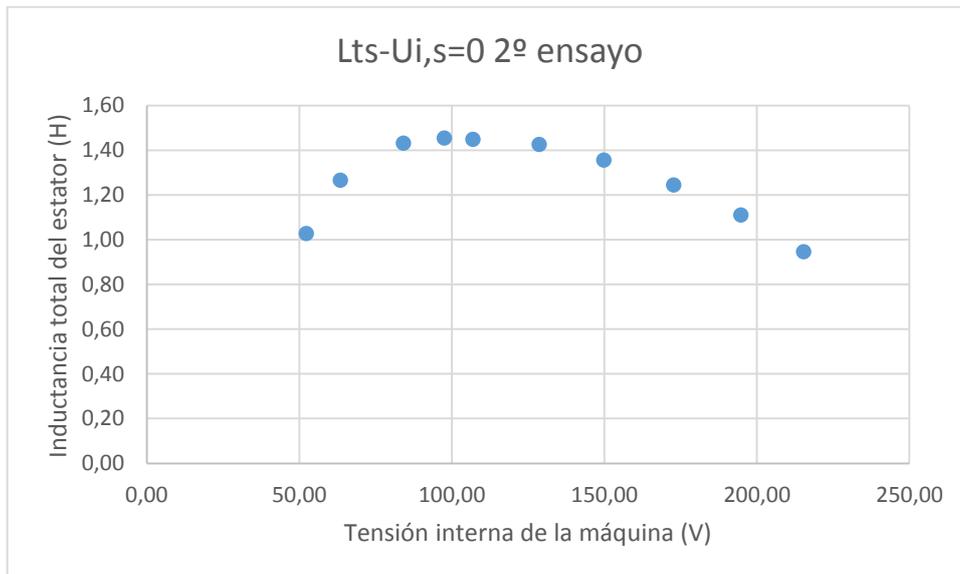


Gráfico 10: Relación Lts-U<sub>i,s=0</sub> 2º ensayo

### Ensayo 3

Ensayo 3	Zs=0 (Ω)	Rs=0(Ω)	Xts(Ω)	Lts(H)	cos fi	Uis=0(V)
1	287,65	35,12	285,50	0,91	0,12	220,33
0,9	344,47	41,48	341,96	1,09	0,12	197,52
0,8	391,75	48,39	388,75	1,24	0,12	174,69
0,7	424,48	53,90	421,04	1,34	0,13	153,71
0,6	447,40	57,65	443,67	1,41	0,13	131,81
0,5	461,38	65,98	456,64	1,45	0,14	109,68
0,45	468,41	72,61	462,75	1,47	0,16	97,77
0,4	464,72	77,50	458,21	1,46	0,17	88,23
0,3	416,58	75,93	409,60	1,30	0,18	65,83
0,25	359,48	63,18	353,88	1,13	0,18	55,17

Tabla 21: parámetros obtenidos del ensayo de vacío 3

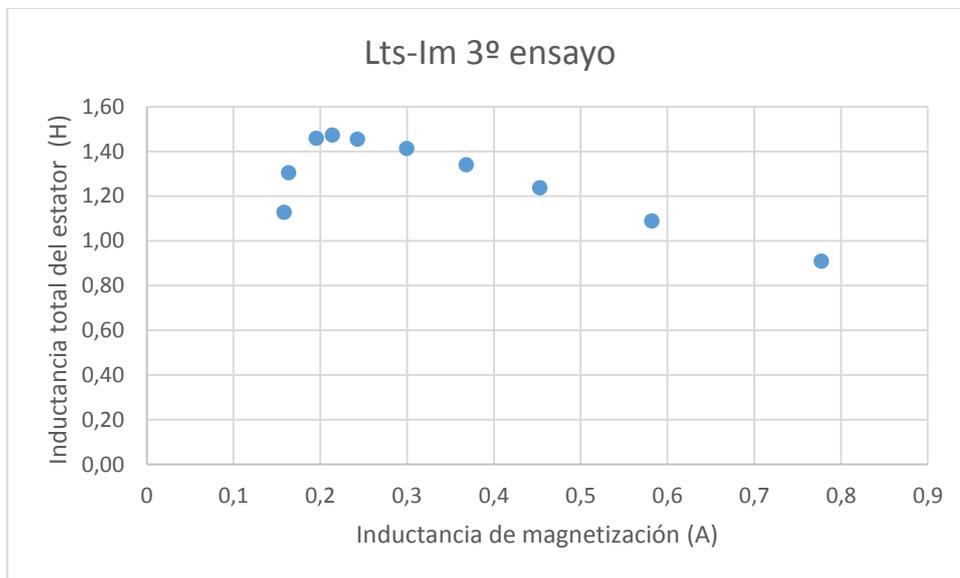


Gráfico 11: Relación Lts-Im 3er ensayo

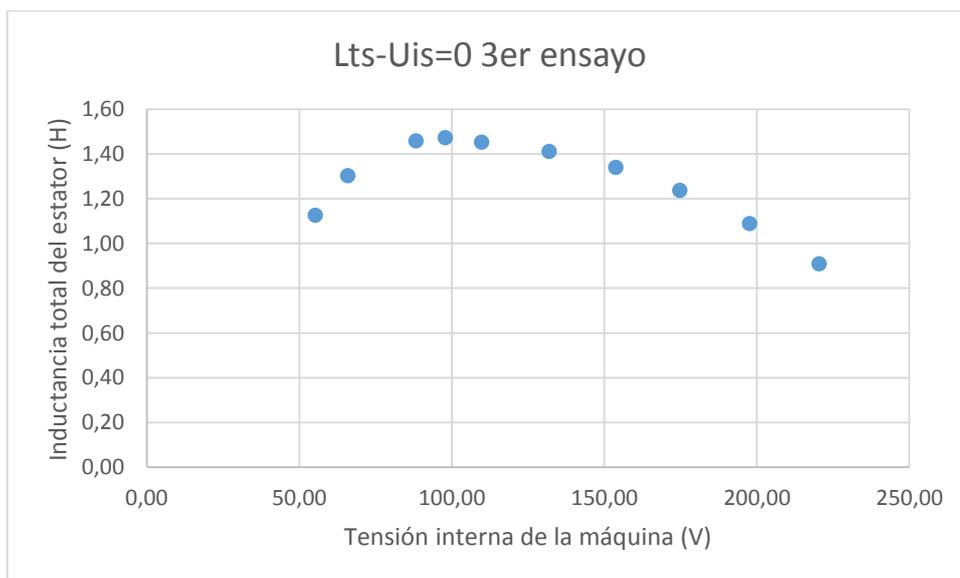


Gráfico 12: Relación Lts-Uis=0 3er ensayo

Una vez tenemos los parámetros anteriores podemos calcular la resistencia del entrehierro. Para ello utilizamos lo indicado en la norma UNE-60034-28 en su apartado 7.4.3. Se determinará la resistencia equivalente de pérdidas en el hierro para el esquema del circuito equivalente:

$$R_{fe\Gamma} = \frac{3 * U_{i,s=0}^2}{P_{fe}}$$

*Ecuación 10: Resistencia del hierro para el circuito equivalente*

Tenemos que tomar el valor de  $U_{i,s=0}$  para la tensión asignada en el ensayo de vacío. Y por tanto los valores obtenidos serán:

Ensayo	1	2	3	Media
Rfe(Ω)	2345,21	2548,08	2287,23	2393,51

*Tabla 22: Resistencia del hierro*

## 5.5. Ensayo rotor bloqueado

En este ensayo la idea es realizar el proceso contrario al ensayo de vacío. En esta ocasión pondremos una carga lo suficientemente grande como para que el rotor no pueda moverse. Y de esta manera simplificar el circuito de otra manera.

El ensayo de rotor bloqueado lo vamos a realizar siguiendo los puntos que nos indican en 60034-2-1:2009 en el apartado 6.4.4.4.3. Debido a su escasa información la complementaremos con lo indicado en la norma UNE 60034-28:2013 que aunque es para un motor de jaula de ardilla nos sirve de referencia para saber como debemos realizar el ensayo de rotor bloqueado. En su apartado 6.6.3.

Para nuestro estudio vamos a bloquear el rotor mediante un freno mecánico. Aunque es una versión bastante antigua, para un ensayo en el que necesitamos tener el motor completamente parado es perfectamente útil.

La prueba la realizaremos con rotor bloqueado y frecuencia asignada, ya que es la forma más accesible que tenemos en el laboratorio. Poniendo una intensidad nominal y una tensión reducida. Y registrando tensión, potencia, corriente, deslizamiento y temperaturas para el punto de carga.

Además utilizando la información complementaria que obtenemos de la norma UNE-60034-28. Debemos realizar la prueba con valores que van desde el 150% hasta el 10% de la intensidad nominal. Incluyendo siempre una a la intensidad asignada. Al menos 10 medidas y realizadas en orden decreciente. Intentando tener unas intensidades similares a las del ensayo de vacío.

La conexión del motor será medida mediante un wattímetro, y las conexiones serán como se indican a continuación. Cada amperímetro y voltímetro se refiere a una fase, y en la realidad la parte negativa se han conectado de manera común. En este caso conectamos una carga para bloquear el motor por completo.

### Regulador de tensión

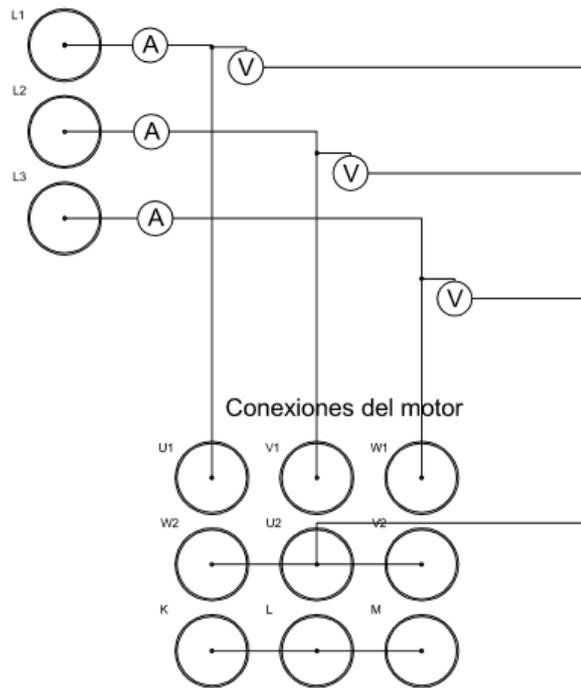


Figura 20: Conexión del motor en el ensayo de rotor bloqueado



Figura 21: Conexión del freno mecánico al motor

Los resultados obtenidos en el ensayo (ya promediadas las fases) son las siguientes:

### Ensayo 1

Irb	Vrb	Prb
1,14	141,43	80,60
1,01	128,93	64,20
0,77	103,03	38,63
0,59	80,67	22,93
0,46	63,83	14,13
0,38	52,43	9,59
0,29	40,65	5,82
0,24	33,85	4,09
0,20	27,41	2,75
0,17	23,53	2,06

Tabla 23: Resultados del primer ensayo de rotor bloqueado

### Ensayo 2

Irb	Vrb	Prb
1,13	129,37	77,37
0,99	116,70	61,43
0,76	92,20	37,20
0,59	72,07	22,50
0,44	55,40	13,39
0,37	46,57	9,51
0,28	35,85	5,76
0,23	29,05	3,84
0,19	24,46	2,78
0,16	20,63	2,00

Tabla 24: Resultados del segundo ensayo de rotor bloqueado

### Ensayo 3

Irb	Vrb	Prb
1,11	137,20	74,87
1,00	127,00	62,07
0,77	102,20	38,10
0,58	79,33	22,33
0,45	61,67	13,45
0,37	52,03	9,63
0,28	38,60	5,41
0,23	32,31	3,86
0,19	26,87	2,72
0,16	22,15	1,90

Tabla 25: Resultados del tercer ensayo de rotor bloqueado

### 5.5.1. Resultados obtenidos de los ensayos

A partir de ahora vamos seguir la normativa UNE-60034-28 para calcular los diferentes valores del motor. Los parámetros obtenidos también podrán ser calculados mediante el ensayo de carga que lo realizaremos más adelante. De esta manera podremos ver si los resultados son similares y así poder descartar fallos de cálculo y de medición.

Comenzaremos con el punto 7.5 de la UNE 60034 parte 28, que tiene por objetivo obtener la dispersión total. Los primeros apartados son genéricos, hasta que llegamos al 7.5.3 que nos dará una serie de cálculos para el ensayo de rotor bloqueado. En su primer apartado de "Generalidades" nos indica que debido a que tenemos un deslizamiento alto, comparada con la reactancia, y, por tanto, la parte reactiva de la impedancia medida proviene principalmente de la inductancia de dispersión total  $L_{t\sigma}$ .

Para cada una de las intensidades de línea medidas:

$$Z = \frac{U}{I}$$

*Ecuación 11: Determinación de la impedancia.*

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{U * I}$$

*Ecuación 12: Factor de potencia*

$$R = Z * \cos\varphi$$

*Ecuación 13: Determinación de la resistencia*

$$I_s = I$$

*Ecuación 14: Intensidad del estator*

$$X_{t\sigma} = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

*Ecuación 15: Reactancia de dispersión total*

$$L_{t\sigma} = \frac{X_{t\sigma}}{2\pi * f_N}$$

*Ecuación 16: Inductancia de dispersión total*

Y se representan los valores de  $L_{t\sigma}$  en función de los valores de  $I_s$ .

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Ensayo 1

Irb(A)	Z( $\Omega$ )	cos phi	R( $\Omega$ )	X dispersion total( $\Omega$ )	L dispersion total (H)
1,14	124,14	0,50	62,09	107,49	0,34
1,01	127,91	0,49	63,18	111,21	0,35
0,77	133,41	0,49	64,77	116,63	0,37
0,59	137,19	0,48	66,33	120,09	0,38
0,46	138,07	0,48	66,12	121,21	0,39
0,38	139,31	0,49	67,70	121,76	0,39
0,29	139,69	0,49	68,77	121,59	0,39
0,24	139,03	0,50	69,04	120,68	0,38
0,20	138,71	0,51	70,32	119,56	0,38
0,17	138,22	0,51	70,97	118,61	0,38

Tabla 26: Resultados obtenidos del primer ensayo de rotor bloqueado

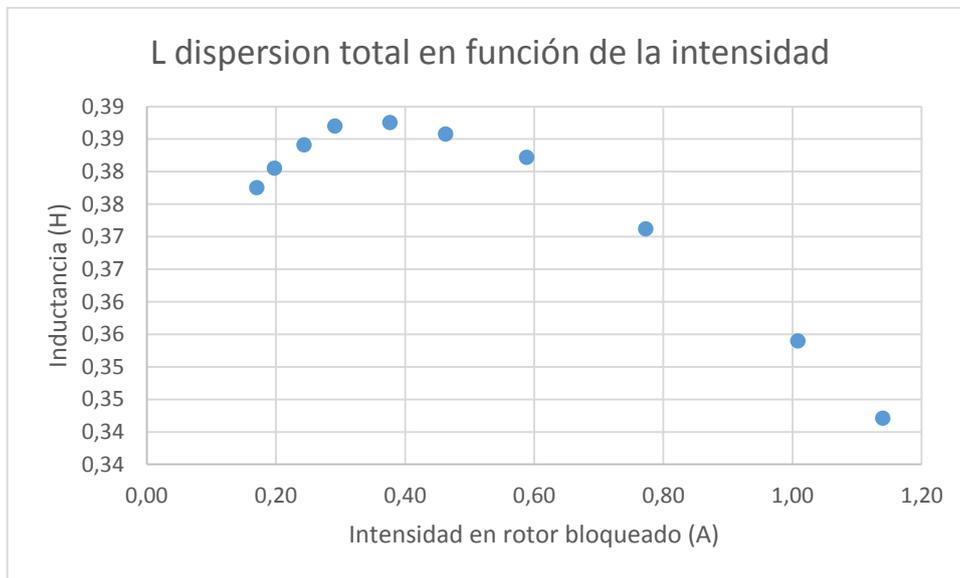


Gráfico 13: Inductancia de dispersión total en función de la intensidad

Ensayo 2

Irb(A)	Z( $\Omega$ )	cos phi	R( $\Omega$ )	X dispersion total( $\Omega$ )	L dispersion total (H)
1,13	114,75	0,53	60,88	97,28	0,31
0,99	117,72	0,53	62,51	99,75	0,32
0,76	120,68	0,53	63,73	102,48	0,33
0,59	122,98	0,53	65,52	104,07	0,33
0,44	124,52	0,54	67,63	104,56	0,33
0,37	125,60	0,55	69,16	104,84	0,33
0,28	126,21	0,57	71,42	104,06	0,33
0,23	126,97	0,58	73,37	103,62	0,33
0,19	128,01	0,59	76,03	102,99	0,33
0,16	128,88	0,61	78,03	102,57	0,33

Tabla 27: Resultados obtenidos del segundo ensayo de rotor bloqueado

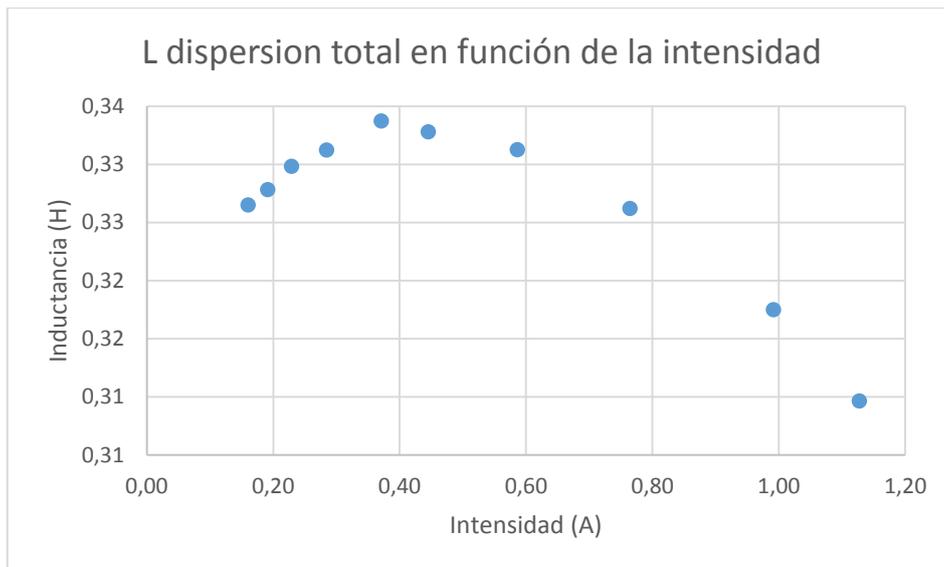


Gráfico 14: Inductancia de dispersión total en función de la intensidad

Ensayo 3

Irb(A)	Z( $\Omega$ )	cos phi	R( $\Omega$ )	X dispersion total( $\Omega$ )	L dispersion total (H)
1,11	123,68	0,49	60,84	107,68	0,34
1,00	127,13	0,49	62,19	110,88	0,35
0,77	133,02	0,49	64,54	116,31	0,37
0,58	136,47	0,48	66,09	119,40	0,38
0,45	137,67	0,49	67,05	120,24	0,38
0,37	138,85	0,49	68,55	120,75	0,38
0,28	139,31	0,51	70,46	120,18	0,38
0,23	139,41	0,52	71,86	119,46	0,38
0,19	139,37	0,53	73,29	118,55	0,38
0,16	139,02	0,54	74,71	117,24	0,37

Tabla 28: Resultados obtenidos del tercer ensayo de rotor bloqueado

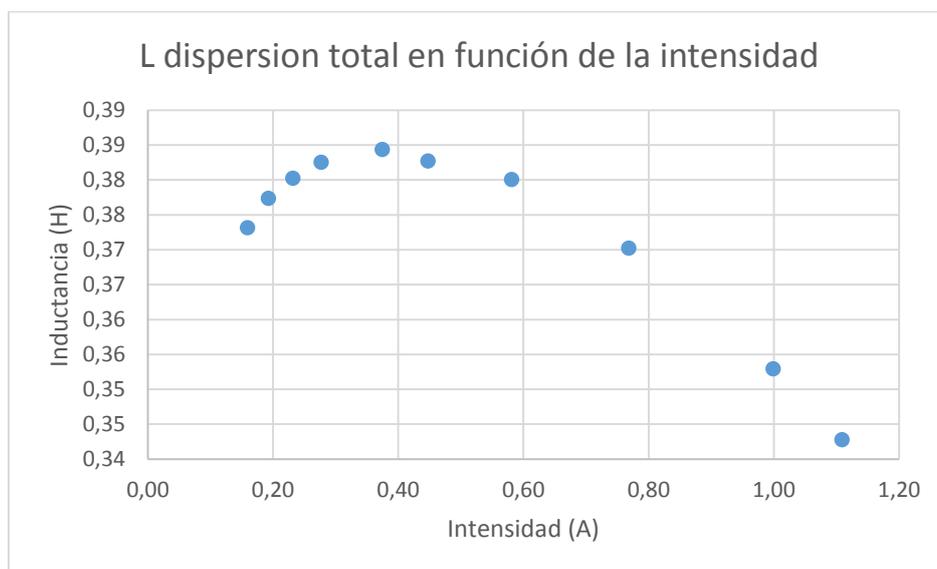


Gráfico 15: Inductancia de dispersión total en función de la intensidad

Se nos indica también en la normativa unas correcciones por las mediciones tomadas, sin embargo deberíamos tomar las medidas en el laboratorio y no es posible con las instalaciones de las que disponemos.

Ahora vamos a empezar a calcular la inductancia de magnetización y tensión de magnetización. En este caso seguimos refiriéndonos a la misma norma aunque ahora en el punto 7.6.1.

Para cada uno de los valores determinados de inductancia total del estator  $L_{ts}$  y de intensidad de magnetización ( Del ensayo de vacío) debemos hacer lo siguiente: Se tiene que calcular la inductancia de dispersión total correspondiente del apartado anterior mediante interpolación lineal, utilizando la intensidad de magnetización del ensayo de vacío y la del estator del ensayo de cortocircuito.

$$L_m = L_{ts} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_s}}$$

*Ecuación 17: Inductancia de magnetización*

$$U_m = 2\pi * f_N * L_m * I_m$$

*Ecuación 18: Tensión de magnetización*

Finalmente se representan los valores de  $L_m$  en función de los valores de  $U_m$ .

*Ensayo 1*

<b>Irb(A)</b>	<b>Lts</b>	<b>Lm</b>	<b>Um</b>
1,14	0,92	0,65	231,32
1,01	0,92	0,64	201,66
0,77	0,92	0,62	151,16
0,59	1,09	0,78	144,45
0,46	1,24	0,93	134,90
0,38	1,44	1,13	133,68
0,29	1,46	1,15	104,99
0,24	1,46	1,15	88,14
0,20	1,43	1,13	69,97
0,17	1,26	0,96	51,23

*Tabla 29: Inductancia mutua y tensión magnetizante en el primer ensayo de rotor bloqueado*

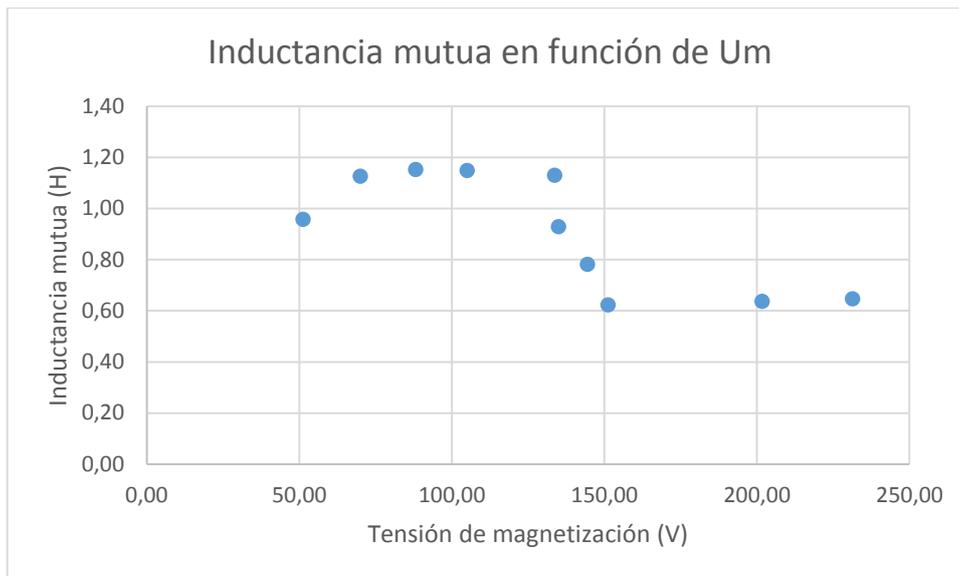


Gráfico 16: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante

Ensayo 2

Irb(A)	Lts (H)	Lm (H)	Um (V)
1,13	0,92	0,67	238,10
0,99	0,92	0,67	207,41
0,76	0,92	0,66	158,18
0,59	1,09	0,82	151,47
0,44	1,32	1,06	147,59
0,37	1,45	1,18	137,25
0,28	1,46	1,19	106,50
0,23	1,46	1,20	85,94
0,19	1,43	1,17	70,11
0,16	1,05	0,79	39,67

Tabla 30: Inductancia mutua y tensión magnetizante en el segundo ensayo de rotor bloqueado

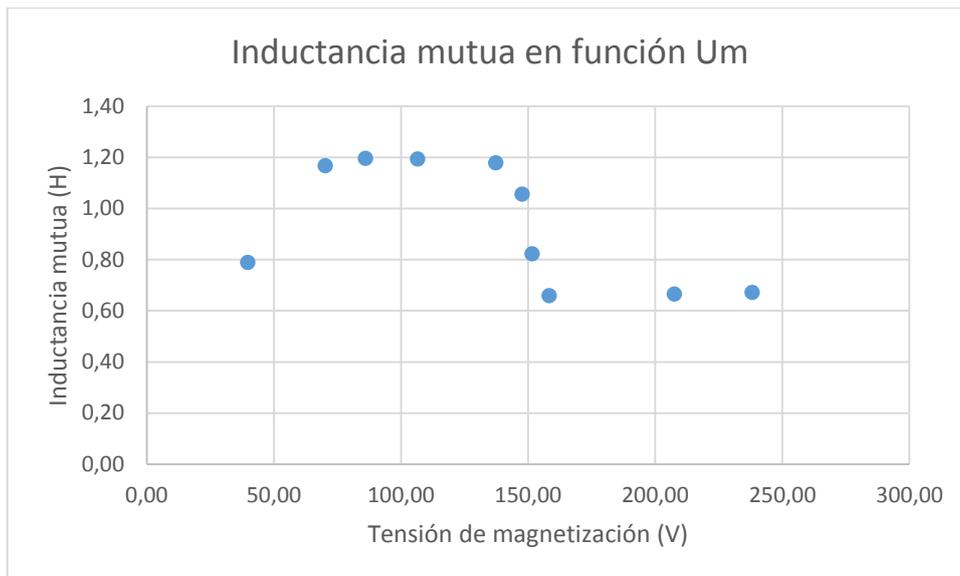


Gráfico 17: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante

### Ensayo 3

Irb(A)	Lts	Lm	Um
1,11	0,92	0,65	225,06
1,00	0,92	0,64	200,13
0,77	0,92	0,62	150,58
0,58	1,09	0,79	143,54
0,45	1,24	0,93	131,41
0,37	1,45	1,14	133,95
0,28	1,46	1,15	100,31
0,23	1,46	1,16	84,14
0,19	1,43	1,13	68,32
0,16	1,05	0,75	37,62

Tabla 31: Inductancia mutua y tensión magnetizante en el tercer ensayo de rotor bloqueado

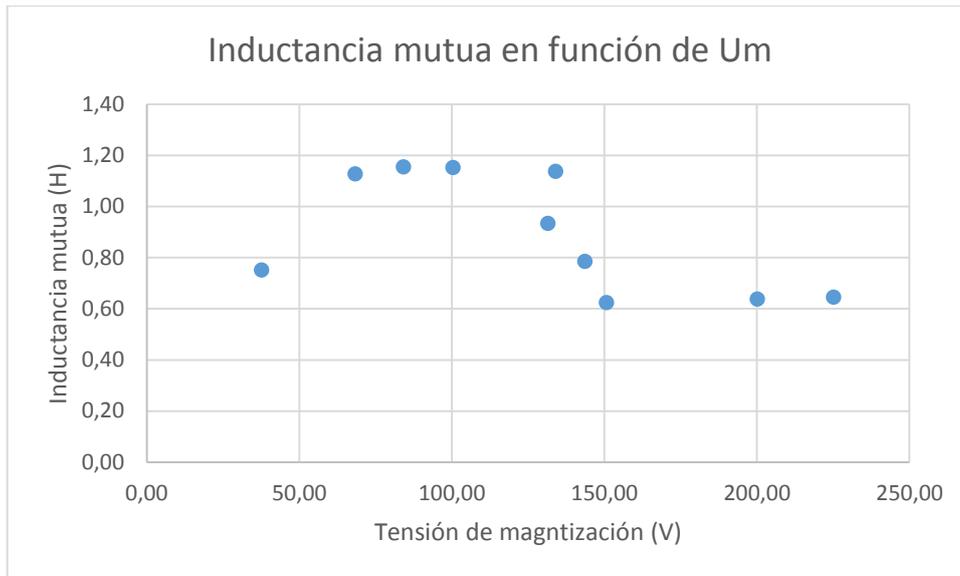


Gráfico 18: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante

Por último en este ensayo debemos calcular las inductancias del estator y del rotor. La norma nos indica que estos valores se calculan con las siguientes fórmulas:

$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

$$L'_{\sigma r} = L_{t\sigma} - L_s$$

Ecuación 19: Inductancias de estator y rotor según el ensayo de rotor bloqueado

Y debemos trazar los valores de la inductancia de dispersión del estator y del rotor en función de la intensidad del estator.

*Ensayo 1*

Irb(A)	Lsigmas	Lsigmar
1,14	0,27	0,07
1,01	0,28	0,07
0,77	0,30	0,07
0,59	0,31	0,08
0,46	0,31	0,08
0,38	0,31	0,08
0,29	0,31	0,08
0,24	0,31	0,08
0,20	0,30	0,08
0,17	0,30	0,08

Tabla 32: Inductancias de estator y rotor según el primer ensayo de rotor bloqueado

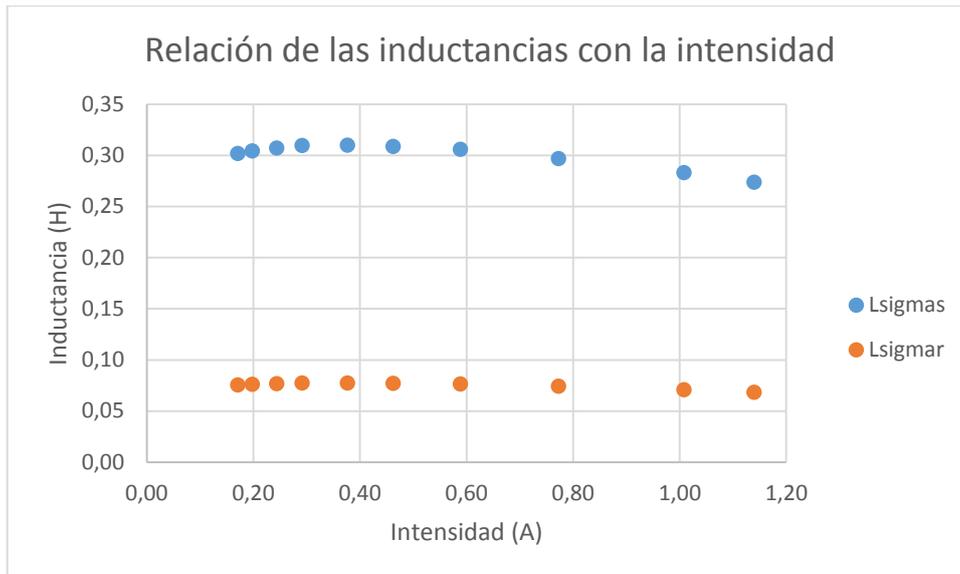


Gráfico 19: Relación entre la intensidad de magnetización y las inductancias de estator y rotor

Ensayo 2

Irb(A)	Lsigmas	Lsigmar
1,13	0,25	0,06
0,99	0,25	0,06
0,76	0,26	0,07
0,59	0,27	0,07
0,44	0,27	0,07
0,37	0,27	0,07
0,28	0,26	0,07
0,23	0,26	0,07
0,19	0,26	0,07
0,16	0,26	0,07

Tabla 33: Inductancias de estator y rotor según el segundo ensayo de rotor bloqueado

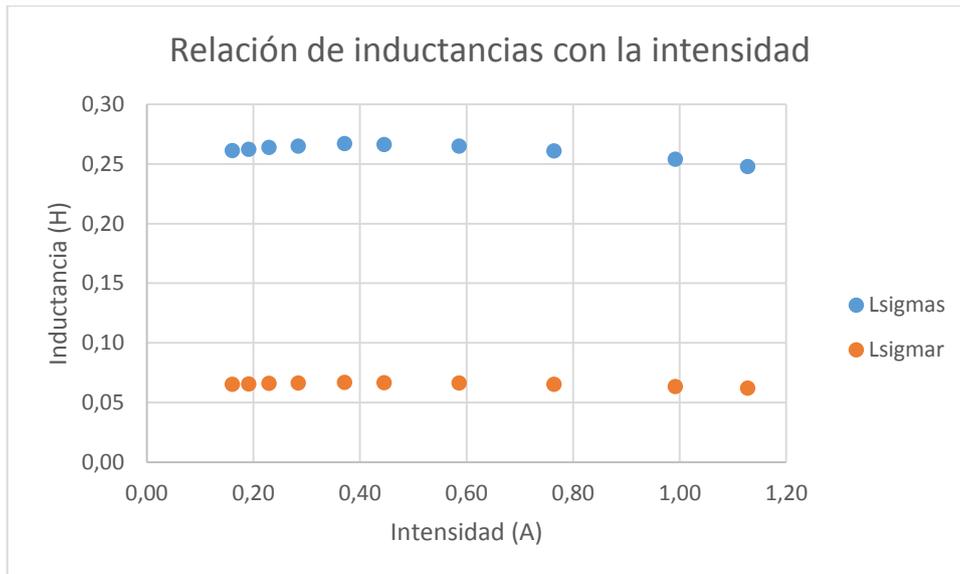


Gráfico 20: Relación entre la intensidad de magnetización y las inductancias de estator y rotor

Ensayo 3

Irb(A)	Lsigmas	Lsigmar
1,11	0,27	0,07
1,00	0,28	0,07
0,77	0,30	0,07
0,58	0,30	0,08
0,45	0,31	0,08
0,37	0,31	0,08
0,28	0,31	0,08
0,23	0,30	0,08
0,19	0,30	0,08
0,16	0,30	0,07

Tabla 34: Inductancias de estator y rotor según el tercer ensayo de rotor bloqueado

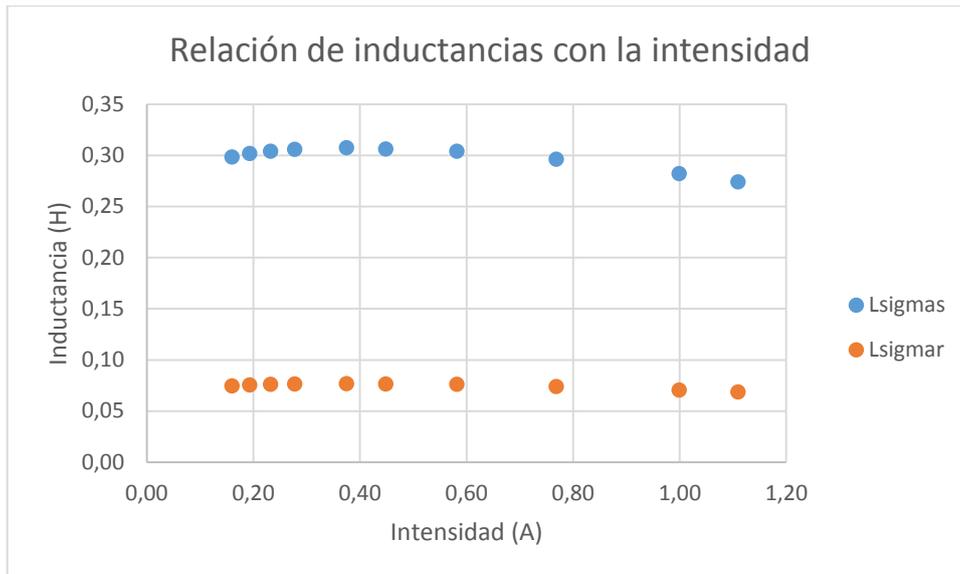


Gráfico 21: Relación entre la intensidad de magnetización y las inductancias de estator y rotor

## 5.6. Ensayo de la curva de carga

El ensayo de la curva de carga consistirá en el estudio del motor aplicando diferentes cargas. Lo que nos permitirá ver como varían los parámetros del motor a diferentes funcionamientos.

Para la realización de este ensayo seguiremos como en otros puntos del trabajo la norma UNE 60034-2-1, en este caso en el apartado 6.4.4.2, y para completar la norma 60034-28, en su punto 6.4. Para la realización del ensayo nos indica que la máquina debe estar a una temperatura constante con respecto a la nominal. Por lo tanto antes de empezar el ensayo conectaremos la máquina y le pondremos la carga necesaria para que opere a velocidad nominal (Para este ensayo utilizaremos un servofreno, que explicaremos en un anexo su funcionamiento.). Una vez tengamos funcionando la máquina un cierto tiempo (En nuestro caso en torno a 30 minutos) procederemos a la realización del ensayo, y tenemos que seguir la normativa.

---

### *UNE 60034-2-1 6.4.4.2 Ensayo de la curva de carga*

*Aplicar la carga a la máquina en seis puntos de carga. Cuatro puntos de carga deberían elegirse para que estuvieran aproximadamente equidistantes entre una carga mínima no inferior al 25% y una carga del 100%. Los dos puntos de carga restantes, aproximadamente equidistantes, deberían elegirse adecuadamente por encima del 100%, pero sin superar el 150%. Cuando se carga la máquina, comenzar en el valor de carga más alto y proceder en orden descendente hasta el valor inferior. Estos ensayos deben realizarse tan rápidamente como sea posible para minimizar los cambios de temperatura en la máquina durante los ensayos.*

---

Por lo tanto la idea es empezar el ensayo con un valor de carga del 150% sobre la nominal, y después ir bajando hasta el 25%. Debido a que el servofreno nos da grandes posibilidades para medir los diferentes puntos de la máquina y sus cambios según cambiamos el par al que sometemos vamos a realizar más de 20 puntos de carga. Además así cumplimos la norma específica para motores de jaula de ardilla que nos indica que un mínimo de 10 puntos.

Una vez la máquina este cargada debemos desconectar la máquina y medir las resistencias del estator. Debemos hacerlo siguiendo los pasos de la norma 60034-2-1 5.7.1 que ya hemos utilizado para medir las resistencias del estator en reposo. Es decir, conectaremos las resistencias a una fuente de continua y obtendremos la tensión y corriente que pasa por ellas. Una vez medido debemos conectar de nuevo el motor y realizar, ahora sí, el ensayo que se nos pide midiendo los diferentes puntos de carga. Al final del mismo debemos medir de nuevo las resistencias del estator para ver su calentamiento. Debemos tener en cuenta estas resistencias para los cálculos posteriores debido a que nos indica que para los valores de carga superiores al 100% tomemos la primera medida, y para las inferiores debemos representarla como una función lineal y calcular para cada punto la resistencia que tiene.

Los valores a calcular será  $U, I, P_1, R, n, f, T$ . El servofreno utilizado nos dará estos valores además de otros como el factor de potencia o velocidad. Y la frecuencia de la red la consideramos constante ya que está conectada a la red.

El conexionado eléctrico es bastante sencillo, al utilizar el servofreno no necesitamos añadir wattímetros o polímetros tan solo tener como paso intermedio el propio servofreno. Y su conexión con su freno.

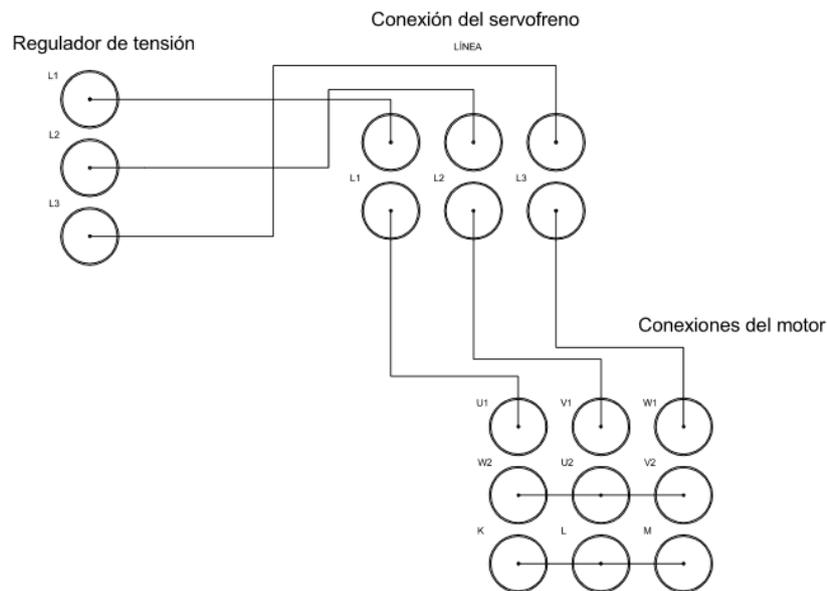


Figura 22: Conexionado ensayo de carga

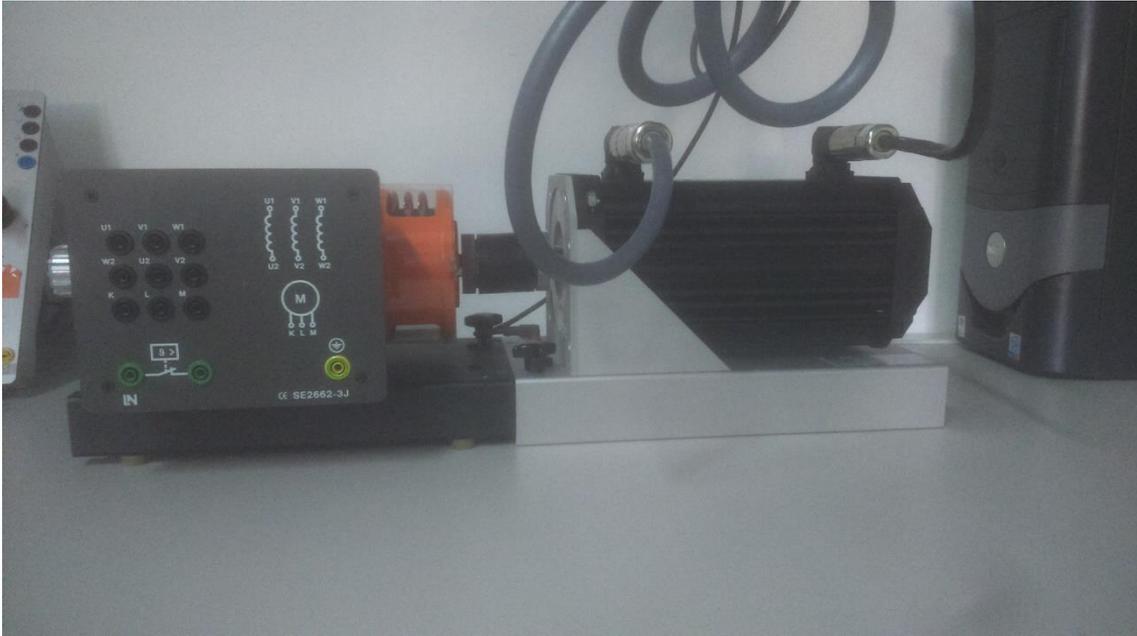


Figura 23: Conexión del servofreno como carga

## Resultados del ensayo de la curva de carga

En primer lugar vamos a ver las medidas de las resistencias obtenidas antes y después del ensayo, y haber obtenido su valor medio:

### Ensayo 1

Antes del ensayo			Después del ensayo		
Tensión(V)	Intensidad (mA)	R(Ω)	Tensión (V)	Intensidad (mA)	R(Ω)
2,409	61,000	39,492	2,009	51,600	38,934
2,364	60,000	39,400	2,011	51,600	38,973
2,414	61,500	39,252	2,001	51,600	38,779
	<b>promedio</b>	<b>39,381</b>		<b>Promedio</b>	<b>38,895</b>

Tabla 35: Resistencias obtenidas antes y después del primer ensayo de carga

Ahora vamos a proceder a representar los resultados obtenidos, para no saturar la memoria de datos los resultados obtenidos que no nos pide la normativa no los vamos a incluir en la tabla. Para la resistencia para los valores inferiores al 100% de la carga nominal la expresión lineal obtenida es:

$$R = 0,3306 * Par + 38,776$$

Ecuación 20: Ecuación lineal de la resistencia en el primer ensayo de carga

Carga (%)	M [Nm]	U [V]	I [A]	P [W]	R(Ω)
128%	1,83	385,65	1,06	494,54	39,38
122%	1,75	385,50	1,01	461,08	39,38
117%	1,68	380,24	0,98	431,37	39,38
113%	1,61	384,59	0,96	426,74	39,38
108%	1,54	386,51	0,93	405,79	39,38
102%	1,46	380,93	0,90	371,79	39,38
97%	1,39	382,98	0,89	369,87	39,24
92%	1,31	386,44	0,86	352,40	39,21
87%	1,24	382,06	0,84	322,50	39,19
82%	1,17	381,38	0,84	316,27	39,16
77%	1,10	386,37	0,82	307,47	39,14
71%	1,02	383,88	0,80	280,41	39,11
66%	0,95	381,04	0,80	269,11	39,09
62%	0,88	385,74	0,79	266,95	39,07
56%	0,80	384,38	0,78	238,24	39,04
51%	0,73	381,33	0,78	230,70	39,02
45%	0,65	383,95	0,78	228,97	38,99
41%	0,58	385,78	0,76	206,08	38,97
36%	0,51	381,19	0,77	193,21	38,94
31%	0,44	382,58	0,77	191,17	38,92
25%	0,36	386,94	0,76	176,69	38,90

Tabla 36: Resultados del primer ensayo de carga

### Ensayo 2

Antes del ensayo			Después del ensayo		
Tensión(V)	Intensidad (mA)	R(Ω)	Tensión (V)	Intensidad (mA)	R(Ω)
2,095	52,900	39,603	2,229	56,600	39,382
2,095	52,400	39,981	2,228	56,700	39,295
2,042	51,500	39,650	2,228	56,700	39,295
	<b>Promedio</b>	<b>39,745</b>		<b>Promedio</b>	<b>39,324</b>

Tabla 37: Resistencias obtenidas antes y después del segundo ensayo de carga

$$R = 0,2866 * Par + 39,22$$

Ecuación 21: Ecuación lineal de la resistencia en el segundo ensayo de carga

Carga (%)	M [Nm]	U [V]	I [A]	P [W]	R(Ω)
128%	1,83	377,79	1,05	474,28	39,74
122%	1,75	380,99	1,01	462,84	39,74
117%	1,68	384,02	0,97	441,03	39,74
113%	1,61	379,98	0,94	406,35	39,74
108%	1,54	379,20	0,92	396,46	39,74
102%	1,46	383,87	0,90	388,74	39,74
97%	1,39	382,76	0,87	358,31	39,62
92%	1,31	378,79	0,86	340,95	39,60
87%	1,24	383,47	0,84	334,61	39,58
82%	1,17	384,07	0,82	314,54	39,56
77%	1,10	378,52	0,81	290,36	39,54
71%	1,02	381,47	0,80	290,08	39,51
66%	0,95	384,56	0,79	278,06	39,49
62%	0,88	379,93	0,77	249,63	39,47
56%	0,80	379,38	0,77	242,54	39,45
51%	0,73	384,19	0,76	236,76	39,43
46%	0,66	382,39	0,75	211,20	39,41
41%	0,58	378,89	0,76	202,75	39,39
36%	0,51	383,22	0,75	202,52	39,37
31%	0,44	384,36	0,75	181,11	39,35
25%	0,36	379,50	0,76	168,55	39,32

Tabla 38: Resultados del segundo ensayo de carga

### Ensayo 3

Antes del ensayo			Después del ensayo		
Tensión(V)	Intensidad (mA)	R(Ω)	Tensión (V)	Intensidad (mA)	R(Ω)
1,990	50,000	39,800	2,015	51,100	39,432
1,991	50,000	39,820	2,014	51,100	39,413
1,991	50,200	39,661	2,013	51,200	39,316
		<b>39,760</b>			<b>39,387</b>

Tabla 39: Resistencias obtenidas antes y después del tercer ensayo de carga

$$R = 0,2539 * Par + 39,296$$

Ecuación 22: Ecuación lineal de la resistencia en el tercer ensayo de carga

Carga (%)	M [Nm]	U [V]	I [A]	P [W]	R( $\Omega$ )
128%	1,83	379,39	1,06	482,08	39,76
122%	1,75	379,10	1,01	450,17	39,76
117%	1,68	382,28	0,99	445,16	39,76
113%	1,61	384,24	0,95	420,81	39,76
108%	1,54	381,85	0,92	392,15	39,76
103%	1,47	380,56	0,91	381,80	39,76
97%	1,39	384,98	0,88	372,22	39,65
92%	1,31	384,99	0,86	346,02	39,63
87%	1,24	379,63	0,85	322,35	39,61
82%	1,17	383,15	0,84	321,07	39,59
77%	1,10	385,53	0,82	307,29	39,58
71%	1,02	381,15	0,80	276,43	39,55
66%	0,95	380,78	0,80	271,27	39,54
62%	0,88	385,42	0,78	265,82	39,52
56%	0,80	383,86	0,77	240,20	39,50
51%	0,73	379,92	0,77	223,45	39,48
46%	0,66	382,62	0,77	226,88	39,46
41%	0,58	386,00	0,76	212,29	39,44
36%	0,51	385,49	0,76	204,21	39,43
31%	0,44	384,56	0,75	181,37	39,41
25%	0,36	381,27	0,76	165,84	39,39

Tabla 40: Resultados del tercer ensayo de carga

### 5.6.1. Inductancia de dispersión total

La inductancia de dispersión total se puede calcular tanto por el ensayo de rotor bloqueado como por este ensayo. La ventaja principal de realizarlo mediante la curva de carga es que no es necesario realizar correcciones de temperatura. Y debido a que en nuestro laboratorio no estamos tomando mediciones de este tipo, es mejor elección para el cálculo de la inductancia de dispersión total.

### 5.6.2. Determinación de la inductancia de dispersión total a partir del ensayo de la curva de carga

Para determinar la inductancia de dispersión total vamos a realizarlo mediante los cálculos que nos indica la norma UNE-60034-28 en su apartado 7.5.4 ya que es más específica que la norma general y como se trata de un motor de inducción nos será válido.

Se nos indica como obtener una serie de valores de nuestro motor, algunos de ellos ya han sido obtenidos de manera automática mediante nuestro servofreno y su aparato de

medición. Es por ello que algunas de las ecuaciones de la norma no serán utilizados y por tanto no las añadiremos en este estudio.

$$I_s = I$$

*Ecuación 23: Intensidad del estator*

$$I_{sa} = I_s * \cos\varphi ; I_{sb} = -I_s * \sqrt{1 - (\cos\varphi)^2}$$

*Ecuación 24: Componentes de la corriente del estator*

$$U_i = \sqrt{U_{ia}^2 + U_{ib}^2}$$

*Ecuación 25: Tensión interna de la máquina*

$$U_{ia} = \frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{R}{2} * I_{sa}; U_{ib} = -\frac{R}{2} * I_{sb}$$

*Ecuación 26: Componentes de la tensión del estator*

Para los siguientes cálculos tomaremos  $L_{ts}$  a partir del ensayo en vacío por interpolación lineal entre dos tensiones adyacentes  $U_{i,s=0}$  a la tensión interna de la máquina  $U_i$ .

$$X_{ts} = 2\pi * f_N * L_{ts}$$

*Ecuación 27: Reactancia total del estator*

$$R'_{fe\Gamma} = R_{fe\Gamma} * \frac{U_i^2}{U_{i,s=0}^2}$$

*Ecuación 28: Resistencia de pérdidas en el hierro corregida*

$$I_{ma} = U_{ia} * \frac{1}{R'_{fe\Gamma}} + U_{ib} * \frac{1}{X_{ts}} ; I_{mb} = U_{ib} * \frac{1}{R'_{fe\Gamma}} - U_{ia} * \frac{1}{X_{ts}}$$

*Ecuación 29: Componentes de la intensidad de magnetización*

$$X'_{t\sigma} = \frac{U_{ib} * (I_{sa} - I_{ma}) - U_{ia} * (I_{sb} - I_{mb})}{(I_{sa} - I_{ma})^2 + (I_{sb} - I_{mb})^2}$$

*Ecuación 30: Reactancia total del rotor*

La norma nos indica llegados a este punto, que la reactancia de dispersión total debe crecer de forma estrictamente monótona con el decrecimiento de la intensidad. En caso contrario se nos pide que sustituyamos estos valores por una extrapolación lineal. En nuestro caso hemos tomado una cantidad de puntos bastante mayor al mínimo que nos pide la norma, por lo tanto hemos preferido eliminar estos valores, al tener una muestra lo suficientemente grande.

$$L''_{t\sigma} = \frac{X'_{t\sigma}}{2\pi * f_N}$$

*Ecuación 31: Inductancia del rotor*

$$L_{t\sigma} = L''_{t\sigma} * \frac{L_{ts}}{L_{ts} + L''_{t\sigma}}$$

*Ecuación 32: Inductancia equivalente en un sistema en L*

Finalmente nos pide que se tracen los valores de  $L_{t\sigma}$  en función de los valores de  $I_s$ .

A continuación añadiremos las tablas de cálculos conseguidas para los tres ensayos de carga con los resultados pedidos.

Ensayo 1

Carga (%)	s/%	I [A]	cos	Isa(A)	Isb(A)	Uia(V)	Uib(V)	Ui(V)	Lts(H)	Rfe'(Ω)	Xts(Ω)	Ima(A)	Imb(A)	Xtsigma'(Ω)	Ltsigma``(H)	Ltsigma(H)
128%	15,47	1,06	0,70	0,74	-0,76	208,08	14,88	208,61	1,43	2166,97	449,51	0,13	-0,46	154,23	0,49	0,37
122%	13,93	1,01	0,68	0,69	-0,74	208,97	14,51	209,47	1,43	2185,57	449,28	0,13	-0,46	168,35	0,54	0,39
117%	13,20	0,98	0,67	0,65	-0,73	206,64	14,46	207,14	1,43	2137,03	449,90	0,13	-0,45	184,87	0,59	0,42
113%	12,27	0,96	0,67	0,64	-0,72	209,43	14,12	209,90	1,43	2195,17	449,17	0,13	-0,46	185,06	0,59	0,42
108%	11,47	0,93	0,65	0,61	-0,70	211,22	13,81	211,67	1,43	2232,84	448,70	0,13	-0,46	197,15	0,63	0,44
102%	10,87	0,90	0,62	0,56	-0,71	208,83	13,89	209,29	1,43	2182,72	449,33	0,13	-0,46	228,77	0,73	0,48
97%	10,33	0,89	0,62	0,56	-0,70	210,17	13,69	210,62	1,43	2210,87	448,98	0,13	-0,46	228,92	0,73	0,48
92%	9,73	0,86	0,61	0,53	-0,68	212,79	13,42	213,21	1,43	2266,26	448,29	0,12	-0,47	245,89	0,78	0,51
87%	9,27	0,84	0,58	0,49	-0,69	211,04	13,49	211,47	1,43	2229,02	448,75	0,12	-0,46	287,29	0,91	0,56
82%	8,47	0,84	0,57	0,48	-0,69	210,81	13,46	211,24	1,43	2224,30	448,81	0,12	-0,46	296,18	0,94	0,57
77%	8,20	0,82	0,56	0,46	-0,68	214,08	13,29	214,49	1,43	2293,83	447,95	0,12	-0,47	312,62	1,00	0,59
71%	7,67	0,80	0,53	0,42	-0,68	213,38	13,32	213,80	1,43	2278,89	448,13	0,12	-0,47	366,85	1,17	0,64
66%	6,93	0,80	0,51	0,41	-0,69	212,02	13,51	212,45	1,43	2249,96	448,49	0,12	-0,47	393,37	1,25	0,67
62%	6,93	0,79	0,50	0,40	-0,69	214,90	13,39	215,32	1,43	2311,45	447,73	0,12	-0,47	405,33	1,29	0,68
56%	5,87	0,78	0,46	0,36	-0,69	214,94	13,47	215,36	1,43	2312,18	447,72	0,12	-0,47	487,16	1,55	0,74
25%	3,93	0,76	0,35	0,26	-0,71	218,27	13,85	218,71	1,42	2384,52	446,82	0,12	-0,48	717,17	2,28	0,88

Tabla 41: Inductancias totales y de dispersión a partir del primer ensayo de carga

Ensayo 2

Carga (%)	s/%	I [A]	cos	Isa(A)	Isb(A)	Uia(V)	Uib(V)	Ui(V)	Lts(H)	Rfe'(Ω)	Xts(Ω)	Ima(A)	Imb(A)	Xtsigma'(Ω)	Ltsigma``(H)	Ltsigma(H)
128%	16,07	1,05	0,69	0,72	-0,76	203,72	15,13	204,28	1,43	2077,07	450,67	0,13	-0,44	162,48	0,52	0,38
122%	14,80	1,01	0,69	0,70	-0,73	206,03	14,58	206,54	1,43	2124,43	450,06	0,13	-0,45	163,51	0,52	0,38
117%	13,60	0,97	0,68	0,66	-0,71	208,54	14,16	209,02	1,43	2176,53	449,40	0,13	-0,46	172,68	0,55	0,40
113%	12,67	0,94	0,66	0,62	-0,71	207,11	14,10	207,59	1,43	2146,91	449,78	0,13	-0,45	196,18	0,62	0,43
108%	11,67	0,92	0,65	0,60	-0,70	206,94	13,90	207,40	1,43	2143,25	449,83	0,13	-0,45	200,23	0,64	0,44
102%	11,13	0,90	0,65	0,58	-0,68	210,01	13,59	210,45	1,43	2207,32	449,02	0,13	-0,46	203,35	0,65	0,45
97%	10,47	0,87	0,62	0,54	-0,68	210,28	13,44	210,71	1,43	2213,11	448,95	0,12	-0,46	232,58	0,74	0,49
92%	9,93	0,86	0,60	0,52	-0,69	208,40	13,57	208,85	1,43	2173,78	449,45	0,13	-0,46	255,55	0,81	0,52
87%	9,27	0,84	0,60	0,50	-0,67	211,43	13,29	211,85	1,43	2237,32	448,65	0,12	-0,47	260,67	0,83	0,52
82%	8,67	0,82	0,58	0,47	-0,67	212,39	13,20	212,80	1,43	2257,69	448,40	0,12	-0,47	290,53	0,92	0,56
77%	8,00	0,81	0,55	0,44	-0,67	209,78	13,33	210,21	1,43	2202,62	449,09	0,12	-0,46	334,23	1,06	0,61
71%	7,60	0,80	0,55	0,44	-0,67	211,57	13,29	211,99	1,43	2240,32	448,61	0,12	-0,47	337,78	1,08	0,61
66%	7,33	0,79	0,53	0,42	-0,67	213,78	13,18	214,19	1,43	2287,38	448,03	0,12	-0,47	365,60	1,16	0,64
62%	6,47	0,77	0,49	0,38	-0,67	211,87	13,29	212,28	1,43	2246,58	448,54	0,12	-0,47	437,09	1,39	0,70
56%	6,60	0,77	0,48	0,37	-0,68	211,75	13,42	212,18	1,43	2244,17	448,56	0,12	-0,47	459,64	1,46	0,72
51%	6,13	0,76	0,47	0,36	-0,67	214,80	13,29	215,21	1,43	2309,24	447,76	0,12	-0,47	488,33	1,55	0,74
31%	4,53	0,75	0,36	0,27	-0,70	216,56	13,70	216,99	1,42	2347,26	447,28	0,12	-0,48	706,14	2,25	0,87

Tabla 42: Inductancias totales y de dispersión a partir del segundo ensayo de carga

Ensayo 3

Carga (%)	s/%	I [A]	cos	Isa(A)	Isb(A)	Uia(V)	Uib(V)	Ui(V)	Lts(H)	Rfe'(Ω)	Xts(Ω)	Ima(A)	Imb(A)	Xtsigma'(Ω)	Ltsigma``(H)	Ltsigma(H)
128%	15,87	1,06	0,69	0,73	-0,77	204,46	15,27	205,03	1,43	2092,21	450,47	0,13	-0,45	160,81	0,51	0,38
122%	14,53	1,01	0,68	0,69	-0,75	205,24	14,85	205,78	1,43	2108,35	450,27	0,13	-0,45	174,76	0,56	0,40
113%	12,93	0,95	0,67	0,63	-0,71	209,27	14,07	209,75	1,43	2191,94	449,21	0,13	-0,46	186,25	0,59	0,42
108%	11,73	0,92	0,64	0,59	-0,71	208,67	14,03	209,14	1,43	2179,34	449,37	0,13	-0,46	209,13	0,67	0,45
103%	11,13	0,91	0,64	0,58	-0,70	208,20	13,99	208,67	1,43	2169,58	449,50	0,13	-0,46	217,47	0,69	0,47
97%	10,33	0,88	0,63	0,56	-0,69	211,20	13,60	211,64	1,43	2232,49	448,71	0,12	-0,46	222,28	0,71	0,47
92%	10,20	0,86	0,61	0,52	-0,68	211,99	13,49	212,42	1,43	2249,32	448,50	0,12	-0,47	251,61	0,80	0,51
87%	9,20	0,85	0,58	0,49	-0,69	209,47	13,67	209,92	1,43	2196,07	449,16	0,13	-0,46	286,21	0,91	0,56
82%	9,13	0,84	0,58	0,48	-0,68	211,64	13,50	212,07	1,43	2241,72	448,59	0,12	-0,47	287,80	0,92	0,56
77%	8,47	0,82	0,56	0,46	-0,68	213,48	13,39	213,90	1,43	2280,96	448,10	0,12	-0,47	311,17	0,99	0,58
71%	7,87	0,80	0,52	0,42	-0,68	211,78	13,48	212,21	1,43	2244,73	448,56	0,12	-0,47	372,79	1,19	0,65
66%	7,33	0,80	0,51	0,41	-0,69	211,71	13,59	212,15	1,43	2243,34	448,57	0,12	-0,47	387,16	1,23	0,66
62%	6,80	0,78	0,51	0,40	-0,68	214,65	13,37	215,07	1,43	2306,05	447,79	0,12	-0,47	403,87	1,29	0,68
51%	5,60	0,77	0,44	0,34	-0,69	212,64	13,66	213,08	1,43	2263,05	448,32	0,12	-0,47	524,34	1,67	0,77
41%	4,93	0,76	0,42	0,32	-0,69	216,60	13,61	217,02	1,42	2348,05	447,27	0,12	-0,48	585,89	1,86	0,81
31%	4,27	0,75	0,36	0,27	-0,70	216,66	13,86	217,10	1,42	2349,38	447,25	0,12	-0,48	697,78	2,22	0,87

Tabla 43: Inductancias totales y de dispersión a partir del tercer ensayo de carga

5.6.3. Inductancia de magnetización  $L_m$  y tensión  $U_m$  a partir del ensayo de carga.

De nuevo utilizaremos la norma UNE-60034-28 que es algo más extensa nos indica que debemos realizar las siguientes fórmulas para cada uno de los valores determinados de la inductancia del estator  $L_{ts}$  y la inductancia  $L_{t\sigma}$  determinados a partir de la curva de carga. Los cálculos a realizar son los siguientes:

$$L_m = L_{ts} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_\sigma}}$$

Ecuación 33: Inductancia de magnetización

$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

Ecuación 34: Inductancia de dispersión del estator

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

Ecuación 35: Tensión de magnetización

$$U_{ma} = \frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{R}{2} * I_{sa} + 2\pi * f_N * L_{\sigma s} * I_{sb}; U_{mb} = -\frac{R}{2} * I_{sb} - 2\pi * f_N * L_{\sigma s} * I_{sa};$$

Ecuación 36: Componentes de la tensión de magnetización

Nos pide una vez calculados los valores representar  $L_m$  en función de los valores de  $U_m$ .

Ensayo 1

Carga (%)	Lm(H)	Lsigmas (H)	Um(V)	Uma(V)	Umb(V)
128%	1,14	0,29	148,47	138,64	-53,13
122%	1,12	0,31	146,74	136,78	-53,14
117%	1,10	0,33	140,51	129,64	-54,20
113%	1,10	0,33	144,37	134,27	-53,05
108%	1,08	0,35	144,32	134,39	-52,61
102%	1,04	0,39	134,80	123,31	-54,45
97%	1,04	0,39	136,66	125,56	-53,95
92%	1,02	0,40	136,72	125,84	-53,46
87%	0,98	0,45	126,99	114,56	-54,80
82%	0,97	0,45	125,32	112,67	-54,88
77%	0,96	0,47	126,35	114,05	-54,39
71%	0,91	0,51	117,04	103,46	-54,74
66%	0,89	0,53	110,72	96,17	-54,85
62%	0,88	0,54	112,37	98,21	-54,61
56%	0,83	0,59	101,33	86,17	-53,32
25%	0,72	0,70	75,69	61,43	-44,21

Tabla 44: Inductancia y tensión de magnetización en el primer ensayo de carga

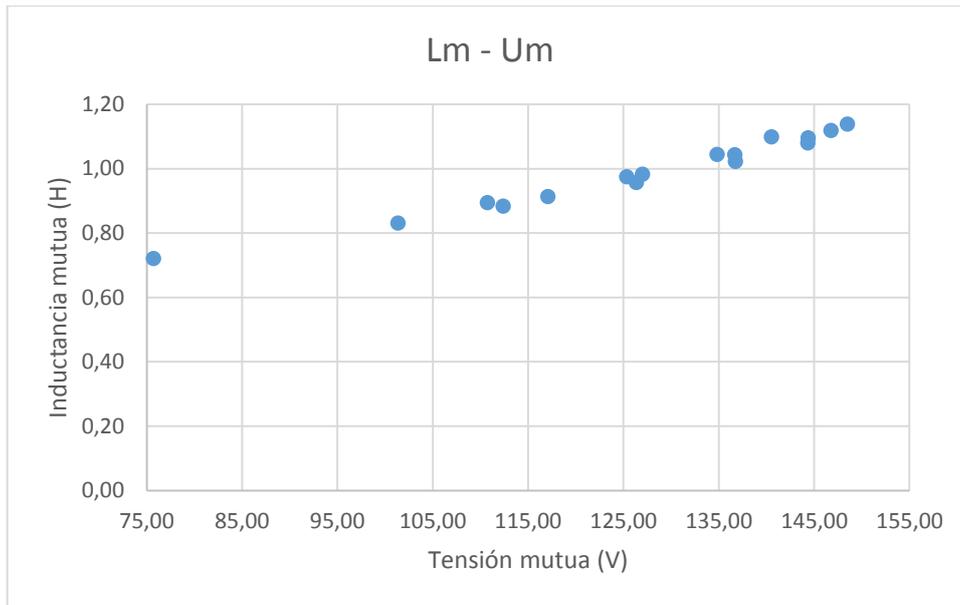


Gráfico 22: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante

Ensayo 2

Carga (%)	Lm	Lsigma s	Um	Uma	Umb
128%	1,13	0,30	141,73	130,99	-54,12
122%	1,13	0,31	145,53	135,64	-52,72
117%	1,11	0,32	146,92	137,41	-52,01
113%	1,08	0,35	140,14	129,57	-53,37
108%	1,08	0,35	139,84	129,40	-53,01
102%	1,07	0,36	143,15	133,42	-51,87
97%	1,04	0,39	137,67	127,14	-52,81
92%	1,02	0,41	130,78	119,04	-54,16
87%	1,01	0,42	133,85	122,84	-53,16
82%	0,98	0,45	129,76	118,23	-53,48
77%	0,94	0,49	119,56	106,38	-54,56
71%	0,94	0,49	120,81	107,87	-54,39
66%	0,91	0,51	119,27	106,31	-54,06
62%	0,86	0,56	107,17	92,64	-53,89
56%	0,85	0,58	103,22	88,20	-53,62
51%	0,83	0,59	103,52	88,81	-53,19
31%	0,73	0,70	78,80	64,06	-45,90

Tabla 45: Inductancia y tensión de magnetización en el segundo ensayo de carga

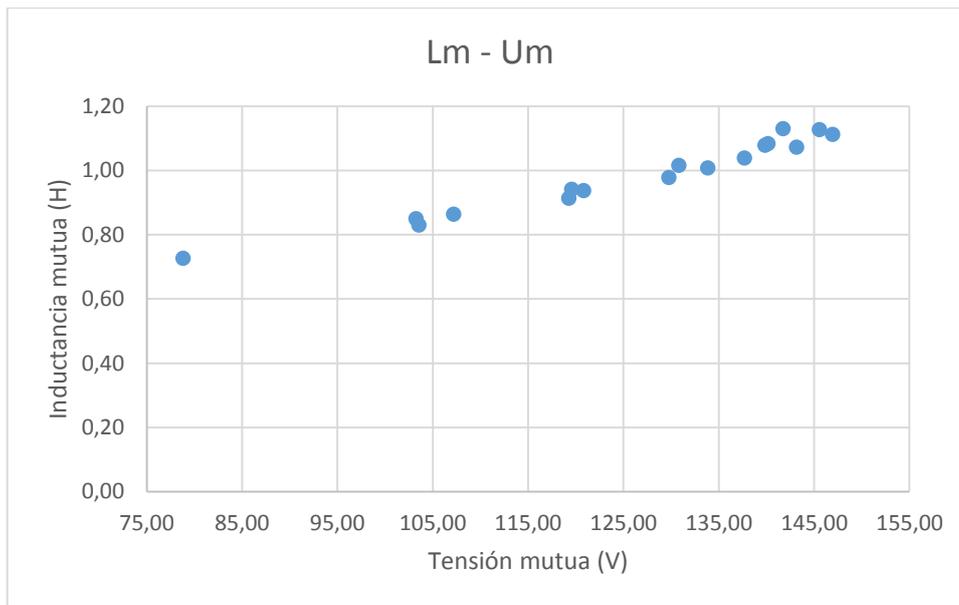


Gráfico 23: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante

Ensayo 3

Carga (%)	Lm	Lsigma s	Um	Uma	Umb
128%	1,13	0,30	142,41	131,66	-54,28
122%	1,11	0,32	140,88	130,04	-54,20
113%	1,09	0,34	144,61	134,73	-52,53
108%	1,07	0,36	138,88	128,09	-53,67
103%	1,06	0,37	136,80	125,72	-53,93
97%	1,05	0,38	139,98	129,64	-52,79
92%	1,02	0,41	135,21	124,21	-53,42
87%	0,98	0,45	125,60	112,97	-54,89
82%	0,98	0,45	128,09	115,99	-54,36
77%	0,96	0,47	126,32	114,09	-54,22
71%	0,91	0,52	114,66	100,76	-54,72
66%	0,90	0,53	111,74	97,39	-54,78
62%	0,88	0,54	113,56	99,75	-54,28
51%	0,81	0,62	94,48	78,89	-52,00
41%	0,78	0,65	91,86	76,52	-50,82
31%	0,73	0,69	77,97	63,31	-45,51

Tabla 46: Inductancia y tensión de magnetización en el tercer ensayo de carga

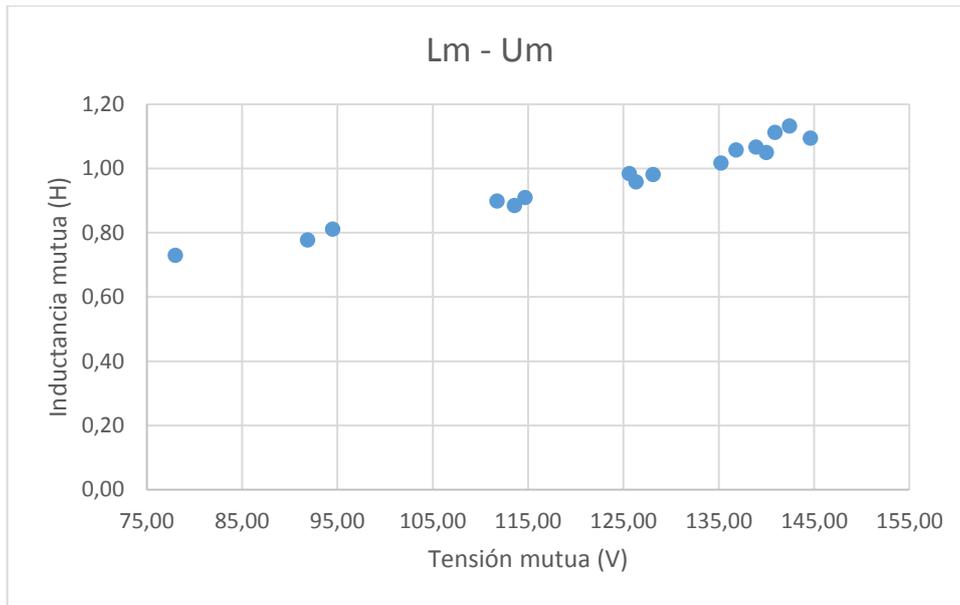


Gráfico 24: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante

#### 5.6.4. Inductancia de dispersión del estator y del rotor

La norma nos indica que estos valores se calculan con las siguientes fórmulas:

$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

$$L'_{\sigma r} = L_{t\sigma} - L_s$$

Ecuación 37: Cálculo de las inductancias de estator y rotor

Y debemos trazar los valores de la inductancia de dispersión del estator y del rotor en función de la intensidad del estator.

#### Ensayo 1

Carga (%)	U [V]	I [A]	Lsigmas (H)	Lsigma r' (H)
128%	385,65	1,06	0,29	0,07
122%	385,50	1,01	0,31	0,08
117%	380,24	0,98	0,33	0,08
113%	384,59	0,96	0,33	0,08
108%	386,51	0,93	0,35	0,09
102%	380,93	0,90	0,39	0,10
97%	382,98	0,89	0,39	0,10
92%	386,44	0,86	0,40	0,10
87%	382,06	0,84	0,45	0,11
82%	381,38	0,84	0,45	0,11
77%	386,37	0,82	0,47	0,12

71%	383,88	0,80	0,51	0,13
66%	381,04	0,80	0,53	0,13
62%	385,74	0,79	0,54	0,14
56%	384,38	0,78	0,59	0,15
25%	386,94	0,76	0,70	0,18

Tabla 47: Cálculo de las inductancias de estator y rotor

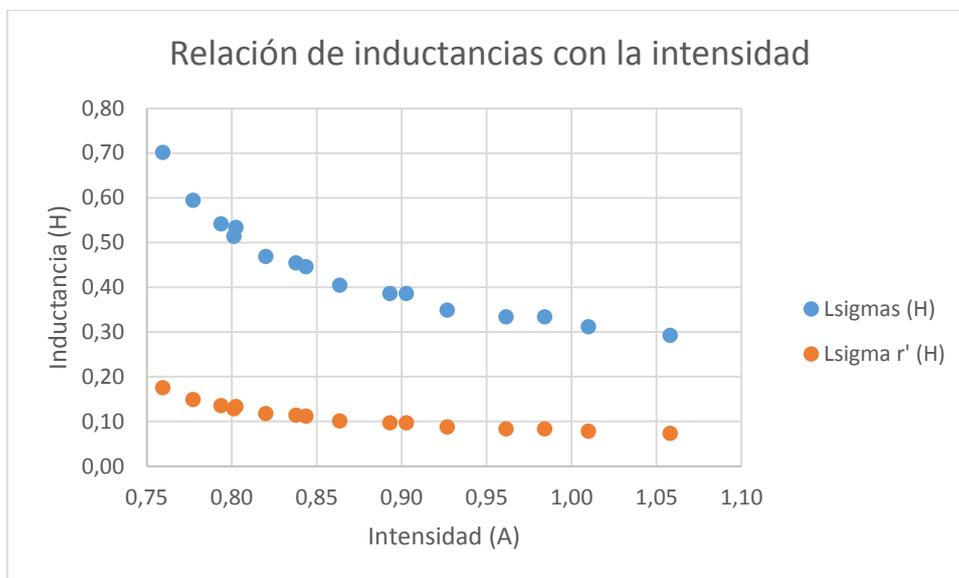


Gráfico 25: Relación de inductancias de estator y rotor con la intensidad

### Ensayo 2

Carga (%)	U [V]	I [A]	Lsigma s	Lsigma r'
128%	377,79	1,05	0,30	0,08
122%	380,99	1,01	0,31	0,08
117%	384,02	0,97	0,32	0,08
113%	379,98	0,94	0,35	0,09
108%	379,20	0,92	0,35	0,09
102%	383,87	0,90	0,36	0,09
97%	382,76	0,87	0,39	0,10
92%	378,79	0,86	0,41	0,10
87%	383,47	0,84	0,42	0,10
82%	384,07	0,82	0,45	0,11
77%	378,52	0,81	0,49	0,12
71%	381,47	0,80	0,49	0,12
66%	384,56	0,79	0,51	0,13
62%	379,93	0,77	0,56	0,14
56%	379,38	0,77	0,58	0,14
51%	384,19	0,76	0,59	0,15
31%	384,36	0,75	0,70	0,17

Tabla 48: Cálculo de las inductancias de estator y rotor

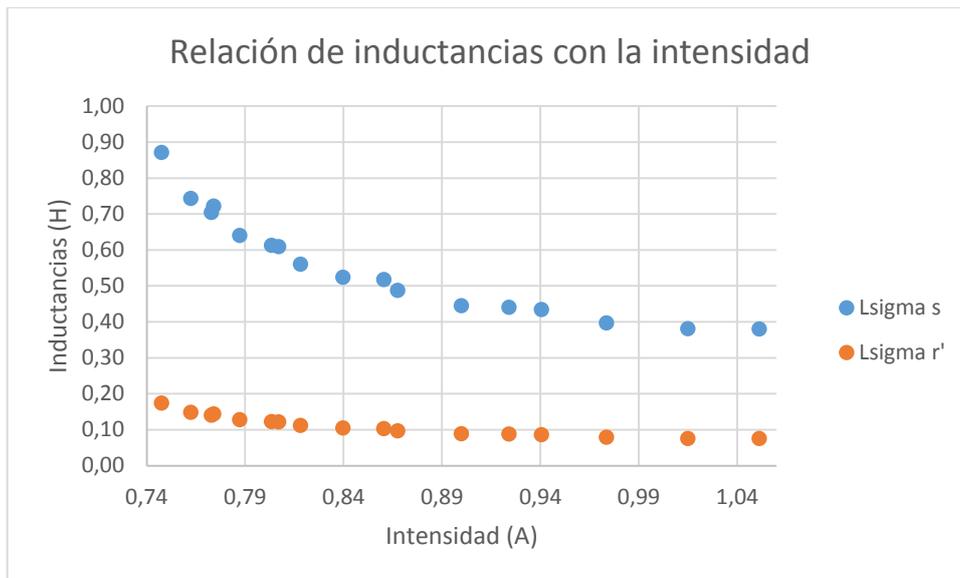


Gráfico 26: Relación de inductancias de estator y rotor con la intensidad

### Ensayo 3

Carga (%)	U [V]	I [A]	Lsigma s	Lsigma r'
128%	379,39	1,06	0,30	0,08
122%	379,10	1,01	0,32	0,08
113%	384,24	0,95	0,34	0,08
108%	381,85	0,92	0,36	0,09
103%	380,56	0,91	0,37	0,09
97%	384,98	0,88	0,38	0,09
92%	384,99	0,86	0,41	0,10
87%	379,63	0,85	0,45	0,11
82%	383,15	0,84	0,45	0,11
77%	385,53	0,82	0,47	0,12
71%	381,15	0,80	0,52	0,13
66%	380,78	0,80	0,53	0,13
62%	385,42	0,78	0,54	0,14
51%	379,92	0,77	0,62	0,15
41%	386,00	0,76	0,65	0,16
31%	384,56	0,75	0,69	0,17

Tabla 49: Cálculo de las inductancias de estator y rotor

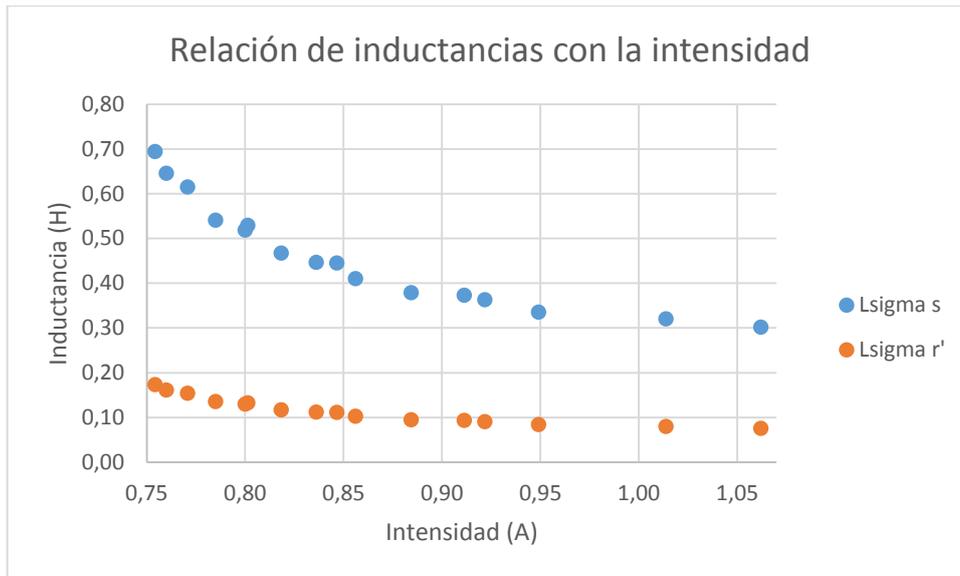


Gráfico 27: Relación de inductancias de estator y rotor con la intensidad

## 5.7. Inductancias para cálculos a flujo constante

Es normal que se simplifiquen los valores obtenidos anteriormente. Para estos casos las inductancias deben estar dadas para el funcionamiento asignado. Y evitar su dependencia con la intensidad que las recorres. Para ello determinamos los siguientes valores nomnales de intensidades y/o tensiones:

Se determina la intensidad del estator para funcionamiento asignado:

$$I_s = I_N$$

Ecuación 38: Intensidad del estator

Determinaremos la inductancia  $L_s$  por interpolación lineal con la intensidad del estator.

Se determina la tensión del estator:

$$U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

Ecuación 39: Tensión del estator

Se determina la tensión de magnetización:

$$U_{ma} = U_s - I_s * (\cos(\varphi_N) * R_{s,25^\circ} + \sqrt{1 - \cos(\varphi_N)^2} * 2 * \pi * f_N * L_{\sigma s})$$

Ecuación 40: Componente de la tensión de magnetización

$$U_{mb} = I_s * (\sqrt{1 - \cos(\varphi_N)^2} * R_{s,25^\circ} - \cos(\varphi_N) * 2 * \pi * f_N * L_{\sigma s})$$

Ecuación 41: Componente de la tensión de magnetización

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

Ecuación 42: Tensión de magnetización

Mediante la tensión de magnetización obtenida podemos calcular  $L_m$  mediante interpolación lineal.

$$I_r' = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi * f_N * L_m} * I_s \cos(\varphi_N)\right)^2 + \left(I_s \sqrt{1 - \cos(\varphi_N)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi * f_N * L_m}\right)^2}$$

Ecuación 43: Intensidad equivalente del rotor

Y obtenemos por último  $L_r'$  mediante interpolación lineal con la intensidad del rotor calculada.

Para el ensayo de la curva de carga el resultado es:

Is(A)	Um (V)	Uma (V)	Umb	Ir' (A)	Lsigmas (H)	Lsigmar (H)	Lm (H)
0,89	138,18	116,49	-40,23	0,76	0,38	0,16	0,95

Tabla 50: Valores del motor a flujo constantes en el ensayo de carga

Is(A)	Um (V)	Uma (V)	Umb	Ir' (A)	Lsigmas (H)	Lsigmar' (H)	Lm (H)
1,13	124,31	119,57	-33,97	0,29	0,27	0,07	0,65

Tabla 51: Valores del motor a flujo constante en el ensayo de rotor bloqueado

Para el cálculo de la resistencia real de la resistencia del hierro:

$$R_{fe} = R_{fe\Gamma} * \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}$$

Ecuación 44: Resistencial del hierro

Ensayo	1	2	3	Media
Rfe(Ω)	1677,04	1822,11	1635,58	1711,58

Tabla 52: Resistencia del hierro en el ensayo de carga

Ensayo	1	2	3	Media
Rfe(Ω)	1669,14	1813,53	1627,87	1703,51

Tabla 53: Resistencia del hierro en el ensayo de rotor bloqueado

Una vez llegados a este punto podemos construir el circuito equivalente debido a que ya hemos obtenido todos los parámetros desconocidos del mismo.

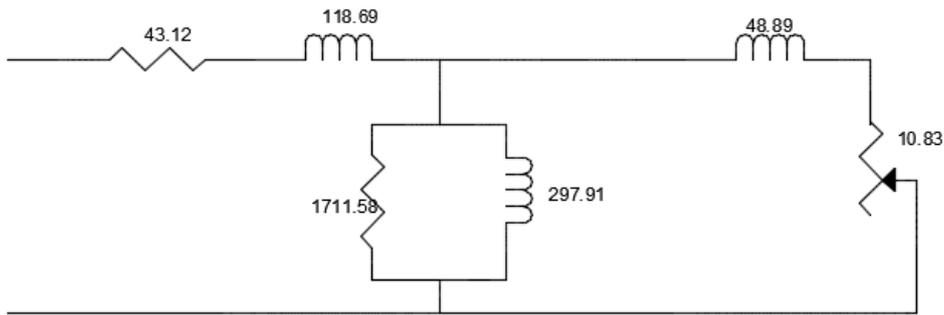


Figura 24: Circuito equivalente a partir del ensayo de carga

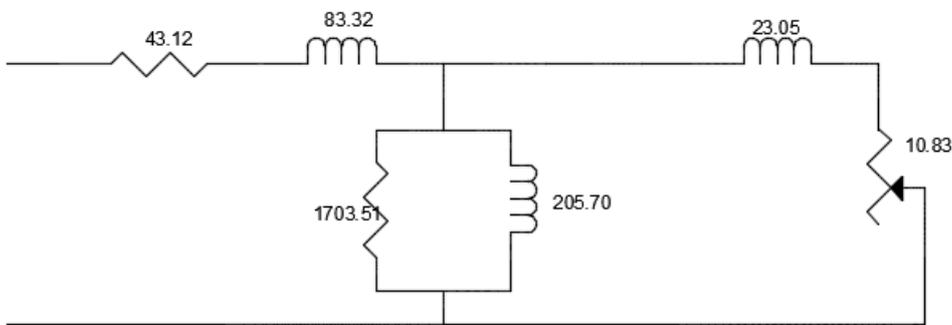


Figura 25: Circuito equivalente a partir del ensayo de rotor bloqueado

### 5.8. Ensayo de deceleración

Para nuestro estudio este ensayo no es realmente necesario. Esto se debe a que suele ser un ensayo realizado a máquinas de grandes dimensiones en las que es difícil realizar los ensayos típicos de motores eléctricos. Su objetivo es obtener de manera separada las diferentes pérdidas del motor de manera separada. Nosotros ya conocemos las pérdidas que tendríamos que obtener de esta prueba, por lo que nuestro objetivo es tan solo obtener una serie de parámetros que se obtienen en el transcurso del mismo.

Este ensayo se recoge en la norma UNE 60034-2-1 anexo D, “otros métodos de ensayo”. Principalmente constará de dos partes, por un lado calcular la variación de velocidad con respecto al tiempo  $\frac{dn}{dt}$  y más adelante obtener las pérdidas del motor. Para obtener las pérdidas del motor nos indica que hay dos casos, conocer o no la inercia del motor. No se conoce la inercia de nuestro motor y es uno de los parámetros que estamos buscando en este ensayo.

Para obtener la inercia debemos ver una de las fórmulas fundamentales que nos indica la norma:

$$C = \frac{4\pi^2 J}{60^2 * 10^3} = 10,97 * 10^{-6} J$$

*Ecuación 45: Constante de deceleración*

Cuando  $n$  se expresa en rev/min y  $P_t$  se da en kW y  $J$  es el momento de inercia en  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ .

La constante de deceleración  $C$  es un valor no conocido que debemos calcular. Para ello en el ensayo de deceleración para máquinas con inercia desconocidas nos indica que lo más sencillo sería poder poner la máquina en vacío, ya que nos daría los valores de las pérdidas del hierro y de deslizamiento y ventilación. Como en nuestra caracterización ya hemos realizado el ensayo y calculado sus valores podemos proceder directamente a ver la fórmula:

$$C = \frac{P_{fw} + P_{fe}}{n_N * \frac{dn}{dt} |_2}$$

*Ecuación 46: Constante de deceleración*

Es por ello que para el cálculo de  $C$ , que es la única incógnita para obtener el momento de inercia, debemos obtener la variación de la velocidad con respecto al tiempo de la que hablábamos anteriormente. La norma nos habla entonces de tres posibilidades para calcularla.

Una manera de obtener la deceleración de la máquina es ir obteniendo que desaceleración se produce entre cada punto medido en el ensayo y luego comparar como evoluciona dicha deceleración en un rango de velocidades en torno a la nominal. Una vez tenemos la gráfica mediante una línea de tendencia podremos obtener una estimación de cual será la deceleración a velocidad nominal.

Para poder ver la deceleración la norma UNE 60034-2-1 en su anexo D apartado 7.3.4 el procedimiento que se debe seguir. Para nuestro caso aceleramos rápidamente la máquina y la ponemos en vacío. Y después buscamos la desconexión de la máquina. Tomando medidas de como baja la velocidad y en que instante de tiempo.

Este ensayo tiene un conexionado al servofreno, que no cambia con respecto al ensayo de carga. Y la desconexión del motor la haremos desconectando el regulador de tensión directamente.

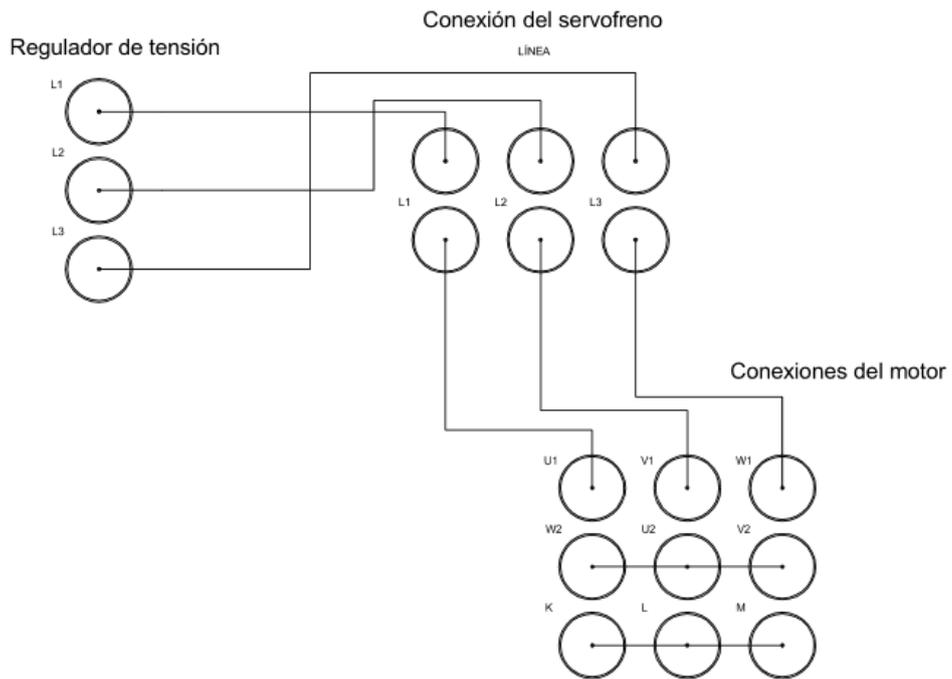


Figura 26: Conexión para el ensayo de deceleración

Las mediciones tomadas las vamos a representar en una gráfica, además añadiremos como desciende la tensión, para ver como se produce la desconexión:

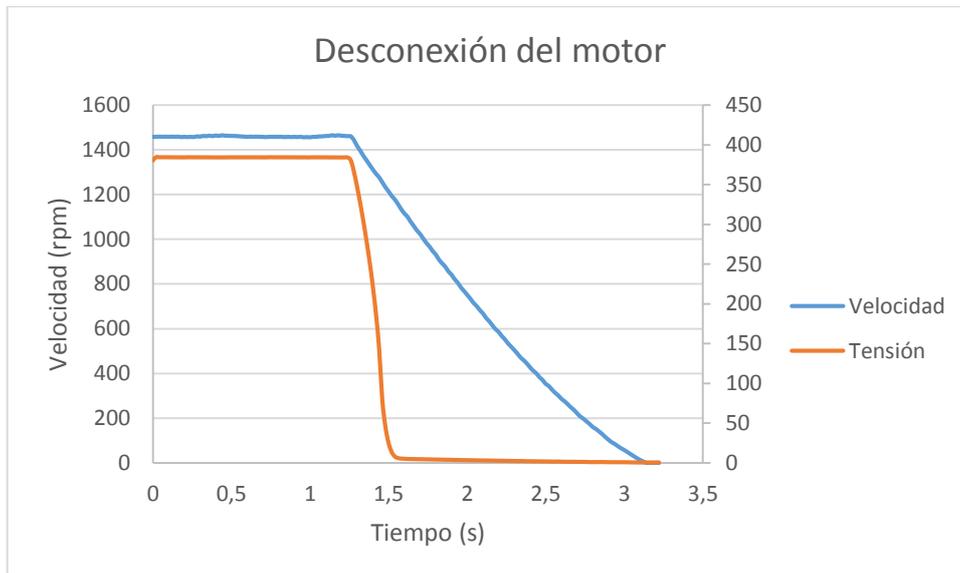


Gráfico 28: Ensayo de deceleración 1

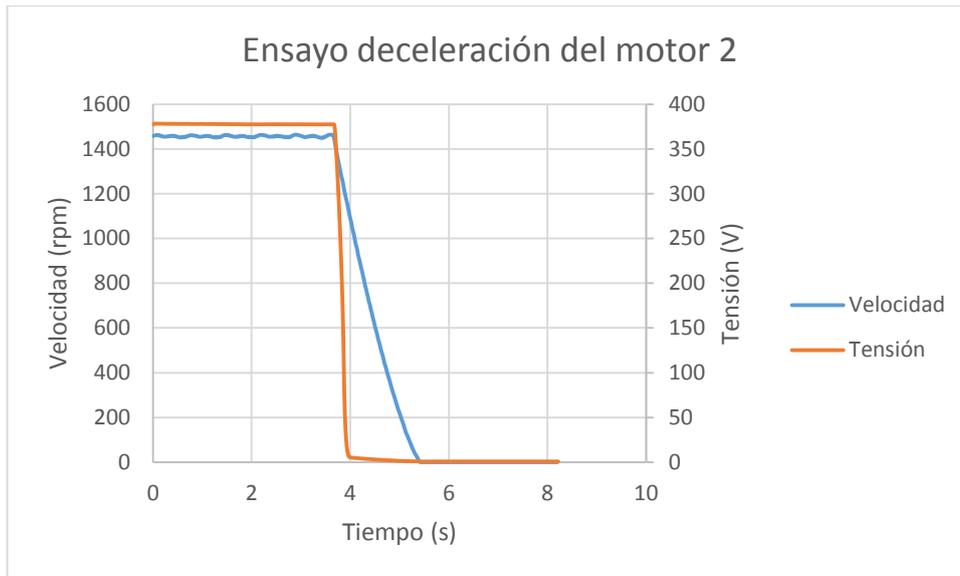


Gráfico 29: Ensayo de deceleración 2

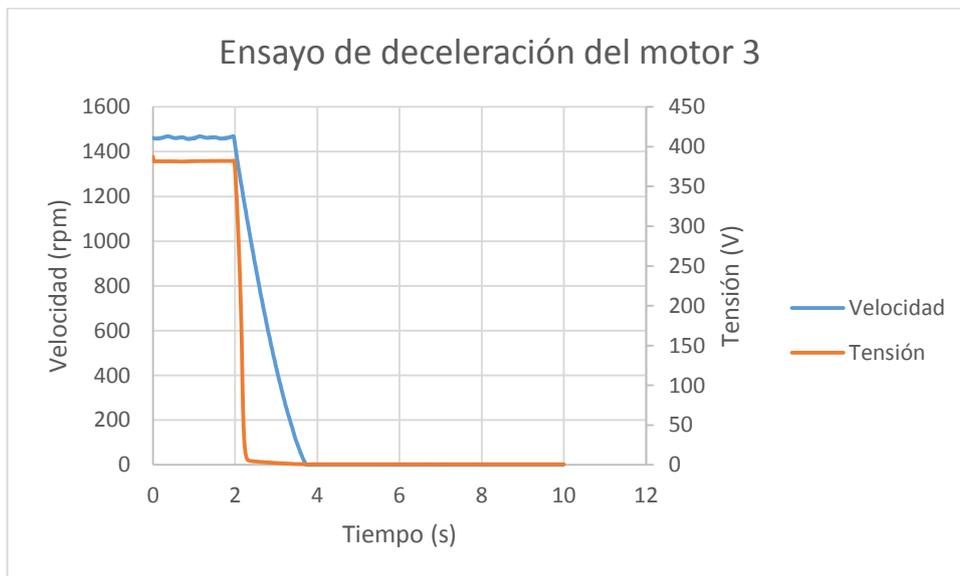


Gráfico 30: Ensayo de deceleración 3

Ahora con los ensayos realizados debemos obtener el valor  $\frac{dn}{dt}$  y para eso utilizaremos el tercer método que nos indica la normativa al respecto, método de velocidad de rotación media. Nos indica por un lado que debemos calcular las velocidades medias en cada punto, lo cual no es necesario que realicemos debido a que la máquina ya nos indica la velocidad media en dicho punto. Y después debemos calcular la desaceleración media en un momento intermedio:

$$\frac{dn}{dt} = 2 * \frac{n_n - n_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}$$

Ecuación 47: Variación de la velocidad

Calculamos esta desaceleración para los puntos más cercanos a la velocidad nominal, desde que lo ponemos en vacío hasta una velocidad en torno a 1000rpm. Y después realizamos

la representación de esta desaceleración con respecto a la evolución de la velocidad. Realizando una regresión lineal podremos obtener la fórmula para calcular  $\frac{dn}{dt}$  en la velocidad nominal. Los resultados obtenidos son los siguientes:

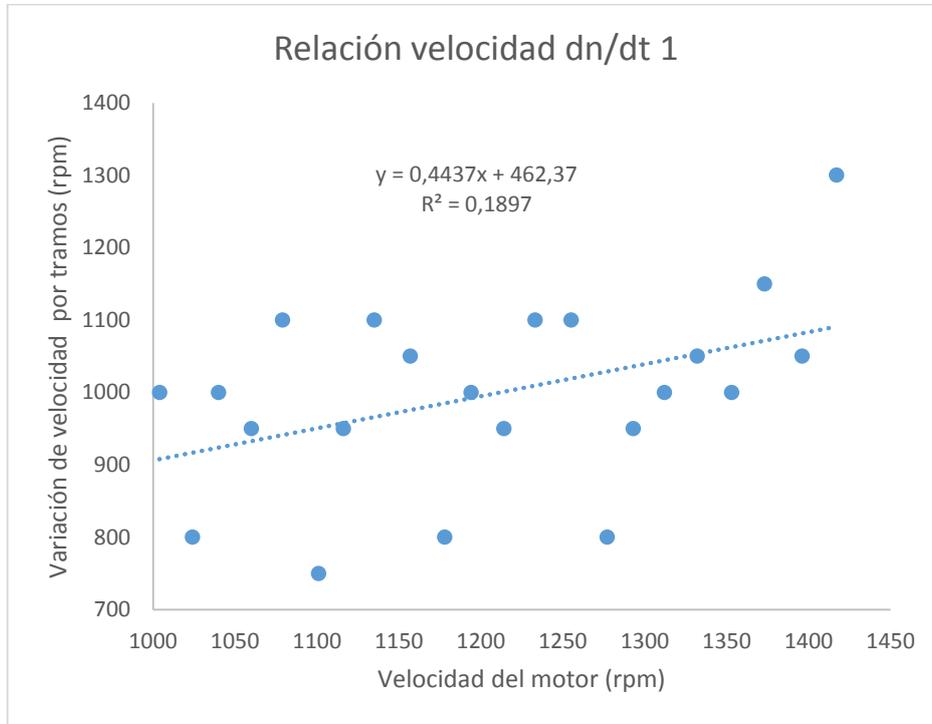


Gráfico 31: Relación velocidad con deceleración 1

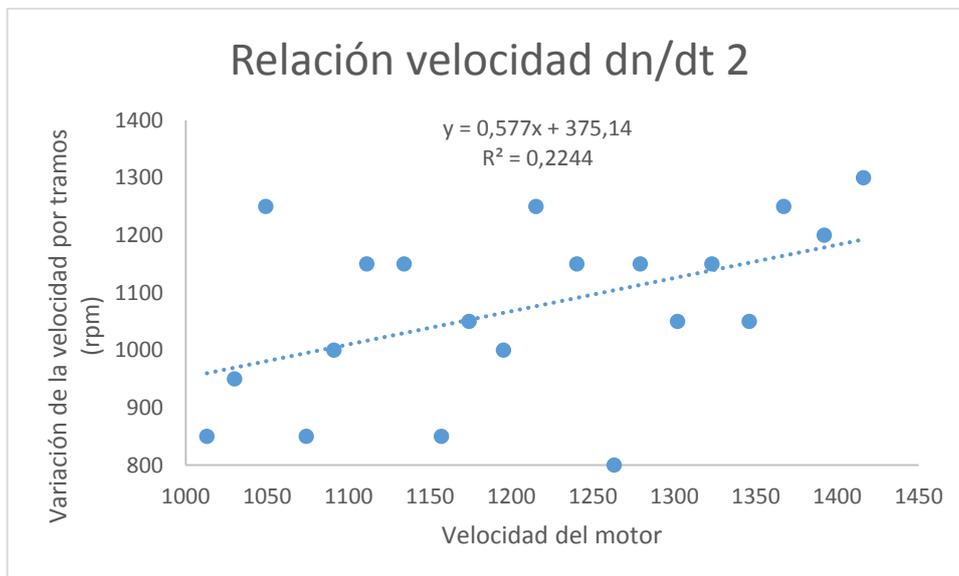


Gráfico 32: Relación velocidad con deceleración 2

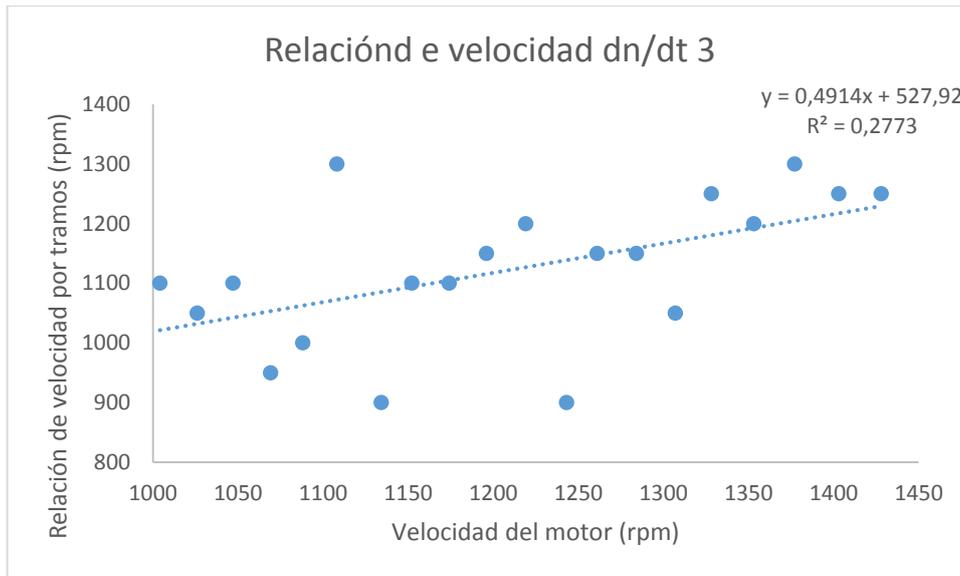


Gráfico 33: Relación velocidad con deceleración 3

El resultado final de  $\frac{dn}{dt}$  de los tres ensayos realizados para la velocidad nominal es el siguiente:

Ensayo	1	2	3	media
dn/dt	1056,93	1148,32	1186,40	1130,55

Tabla 54: Variación media de la velocidad

## 6. Servofreno

Para algunos de los ensayos hemos utilizado un servofreno, exactamente el modelo CO3636-6V con su unidad de pruebas correspondiente. Con el podremos hacer funcionar el motor con diferentes pares resistentes. La unidad de pruebas tiene diferentes configuraciones. Podremos hacerla funcionar de los siguientes modos:

- **Control de velocidad:** Nos permitirá poner a la velocidad deseada la máquina ya que el servofreno pondrá el par resistente adecuado.
- **Control de par:** En este caso nos permitirá poner el par resistente que precisemos.
- **Sincronismo:** Modo de sincronismo con la red que no nos es de utilidad para el proyecto.
- **Modo PC:** También podemos realizar los controles de par y velocidad, además de otros controles mediante un programa informático llamado "Active Servo". Además esto nos permitirá obtener los valores directamente para pasar a una hoja de cálculo. Más adelante explicaremos más detalladamente el programa en cuestión.

Si conectamos al ordenador podremos obtener una gran cantidad de parámetros que analiza el servofreno, sin embargo si utilizamos los demás modos no. El servofreno incorpora dos displays, uno que nos indica la velocidad en cada momento, y otro que nos indica el par. Además de contar con una rueda para regular el valor que estemos controlando. También

se cuenta con salidas de estos valores para poder medirlos con otro aparato en caso de ser necesario.

## 6.1. Active Servo

Una de las herramientas de trabajo que hemos utilizado es el software “Active Servo” que nos ofrece nuestro servofreno de Lucas Nülle. Aunque manualmente podemos realizar una serie de acciones como control de par y velocidad principalmente. Que aunque nos pueden ser útiles en ciertos casos, como para obtener el par nominal de la máquina por ejemplo nos presenta mayores problemas a la hora de realizar un ensayo de curva de carga por ejemplo. Es por ello que este software nos da la posibilidad de realizar ensayos de maneras muy diversas y con gran flexibilidad, midiendo todos los valores de manera automática y pudiendo exportar los resultados de una manera sencilla a una hoja de cálculo.

El programa tiene la siguiente estructura, que prácticamente no cambia en los diferentes usos:

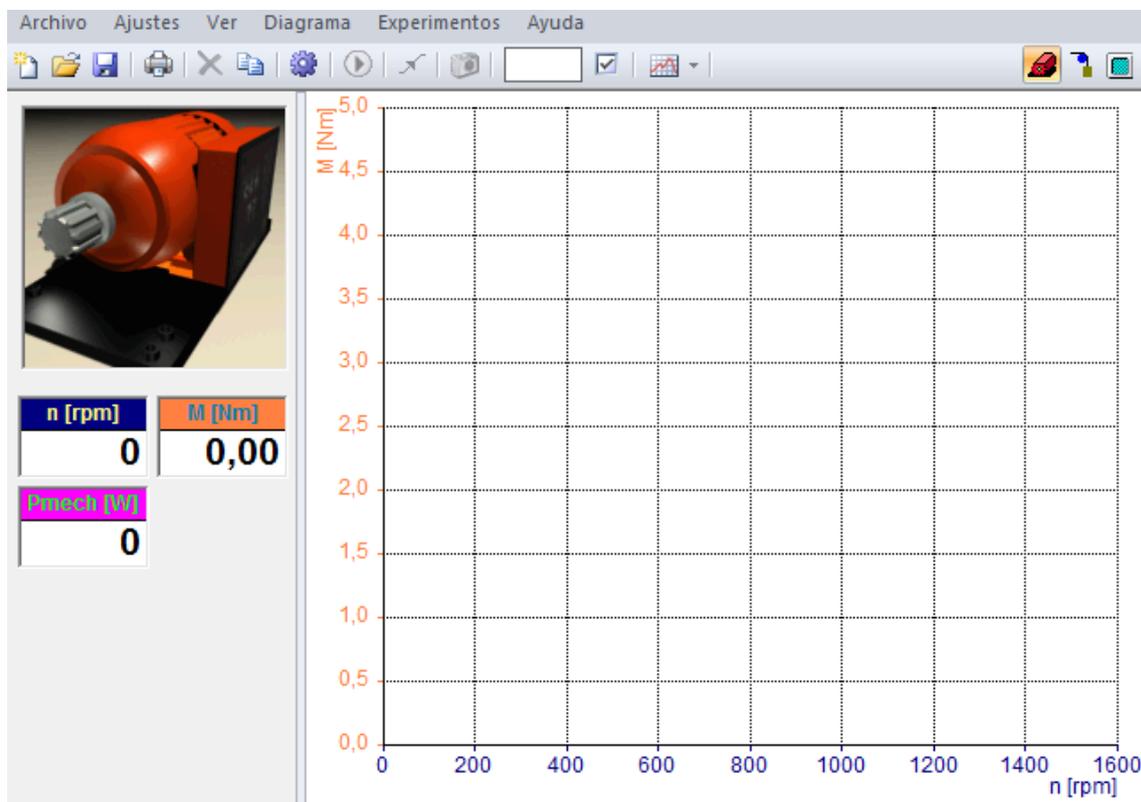


Figura 27: Pantalla principal de ActiveServo

Como podemos ver tiene tres partes diferenciadas:

- En primer lugar la barra superior que nos da diferentes opciones sobre el programa:

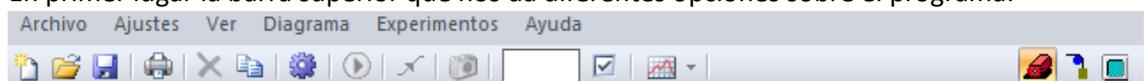


Figura 28: Parte superior del programa ActiveServo

Vamos a comentar las principales opciones que nos ofrece el programa en esta parte, sin entrar a la parte genérica que tienen prácticamente todos los programas de Windows. En los menús superiores sobre todo nos interesarán los siguientes apartados:

- Ajustes:
  - Preajustes: Aunque no sale en primer lugar, es uno de los elementos más importantes del programa. Ya que en el configuraremos los parámetros de nuestro motor. Y según el modo de operación también los valores de velocidad y par en el apartado “Rampa”.

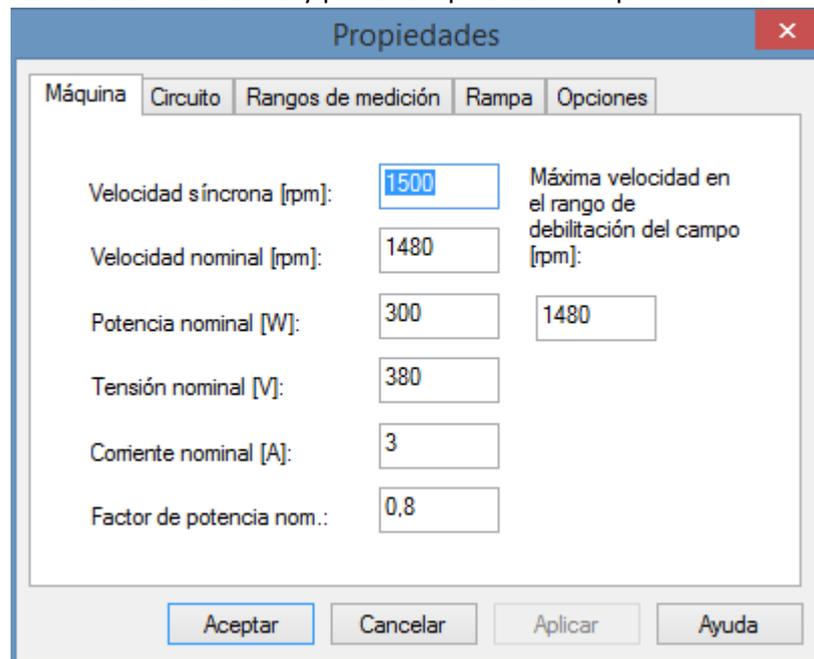


Figura 29: Propiedades en ActiveServo

- **Conectar accionamiento y dar salida a rampa de freno:** Estos botones nos sirven, el primero para que se active la conexión del control del motor en el modo ordenador ( En caso de fallos de conexión o de configuración nos indicará el problema ActiveServo). El segundo pondrá en marcha los valores definidos en “Rampa” o el modo de operación seleccionado. Este último solo funcionará cuando este en curva característica de la máquina. En los demás casos aparecerá un botón en el menú de inicio de grabación por ejemplo. O bien utilizando los botones de acceso directo (Dependiendo del caso saldrá uno u otro):

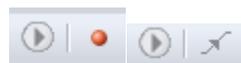


Figura 30: Botones de accionamiento en ActiveServo

- **Modo de operación/Tipo de máquina:** Dependiendo del tipo de gráfico que estemos viendo nos permitirá tener unos u otros modelos de operación.
- Ver:

- **Curva característica de máquina:** En este caso nos permitirá realizar un control de la máquina en dos modos de operación, regulador de par o bien de velocidad. Las características del estudio deberán cambiarse en preajustes>Rampa.
- **Simulación de carga:** Este apartado nos permite realizar simulaciones de diferentes cargas. El programa contiene una serie de ejemplos para hacer funcionar la máquina como bomba o compresor por ejemplo. Principalmente se basa en poner una serie de pares cada cierto tiempo a la máquina. Uno de los modos en los que puede funcionar es curva de carga en función del tiempo. El cual nos permitirá variar el par en cada momento de tiempo, lo que nos será útil para algunos ensayos.
- **Diagrama temporal:** Este modo de operación es idéntico al anterior, sin embargo la gráfica estará en función del tiempo. Una medición que en simulación de carga no se puede elegir.
  - Experimentos: En este apartado podríamos automatizar nuestros ensayos por ejemplo. Poniendo como base uno ya realizado para así no tener que repetir la configuración en caso de hacer varias pruebas.
  - Los demás elementos de esta barra son elementos típicos de un programa de Windows, o para cambiar el tipo de gráfica. Sin embargo es mucho más cómodo usar archivo>exportar>Valores de medida como texto y pegar los resultados en una hoja de cálculo.
- En segundo lugar tenemos la zona que nos indica el funcionamiento actual del motor, en caso de estar activada la conexión con el servofreno los valores de la imagen se irían refrescando y dando el valor actual del motor.



Figura 31: Parte lateral de la pantalla principal de ActiveServo

Además para cuando funcionamos en simulación de carga y diagrama temporal nos dará también acceso a cierto control en esta parte del menú. Sobre todo a la hora de realizar ensayos como el de este proyecto el botón marcado en la siguiente imagen, que nos permitirá editar la carga en función del tiempo.

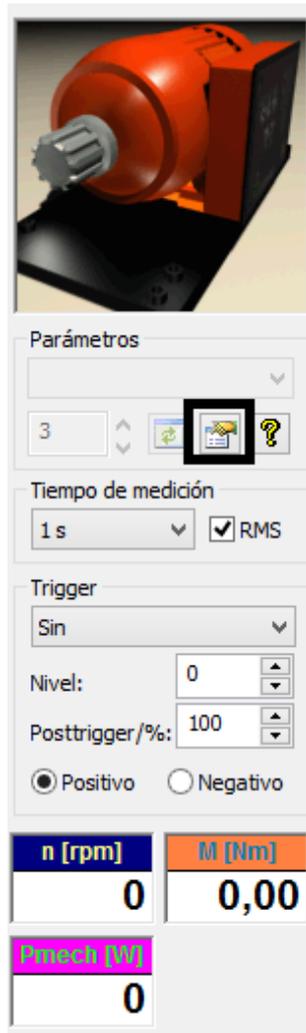


Figura 32: Parte de lateral de la pantalla principal de ActiveServo

La gráfica que nos permitiría editar sería la de la imagen siguiente, teniendo la posibilidad de poner respuestas lineales o de salto:

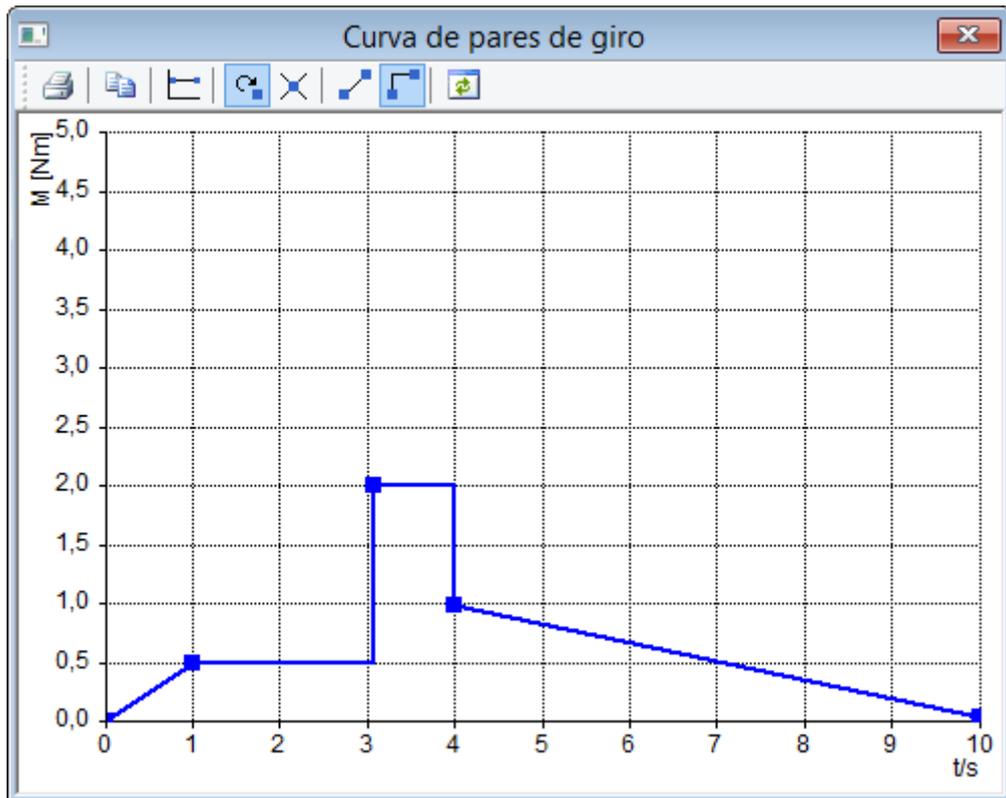


Figura 33: Curva de pares de giro que se puede modificar en ActiveServo

- Por último tenemos la sección donde nos aparecerá la gráfica, en ella podemos configurar un valor en el eje X, y después todos los valores que queramos en Y. Además a la hora de realizar medidas y ensayos va mostrando los valores reales del motor hasta que para los valores de estudio. Aunque es útil para comprobar que el ensayo se está realizando correctamente, no será muy utilizado para las gráficas finales. Para ello, como ya hemos comentado exportaremos los datos a Excel y los trataremos allí.

## 7. Obtención del modelo matemático del motor

### 7.1. Introducción

Las máquinas de inducción, como nuestro caso, solían tener aplicación únicamente para velocidades constantes. Esto se debía a sus dificultades en el control y por lo tanto se limitaba mucho su uso.

Este problema actualmente está solucionado. El avance de la electrónica y los microcontroladores hace que su uso se haya expandido a todo tipo de aplicaciones de cualquier tipo. Para ello, se necesitan diferentes modelos matemáticos que nos indiquen como debemos programar nuestra máquina para realizar las acciones que requerimos.

Es por tanto ahora el objeto de nuestro estudio la explicación de diferentes modelos matemáticos y adaptarlos a nuestro motor. Además de esta manera podremos simularlo fácilmente con las herramientas informáticas como Matlab.

### 7.2. Modelo matemático físico de un motor de inducción

Los modelos clásicos de las máquinas de inducción régimen permanente, equilibrado o no, y los modelos transitorios o dinámicos necesitan ser simplificados. Esto se realiza mediante una serie de hipótesis que nos permitan mantener una exactitud suficiente pero a la vez nos facilite la realización del modelo. Estas hipótesis son:

- La configuración geométrica y eléctrica de la máquina es simétrica.
- Los armónicos tanto del rotor y el estator del flujo magnético son despreciables
- La permeabilidad del hierro es infinita.
- Los devanados del estator y rotor están sinusoidalmente distribuidos en el espacio y se puede reemplazar por un devanado equivalente concentrado.
- No se tiene en cuenta la saturación magnética, el efecto anisótropo, las pérdidas del entrehierro ni el efecto skin.
- En los devanados, la resistencia y reactancia no varía con la temperatura.
- Tanto la tensión como la corriente son sinusoidales

Estas deducciones que hemos realizado no producen variaciones importantes en la mayor parte de máquinas de inducción, es por ello que las realizamos.

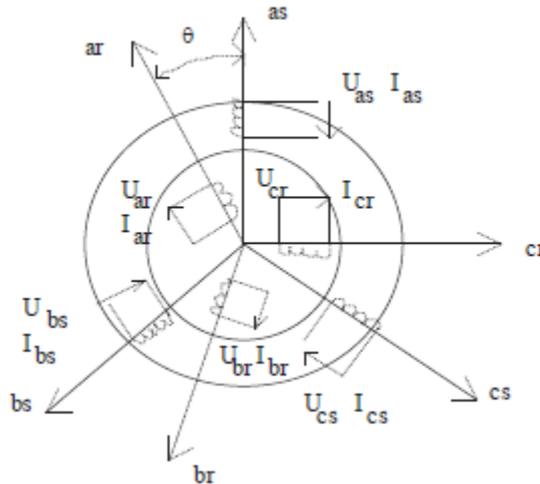


Figura 34: Modelo real de una máquina trifásica de inducción con tres devanados estatóricos y tres rotóricos. Imagen obtenida de los apuntes "Induction motor modelling for vector control purposes" de Helsinki University.

En la imagen anterior podemos observar un esquema de una máquina de inducción trifásica. Las ecuaciones que corresponderían a este esquema serían las siguientes:

$$[u] = [R] * [i] + \frac{d[\psi]}{dt}$$

Ecuación 48: Tensión del motor

Las ecuaciones de malla serían las siguientes:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

Ecuación 49: tensión del motor con matriz desarrollada

En esta ecuación tenemos dos partes diferenciadas, una primera que se ve claramente que se refiere a la caída de tensión en la resistencia propia de la bobina. Y la segunda parte que se refiere a la fuerza electromotriz que ha sido inducida en el circuito magnético de esa bobina con los enlaces de flujo que tienen entre ellas. Por ejemplo, en el caso de una tensión del estator:

$$u_A = R_s * I_A + \frac{d(\psi_A)}{dt}$$

Ecuación 50: Tensión de la fase a del estator

El término  $\psi_A$  realmente se refiere a:

$$\psi_A = \psi_A \psi_A + \psi_B \psi_A + \psi_C \psi_A + \psi_a \psi_A + \psi_b \psi_A + \psi_c \psi_A$$

Ecuación 51: Flujo de la fase A del estator

Cada término se refiere al flujo magnético producido por la corriente que pasa por el estator en A en el devanado del estator A, y así sucesivamente viendo las corrientes que pasan

por el devanado A desde B y C del estator y a,b,c del rotor. Teniendo en cuenta la suposición de que el núcleo ferromagnético es isotrópico y no satura, podemos definir:

$$[\psi] = [L] * [i]$$

*Ecuación 52: Cálculo del flujo*

La matriz de inductancias estará comprendida de 4 partes diferenciadas:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix}$$

*Ecuación 53: Matriz de las inductancias del motor resumida*

Por lo tanto por un lado tenemos las inductancias que se producen en el estator con respecto al estator, las del rotor con respecto al rotor, y también las que se producen estator-rotor y rotor-estator. En las matrices, cuando el subíndice sea en mayúsculas se referirá al estator, y en minúscula al rotor.

$$L_{SS} = \begin{bmatrix} L_{\sigma s} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{\sigma s} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{\sigma s} + L_m \end{bmatrix}$$

*Ecuación 54: Matriz de reactancias producidas del estator con respecto al estator, referidas al estator*

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{\sigma r} + L_{mm} & -\frac{1}{2}L_{mm} & -\frac{1}{2}L_{mm} \\ -\frac{1}{2}L_{mm} & L_{\sigma r} + L_{mm} & -\frac{1}{2}L_{mm} \\ -\frac{1}{2}L_{mm} & -\frac{1}{2}L_{mm} & L_{\sigma r} + L_{mm} \end{bmatrix}$$

*Ecuación 55: Matriz de reactancias producidas del rotor respecto al rotor, referidas al rotor.*

$$L_{SR} = ki^2 [L_{RS}]_T = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + u) & \cos(\theta + 2u) \\ \cos(\theta + 2u) & \cos(\theta) & \cos(\theta + u) \\ \cos(\theta + u) & \cos(\theta + 2u) & \cos(\theta) \end{bmatrix}; u = \frac{2\pi}{3}$$

*Ecuación 56: Matriz de reactancia mutua entre estator y rotor*

Ahora se nos quedarán las ecuaciones de tensión de la siguiente manera:

$$[u_s] = [R_s] * [i_s] + [L_{SS}] \frac{d[i_s]}{dt} + \frac{d\{[L_{SR}][i_r]\}}{dt}$$

*Ecuación 57: Tensión del estator*

$$[u_r] = [R_r] * [i_r] + [L_{RR}] \frac{d[i_r]}{dt} + \frac{d\{[L_{SR}][i_s]\}}{dt}$$

*Ecuación 58: Tensión del rotor*

Las intensidades serán sinusoidales:

$$i_A = I_S * \cos(\omega t); i_B = I_S * \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); i_C = I_S * \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

*Ecuación 59: Intensidades del estator*

$$i_a = I_R * \cos(\omega_r t + \alpha_r); i_b = I_R * \cos\left(\omega_r t + \alpha_r + \frac{2\pi}{3}\right); i_c = I_R * \cos\left(\omega_r t + \alpha_r - \frac{2\pi}{3}\right)$$

*Ecuación 60: Intensidades del rotor*

Para reducir un poco las ecuaciones haremos lo siguiente:

$$L_s = L_{\sigma s} + L_m; L_r = L_{\sigma r} + L_m; M_s = -\frac{1}{2}L_{\sigma s}; M_r = -\frac{1}{2}L_{\sigma r}$$

*Ecuación 61: Simplificación de nomenclatura*

Se sabe además:

$$\theta = \Omega * t + \theta_0$$

*Ecuación 62: Posición del rotor*

$$\omega_r = \omega - p\Omega$$

*Ecuación 63: Velocidad del rotor*

Donde  $\Omega$  es la velocidad del rotor en rad/s.

Si resolvemos el valor del flujo se nos queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \psi_A &= (L_s - M_s) * I_s * \cos(\omega t) + L_m * I_r * [\cos(\omega_r t + \alpha_r) * \cos(p\theta) + \cos\left(\omega_r t + \alpha_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ &\quad * \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_r t + \alpha_r - \frac{2\pi}{3}\right) * \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right)] = \\ &= (L_s - M_s) * I_s * \cos(\omega t) + \frac{3}{2} * L_m * I_r * \cos(\omega_r t + \alpha_r + p\theta) = \\ &= (L_s - M_s) * I_s * \cos(\omega t) + \frac{3}{2} * L_m * I_r * \cos((\omega_r + p\Omega) * t + \alpha_r + p\theta_0) = \\ &= (L_s - M_s) * I_s * \cos(\omega t) + \frac{3}{2} * L_m * I_r * \cos(\omega t + \alpha_r + p\theta_0) \end{aligned}$$

*Ecuación 64: Flujo para la fase a del estator*

De igual manera procedemos para obtener las fases del rotor:

$$\begin{aligned} \psi_a &= (L_r - M_r) * I_r * \cos(\omega_r t + \alpha_r) + L_m * I_s * [\cos(\omega t) * \cos(p\theta) + \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ &\quad * \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) * \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right)] = \\ &= (L_r - M_r) * I_r * \cos(\omega_r t + \alpha_r) + \frac{3}{2} * L_m * I_s * \cos(\omega_r t - p\theta_0) \end{aligned}$$

*Ecuación 65: Flujo para la fase a del rotor*

Ahora se van a realizar las operaciones con forma fasorial para trabajar de manera más sencilla.

$$\overline{\psi}_A = (L_s - M_s) * \overline{I}_A + \frac{3}{2} * L_m * \overline{I}_a * e^{j(\alpha_r + p\theta_0)}$$

*Ecuación 66: Flujo de la fase a del estator en fasores*

$$\overline{\psi}_a = (L_r - M_r) * \overline{I}_a * e^{j(\alpha_r)} + \frac{3}{2} L_m * \overline{I}_A * e^{j(-p\theta_0)}$$

*Ecuación 67: Flujo de la fase a del rotor en fasores*

Operando podemos simplificar algunos de los valores de los angulos:

$$\overline{\psi}_{a'} = \overline{\psi}_a * e^{j(p\theta_0)}$$

*Ecuación 68: Flujo del rotor referido a la posición del estator*

$$\overline{I}_{a'} = \overline{I}_a * e^{j(\alpha_r + p\theta_0)}$$

*Ecuación 69: Intensidad referido a la posición del estator*

Se nos quedan entonces los flujos como:

$$\overline{\psi}_A = (L_s - M_s) * \overline{I}_A + \frac{3}{2} * L_m * \overline{I}_{a'}$$

*Ecuación 70: Flujo en fasores de manera simplificada del estator*

$$\overline{\psi}_{a'} = (L_r - M_r) * \overline{I}_{a'} + \frac{3}{2} L_m * \overline{I}_A$$

*Ecuación 71: Flujo en fasores de manera simplificada del rotor*

Si ahora incluimos estos flujos en las ecuaciones principales de tensión:

$$\overline{U}_A = R_s * \overline{I}_A + j\omega\overline{\psi}_A = R_s * \overline{I}_A + (L_s - M_s)j\omega * \overline{I}_A + \frac{3}{2} * L_m * \overline{I}_{a'} * j\omega$$

$$\overline{U}_A = \left( R_s + \frac{3}{2} L_s * j\omega \right) * \overline{I}_A + \frac{3}{2} * j\omega * L_m * \overline{I}_{a'}$$

*Ecuación 72: Tensión de la fase a del estator en forma fasorial*

$$\begin{aligned} \overline{U}_a = 0 &= R_r * \overline{I}_{a'} + js\omega\overline{\psi}_{a'} = R_r * \overline{I}_{a'} + js\omega(L_r - M_r) * \overline{I}_{a'} + \frac{3}{2} * js\omega L_m * \overline{I}_A \\ 0 &= (R_r + \frac{3}{2} js\omega L_r) * \overline{I}_{a'} + \frac{3}{2} * js\omega L_m * \overline{I}_A = \left( \frac{R_r}{s} + \frac{3}{2} j\omega L_r \right) * \overline{I}_{a'} + \frac{3}{2} * j\omega L_m * \overline{I}_A \end{aligned}$$

*Ecuación 73: Tensión del rotor en forma fasorial*

Con estas dos ecuaciones podemos resolver el sistema de ecuaciones sabiendo las resistencias e inductancias internas y la tensión a la que se alimenta y el deslizamiento que tenemos.

Ahora vamos a ver como se calcula el par electromecánico, que procederá del último término de la coenergía. La fórmula para calcularlo será:

$$T_e = \frac{1}{2} * p * [i_s]_T * \frac{d[L_{sr}(\theta)]}{d\theta} * [i_R]$$

*Ecuación 74: Par electromecánico*

Otra forma de ver la fórmula es la siguiente:

$$T_e - T_r = J * \frac{d^2\theta}{dt^2} + \alpha * \frac{d\theta}{dt} + \beta * \theta$$

*Ecuación 75: Par electromecánico y par resistente*

Donde  $T_r$  es el par resistente y  $J$  es el momento de inercia de la máquina,  $\omega$  es su velocidad angular y  $\alpha$  es el coeficiente de fricción.

### 7.3. Modelo dinámico del motor de inducción en dq

Hasta ahora hemos estudiado el motor de inducción teniendo en cuenta que tanto estator como rotor son sistemas trifásicos. Pero realmente podemos poner que la máquina eléctrica generalizada es un convertidor electromecánico bipolar. Teniendo forma cilíndrica y dos devanados uniformemente distribuidos en el estator y un devanado uniformemente distribuido donde sus uniones de bobina se conectan al colector de delgas en el rotor. Teniendo sobre dos ejes perpendiculares, dos pares de escobillas que permiten acceder al devanado móvil. Para simplificar este modelo se toman las siguientes deducciones:

- Aunque las máquinas reales vienen dispuestos en ranuras en este caso usaremos una capa de corriente de dimensión radial infinitesimal con una densidad de corriente por unidad de desarrollo lineal. Para que las amperivoltas sean igual en cada paso por ranura.
- Se supone permeabilidad magnética infinita y la dirección de la corriente tiene dirección axial.

Por tanto el circuito eléctrico que estudiaremos ahora consta de cuatro bobinados, dos de ellos serán del estator y los otros del rotor. Cada bobinado tendrá su resistencia, autoinducción y estarán acopladas magnéticamente entre sí. Gracias a las suposiciones realizadas podemos considerar que el campo magnético puede descomponerse en dos campos ortogonales. Sus ejes coincidirán con los ejes de las bobinas del estator. Aunque el rotor cuenta con un solo devanado, como se conecta sobre el colector los dos pares de escobillas de ejes fijos ortogonales, hace que podamos considerar como estáticas las bobinas rotóricas. En cuanto a nomenclatura, denominaremos el bobinado estatórico como “D” y “Q” mientras que las rotóricas “d” y “q”. Otras suposiciones que tendremos en cuenta son:

- La máquina gira en sentido antihorario.

- Las posiciones de los juegos de escobillas se han elegido coincidentes con los bobinas fijas del estator.

Una representación de los circuitos eléctricos que componen la máquina eléctrica de esta manera sería:

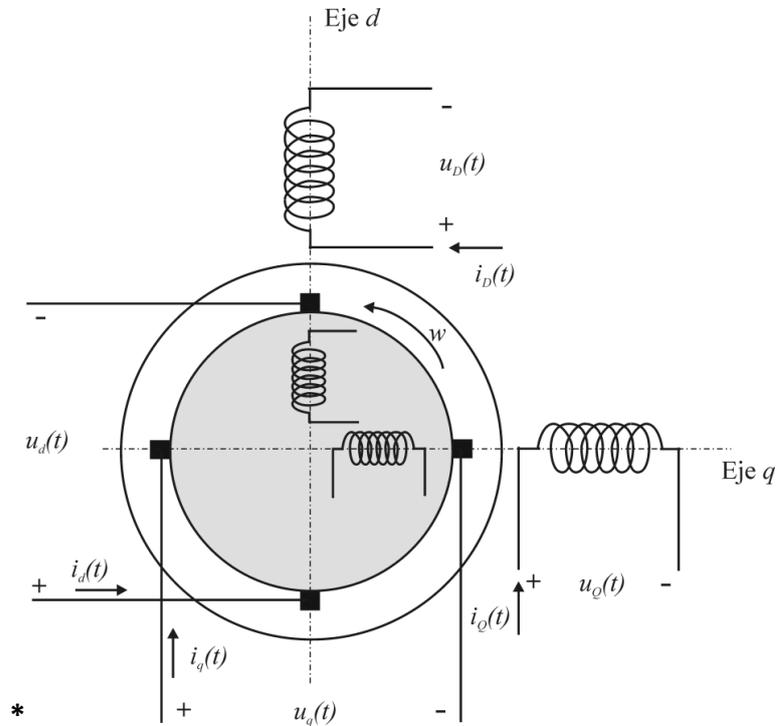


Figura 35: Circuito eléctrico de la máquina eléctrica generalizada con ejes dq. De los apuntes de "Máquinas eléctricas" de la Universidad Politécnica de Cartagena.

### 7.3.1. Ecuaciones eléctricas y de par en la máquina generalizada

Una vez realizadas las suposiciones y teniendo la idea de su funcionamiento podemos pasar a realizar las ecuaciones de la máquina en el modelo dq:

$$v_Q = R_s * i_Q + \omega_{cn} * \psi_D - \frac{d\psi_Q}{dt}$$

Ecuación 76: Ecuación de flujo q del estator

$$v_D = R_s * i_D - \omega_{cn} * \psi_Q - \frac{d\psi_D}{dt}$$

Ecuación 77: Ecuación de flujo d del estator

$$v_q = R_r * i_q + (\omega_{cn} - \omega_{rn}) * \psi_d - \frac{d\psi_q}{dt}$$

Ecuación 78: Ecuación de flujo q del rotor

$$v_d = -R_r * i_d + (\omega_{cn} - \omega_{rn}) * \psi_q - \frac{d\psi_d}{dt}$$

Ecuación 79: Ecuación de flujo d del rotor

Despejando las variaciones del flujo magnético:

$$\frac{d\psi_Q}{dt} = v_Q - R_s * i_Q - \omega_{cn} * \psi_D$$

*Ecuación 80: Ecuación de flujo q del estator*

$$\frac{d\psi_D}{dt} = v_D - R_s * i_D + \omega_{cn} * \psi_Q$$

*Ecuación 81: Ecuación de flujo d del estator*

$$\frac{d\psi_q}{dt} = v_q - R_r * i_q - (\omega_{cn} - \omega_{rn}) * \psi_d$$

*Ecuación 82: Ecuación de flujo q del rotor*

$$\frac{d\psi_d}{dt} = v_d - R_r * i_d + (\omega_{cn} - \omega_{rn}) * \psi_q$$

*Ecuación 83: Ecuación de flujo d del rotor*

Ahora expresando de nuevo los flujos de las bobinas d y q:

$$\psi_Q = L_s * i_Q + L_m * i_q$$

*Ecuación 84: Ecuación de flujo q del estator*

$$\psi_D = L_s * i_D + L_m * i_d$$

*Ecuación 85: Ecuación de flujo d del estator*

$$\psi_q = L_r * i_q + L_m * i_Q$$

*Ecuación 86: Ecuación de flujo q del rotor*

$$\psi_d = L_r * i_d + L_m * i_D$$

*Ecuación 87: Ecuación de flujo d del rotor*

La ecuación del par:

$$T_{en} = \frac{3P}{4} (i_Q * \psi_D + i_D * \psi_Q)$$

*Ecuación 88: Par motor*

## 7.4. Aplicación en motores de inducción

La aplicación de esta teoría no se puede aplicar directamente sobre el motor. Y requiere de una serie de transformaciones matemáticas. Para así poder transformar las componentes trifásicas conocidas a un equivalente bifásico de ejes magnéticos fijos tanto en estator como en rotor.

### 7.4.1. Transformada de Clark

Esta transformación tiene como finalidad la de sustituir un devanado trifásico, con ejes magnéticos desfasados  $120^\circ$  eléctricos y que circulan un sistema de corrientes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ , en un devanado bifásico cuyos ejes magnéticos sean ortogonales y por los que circula un sistema de corrientes bifásico  $i_\alpha$  e  $i_\beta$ , con un devanado independiente  $i_0$  con valor nulo si las corrientes trifásicas originales son equilibradas.

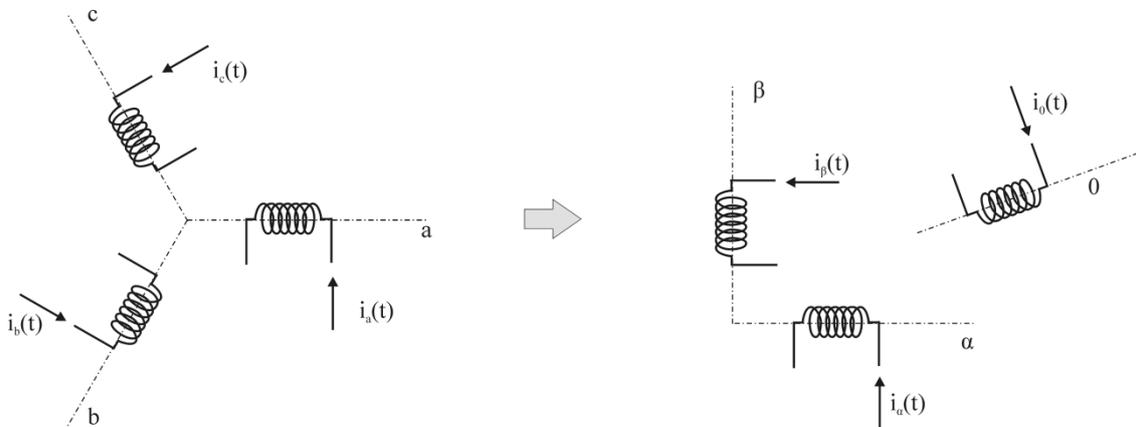


Figura 36: Transformación de Clark. Imagen de los apuntes de Máquinas eléctricas de la UPCT.

Tenemos que tener en cuenta que la velocidad angular relativa entre ambos ejes respecto del mismo sistema de referencia es nulo.

Para poder producir cualquier transformación de las variables eléctricas de tensión y corriente debemos aplicar lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Ecuación 89: Transformada de Clarke

### 7.4.2. Transformada de Park

En este caso la transformada de Park resuelve el problema que provocan las magnitudes eléctricas del rotor de una máquina eléctrica de inducción cuando quiere ser analizada mientras las ecuaciones de la máquina generalizada. Donde se supone que aunque las bobinas rotóricas

aunque giran se podrían considerar estacionarias ya que se alimentan de dos pares de escobillas fijas.

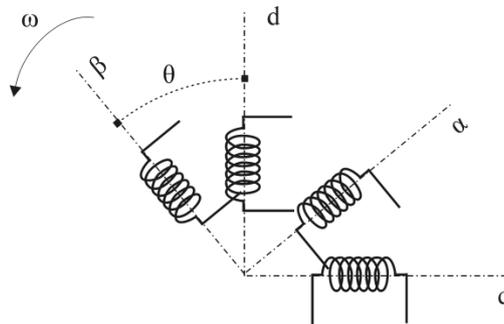


Figura 37: Transformada de Park. Imagen obtenida de los apuntes de máquinas eléctricas de la UPCT

Por tanto cambiamos los ejes desde la posición  $\alpha\beta 0$  al eje  $dq0$ . Por lo tanto el cambio de ejes se producirá mediante la siguiente transformación:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 90: Transformada de Park

#### 7.4.3. Transformada de Blondel

Si unimos las transformadas anteriores podemos llegar a la que denominamos transformada de Blondel. De esta manera podremos pasar directamente de un sistema trifásico de ejes móviles a uno bifásico de ejes fijos con una bobina independiente que es nula. La transformada se queda de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Ecuación 91: Transformada de Blondel

## 8. Modelo matemático en Matlab/Simulink

Una vez concluido el estudio de algunos de los modelos matemáticos de los motores de inducción vamos a proceder al estudio de la validez de los mismos. Como sabemos para simplificar los cálculos se realizan diferentes suposiciones que van provocando desviaciones en el resultado final. Por lo que vamos a proceder a crear un modelo matemático de la máquina generalizada en el sistema dq con los valores de nuestro motor y estudiarlo. Esto lo realizaremos mediante el programa “Matlab” en su herramienta simulink que nos permite realizar simulaciones de sistemas. Gracias al mismo podremos comprobar si el modelo matemático se desvía de la realidad de manera considerable o es despreciable. Simulink ya cuenta con un modelo matemático para máquinas de inducción creado en un bloque. Por lo que también lo estudiaremos con el mismo.

Una vez tengamos nuestro modelo la idea es repetir las pruebas realizadas en el laboratorio para ver si salen resultados similares en los ensayos. De esta manera podremos comprobar el correcto funcionamiento o no del modelo elegido.

### 8.1. Simulación del motor mediante el modelo matemático de Matlab

El programa Matlab y en su aplicación Simulink incluye diferentes modelos de máquinas. Entre ellos existe el motor eléctrico y en concreto el de inducción de rotor bobinado. Sin embargo nuestro motor presenta una estructura interna y poco común, es por ello que la relación de bobinado entre rotor y estator no podemos modificarla. Igualmente crearemos el sistema que habría que utilizar en caso de que este modelo fuera normal.

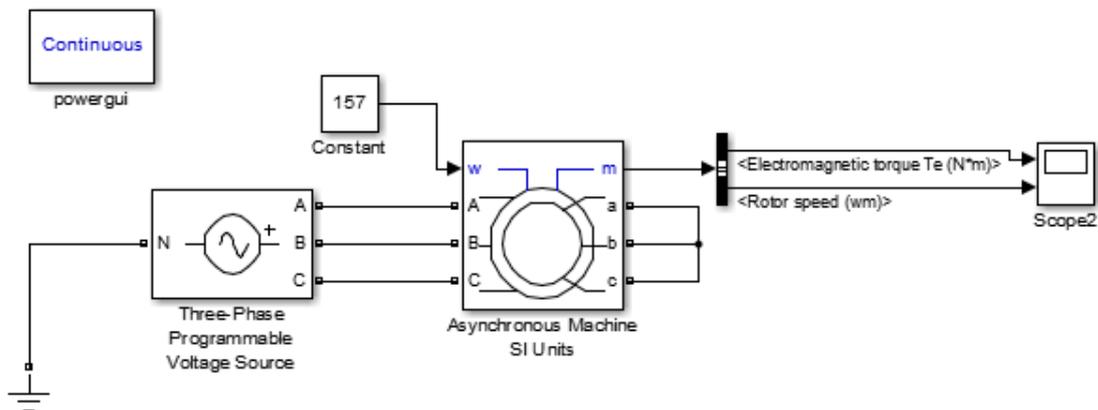


Figura 38: Simulando el motor con el modelo matemático de Simulink

El sistema se basa en tener una fuente de corriente trifásica, el motor asíncrono el cual tendrá más o menos bornes según configuremos y una salida “m” que es el bus que lleva la información. En nuestro caso lo hemos adaptado para nuestro tipo de motor. Además como ventaja tiene la posibilidad de dar diferentes entradas del motor para controlar. También hemos añadido el módulo “PowerGui” para configurar la simulación a realizar.

Vamos a ver el funcionamiento principal de los módulos que requieren más análisis debido a su mayor complejidad:

- **Fuente de trifásica:** Estamos trabajando sobre una máquina eléctrica por lo tanto no sirve una onda senoidal ya que funciona con parámetros físicos. Es por ello que hemos elegido una fuente de tensión trifásica. Y la pantalla es bastante sencilla. No hemos añadido armónicos ya que no es objeto de nuestro estudio y para el funcionamiento del motor no debe afectar aunque si lo haría para el controlador de un motor. Podríamos también elegir que generara solo potencia reactiva o activa, en la segunda pestaña.

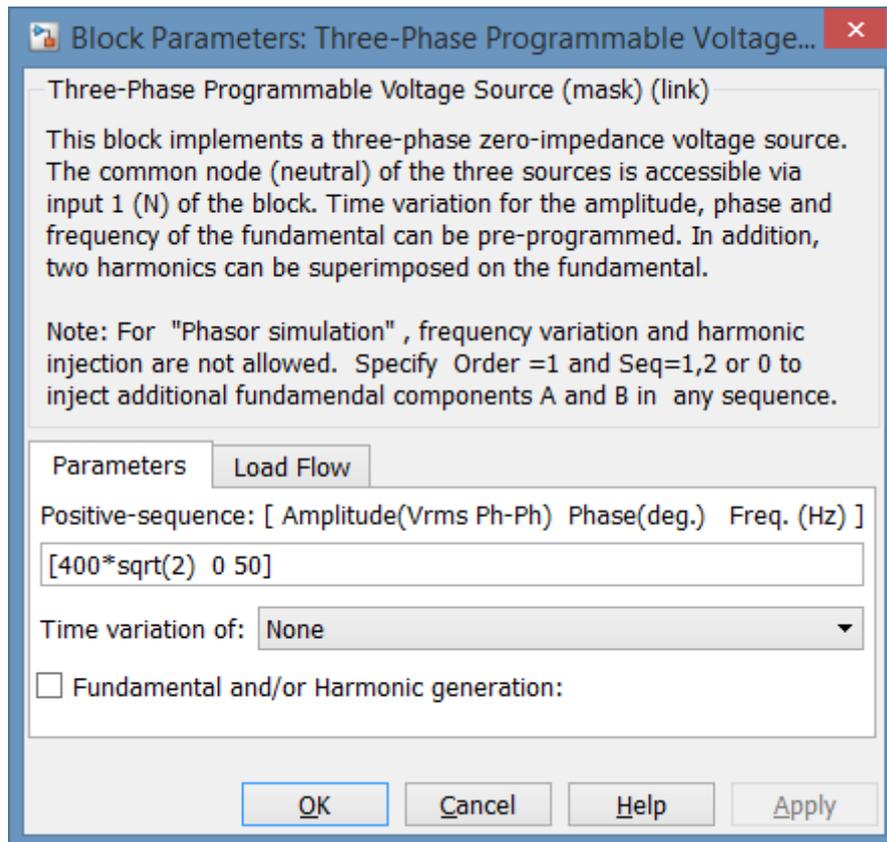


Figura 39: Características del generador de tensión trifásico

- **Motor de inducción:** Para el motor tenemos una herramienta bastante potente en Simulink. Realmente es un motor asíncrono general, el cual puedes configurar como de rotor devanado, jaula de ardilla o doble jaula de ardilla. Según el elegido se pueden configurar diferentes características. Por ejemplo en un motor de jaula de ardilla incluye motores estándares y sus potencias para no tener necesidad de meter prácticamente valores. Para el caso de motores de rotor bobinado este no es el caso

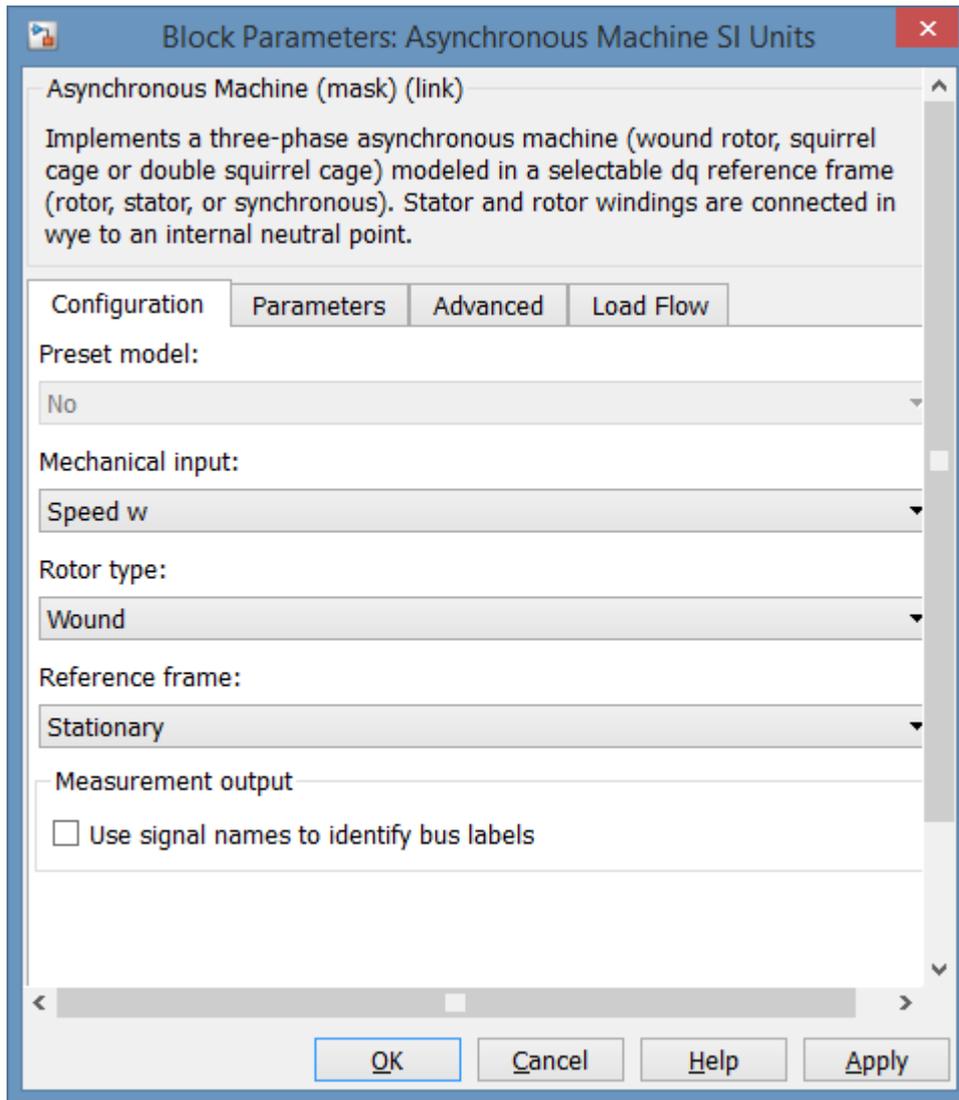


Figura 40: Características del motor asíncrono en el modelo de Matlab

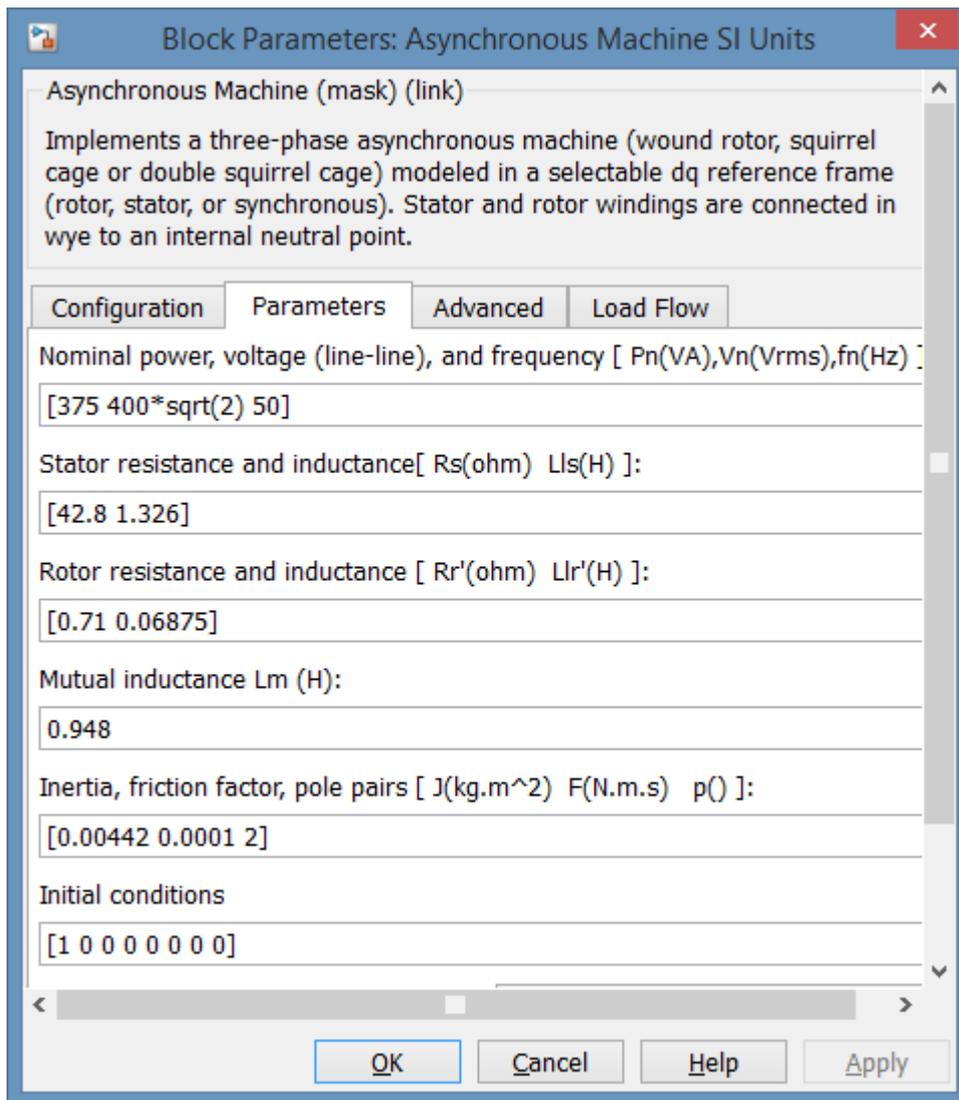


Figura 41: Características del motor asíncrono con el modelo de Matlab

Las dos pantallas anteriores son las que sirven principalmente para la configuración del motor. En la primera la elección del motor, la entrada para controlar, y que referencia se prefiere, hemos elegido estacionaria. En la segunda ya nos viene una pantalla con los parámetros típicos del motor. Que podemos ir modificando.

- La salida del motor que es “m” es un bus de información del cual podemos obtener diferentes parámetros físicos como veremos a continuación. De este bus usamos un “Bus Selector” y podremos obtener gráficas con las unidades físicas que deseemos.

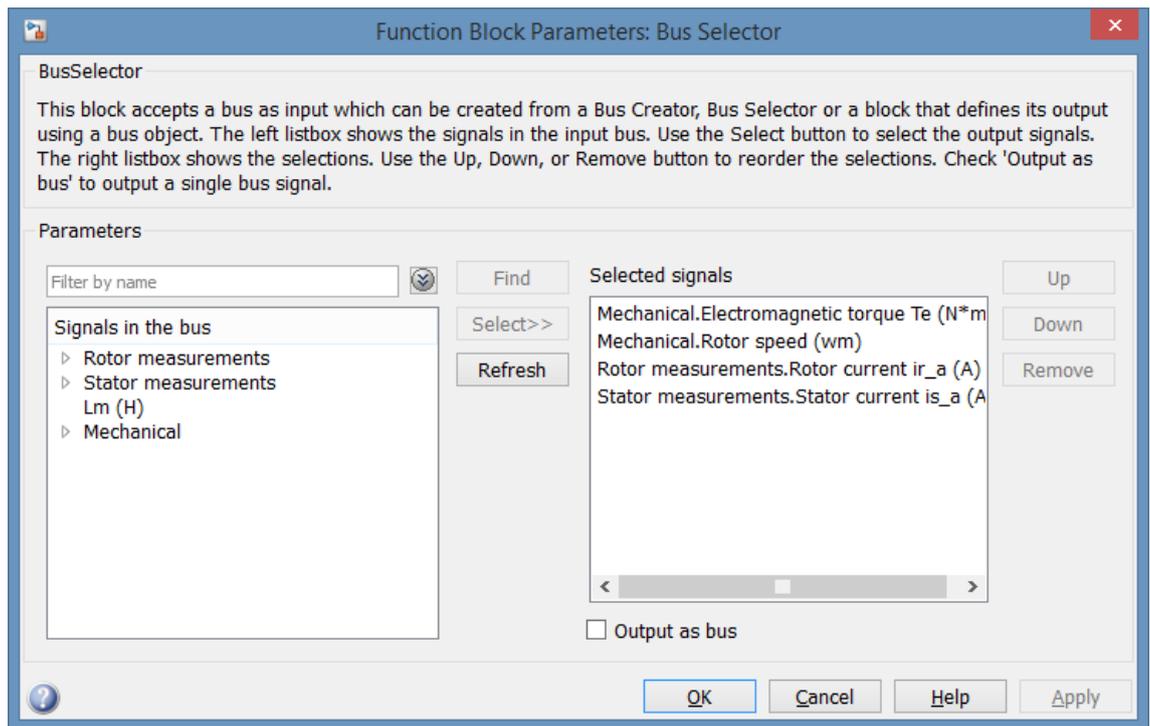


Figura 42: Bus Selector en el modelo del motor de Matlab

Por tanto podemos concluir que con SimuLink podemos hacer simulaciones del motor con el modelo matemático que incluye. Y que nos permite una amplia gama de tipos de motor y características. Sin embargo para nuestro caso no es posible ya que no incluye la posibilidad de variar la relación de bobinado entre estator y rotor.

El resultado obtenido no es el esperado, debido a que no salen valores y resultados lógicos. Los valores obtenidos son:

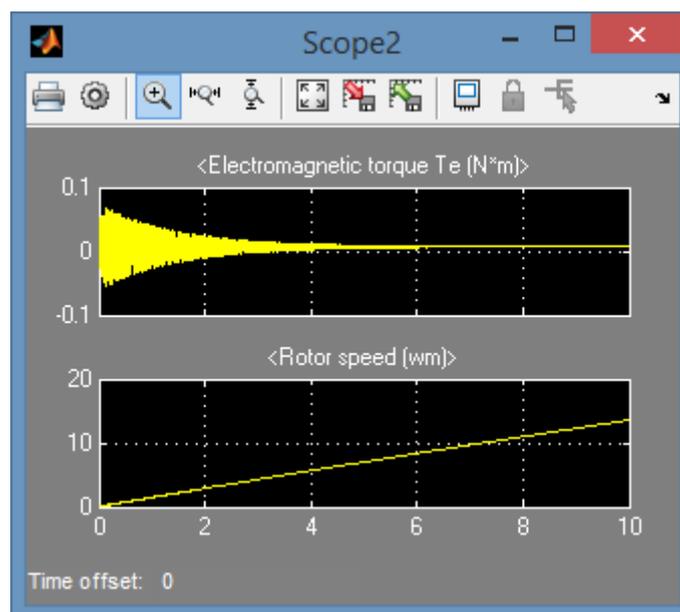


Figura 43: Resultados de par y velocidad en el ensayo con el motor de Matlab

El principal problema que podemos ver a la hora de este motor se debe a que no se puede poner la relación de estator y rotor diferente a uno. Ya que el resultado de las intensidades de estator y rotor son las siguientes:

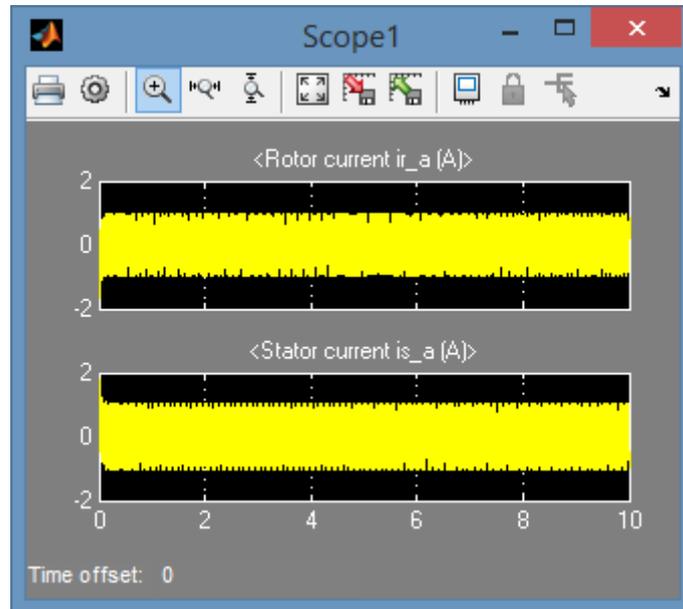


Figura 44: Intensidades de estator y rotor en el ensayo con el motor de Matlab

Como se puede observar la intensidad no varía.

## 8.2. Simulación creando un nuevo modelo matemático

En este caso no vamos a utilizar los bloques que incluye la herramienta Simulink, sino que vamos a hacer una simulación del modelo matemático del motor de inducción. Para ello nos basaremos en el modelo matemático en dq que hemos estudiado anteriormente. El estudio estaba muy simplificado y ahora vamos a realizar las diferentes simplificaciones y variaciones de ecuaciones para hacerlo práctico a nivel de Matlab. Para la creación del modelo matemático propio no vamos a realizarlo mediante unidades físicas como lo tiene el bloque ya existente, sino que solo realizaremos las operaciones matemáticas y obtendremos las diferentes variables.

La programación en Simulink se ha realizado de forma modular, para poder utilizar las funciones realizadas repetidamente y modificables rápidamente. Para comenzar el modelo tenemos que establecer unos valores de entrada y unos de salida. Para nuestro caso hemos elegido como entrada la tensión porque será la alimentación del motor y podría regularse. También será un valor de entrada la carga que tiene el motor. Como salida queremos saber las intensidades del rotor, el par del motor y la velocidad angular. El esquema en Simulink se nos queda de la siguiente manera:

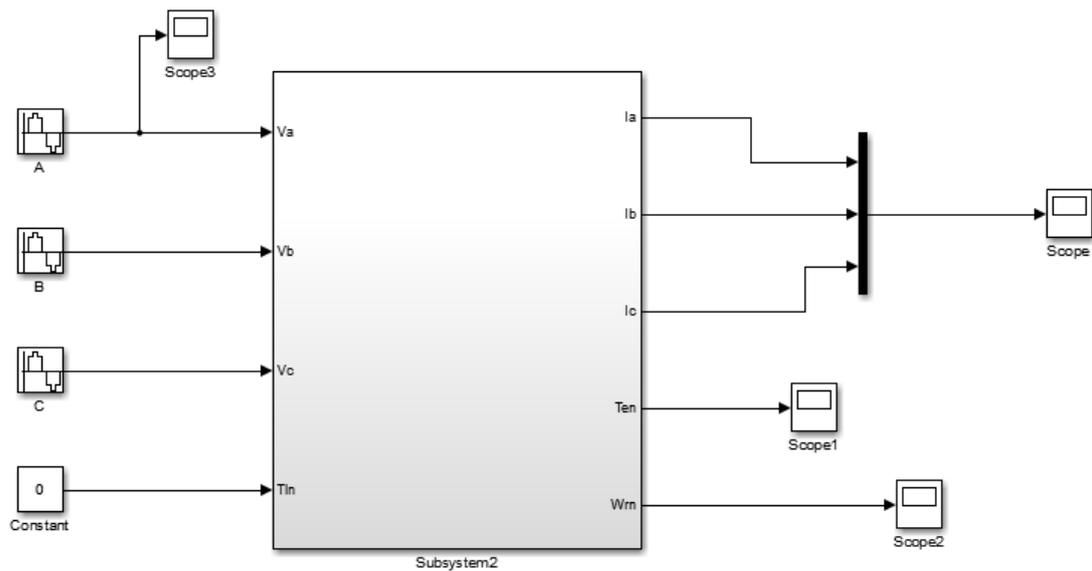


Figura 45: Bloque principal del modelo dinámico propio

Este sería el aspecto para el usuario final. Un bloque simple al que conectaría ondas senoidales de tensión, la carga del motor. Y a la salida tiene diferentes osciloscopios para ver los resultados. Ahora vamos a seguir avanzando y ver la estructura interna del modelo. En el siguiente nivel nos encontramos otro bloque casi de usuario pero con más información.

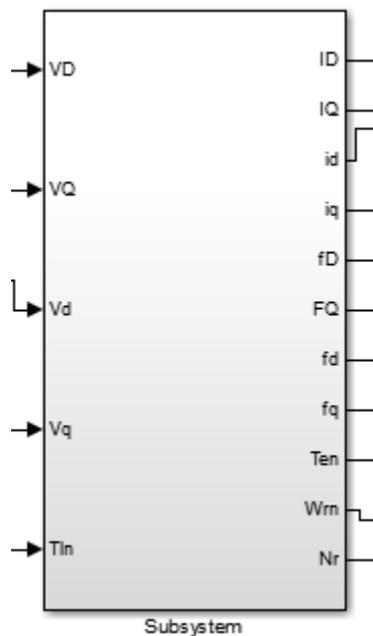


Figura 46: Bloque secundario del modelo dinámico propio

El bloque sería el anterior. Como vemos ya aparecen los valores de tensión e intensidad en dq. Es por ello que es en esta parte donde se le conectan las transformaciones necesarias

para que esto sea posible. El bloque que transforma de abc a dq y viceversa se mostrará a continuación. En el bloque de tensión las entradas procederán de los valores que pongamos en el bloque principal, y la transformación ya será VD y VQ que serán las entradas a este bloque secundario con más información. En el caso de las intensidades será al contrario, las entradas del bloque serán las salidas de este bloque secundario y la salidas serán las que aparecerán como resultado en el bloque principal. Las demás variables tendrán osciloscopios para poder ver sus salidas.

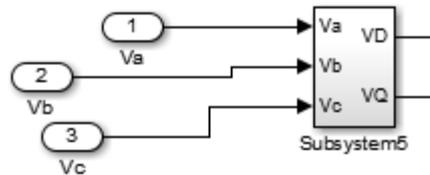


Figura 47: Bloque transformador abc-dq

Internamente este bloque tendrá una función propia de Matlab que convierte directamente de abc a dq. La estructura es la siguiente:

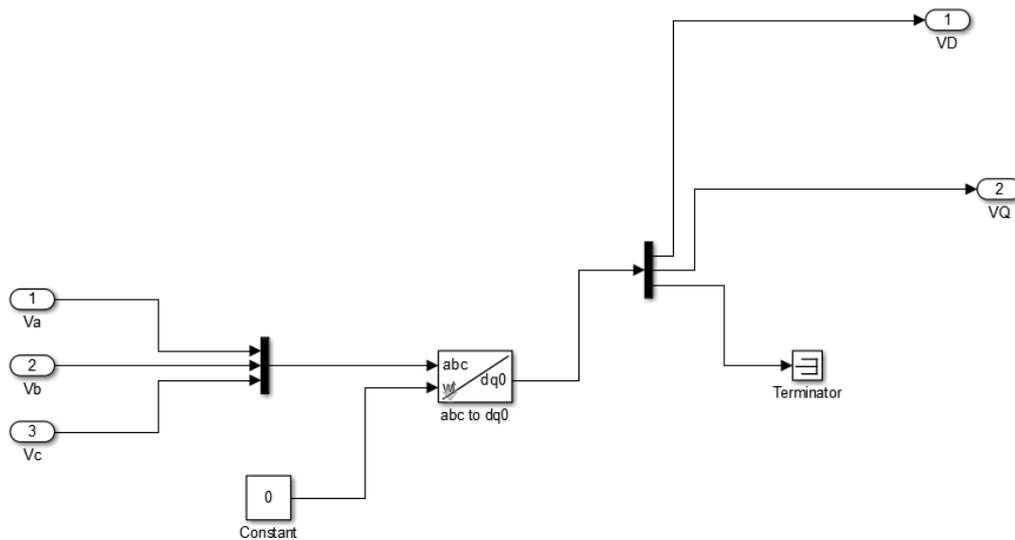


Figura 48: Estructura interna del bloque transformador abc-dq

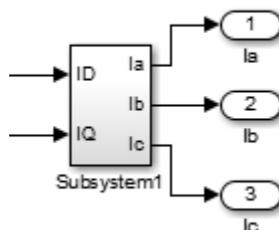


Figura 49: Bloque transformador dq-abc

Internamente el caso de la intensidad es muy similar pero el cambio es a la inversa.

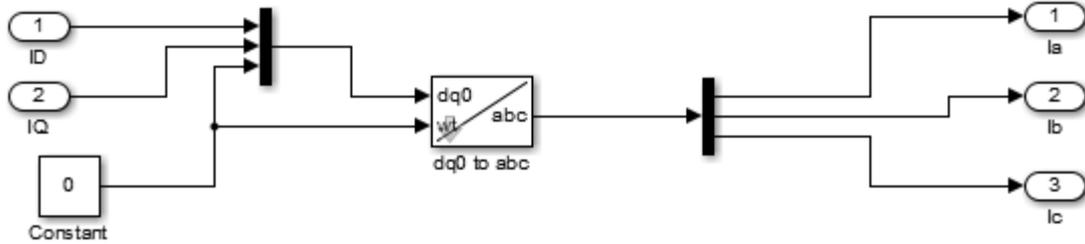


Figura 50: Estructura interna del bloque transformador dq-abc

Una vez llegados a este punto podemos comenzar a introducirnos en el verdadero modelo que esta por debajo del bloque secundario del que hablábamos.

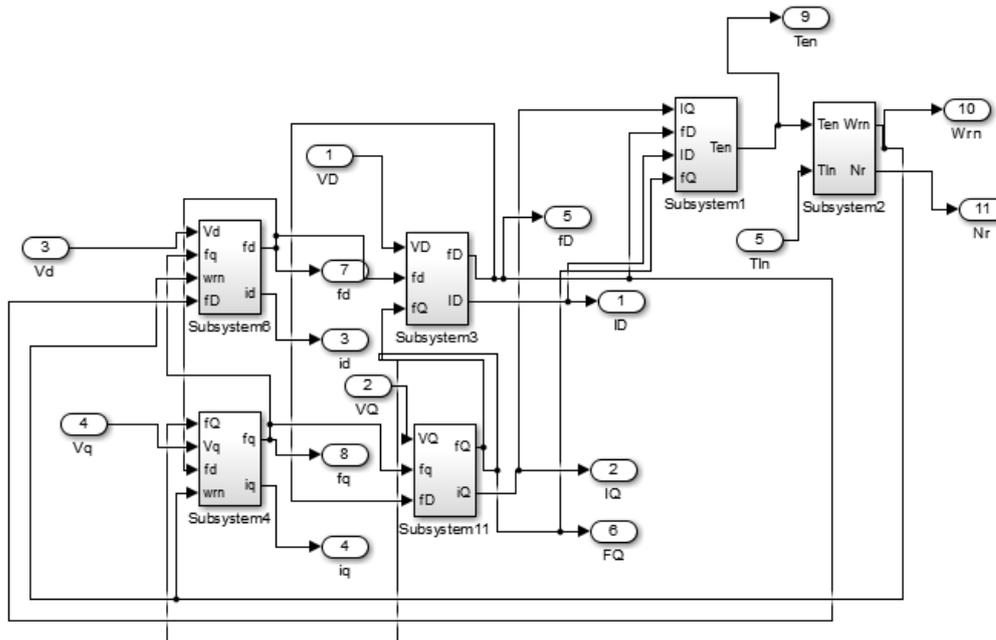


Figura 51: Conexión de los bloques de funciones dentro del modelo

En este esquema fundamentalmente se pueden ver diferentes bloques interconectados. Estos bloques son realmente ecuaciones del motor. Las salidas de los bloques son las variables obtenidas que nos servirán para resolver otras ecuaciones. Veamos internamente que es cada bloque.

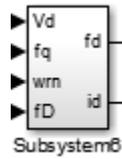


Figura 52: funciones para obtener el flujo e intensidad d del rotor



Figura 53: funciones para obtener el flujo e intensidad q del rotor

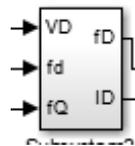


Figura 54: funciones para obtener el flujo e intensidad d del estator

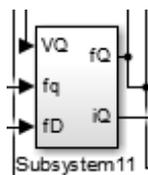


Figura 55: funciones para obtener el flujo e intensidad q del estator

Para la estructura interna de estos cuatro bloques nos encontramos internamente dos funciones que nos darán como resultado los flujos e intensidades del motor.

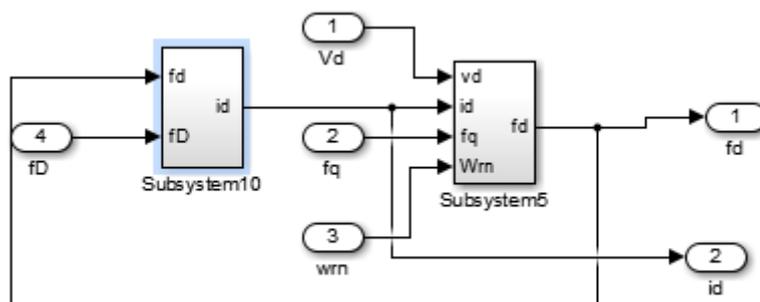


Figura 56: Estructura interna del bloque de parámetros d del rotor

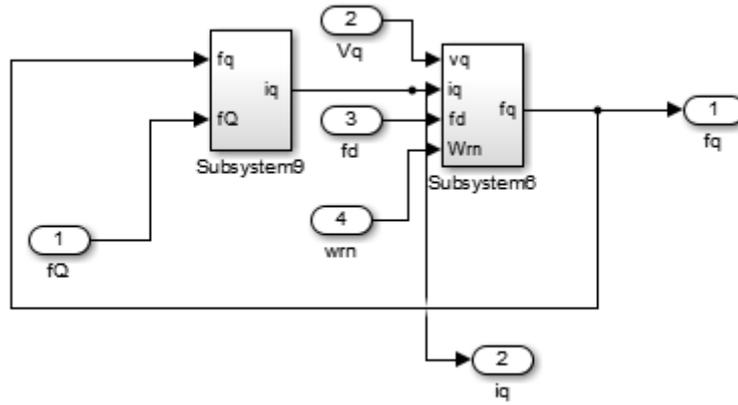


Figura 57: Estructura interna del bloque de parámetros q del rotor

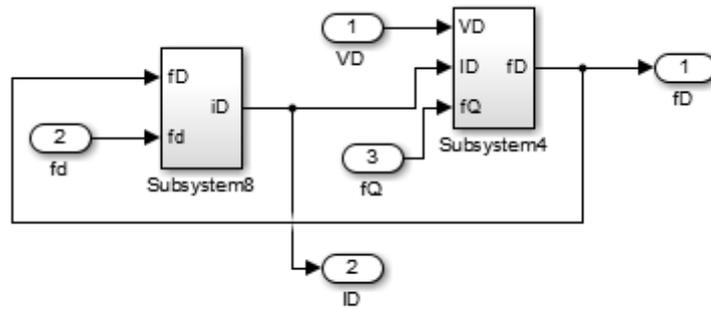


Figura 58: Estructura interna del bloque de parámetros d del estator

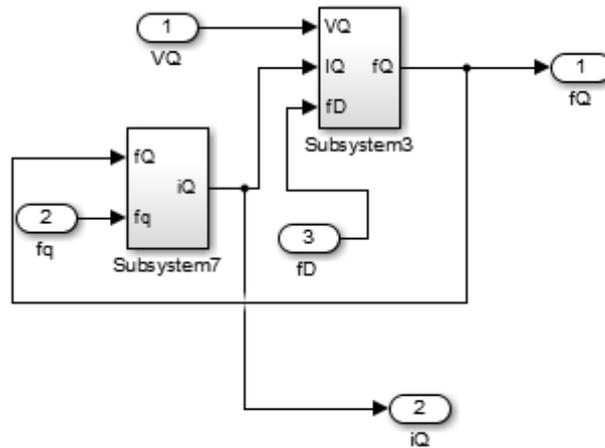


Figura 59: Estructura interna del bloque de parámetros q del estator

Las ecuaciones que se siguen son las siguientes:

$$\frac{d\psi_Q}{dt} = v_Q - R_s * i_Q - \omega_{cn} * \psi_D$$

Ecuación 92: Ecuación de flujo q del estator

$$\frac{d\psi_D}{dt} = v_D - R_s * i_D + \omega_{cn} * \psi_Q$$

Ecuación 93: Ecuación de flujo d del estator

$$\frac{d\psi_q}{dt} = v_q - R_r * i_q - (\omega_{cn} - \omega_{rn}) * \psi_d$$

Ecuación 94: Ecuación de flujo q del rotor

$$\frac{d\psi_d}{dt} = v_d - R_r * i_d + (\omega_{cn} - \omega_{rn}) * \psi_q$$

Ecuación 95: Ecuación de flujo d del rotor

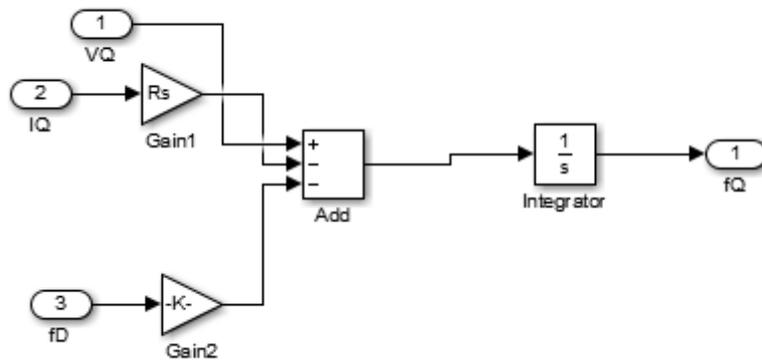


Figura 60: Estructura interna de la función de flujo q del estator

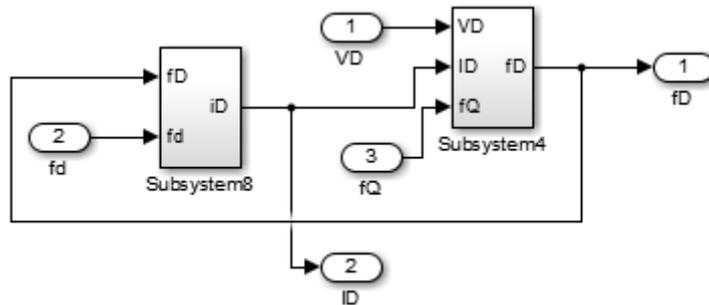


Figura 61: Estructura interna de la función de flujo d del estator

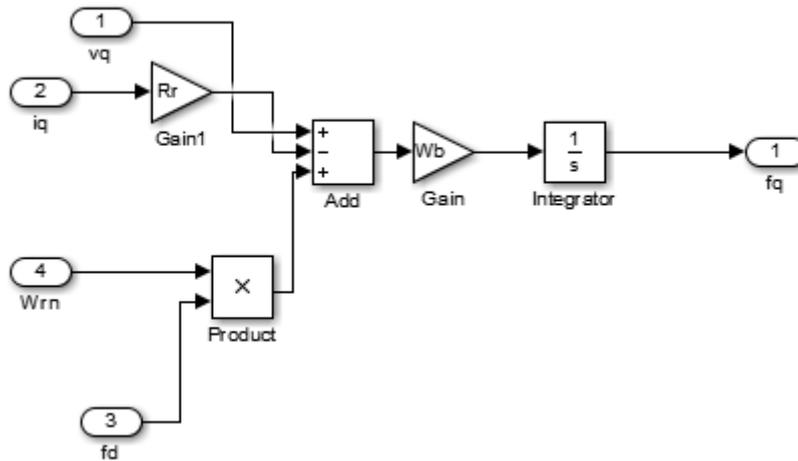


Figura 62: Estructura interna de la función de flujo q del rotor

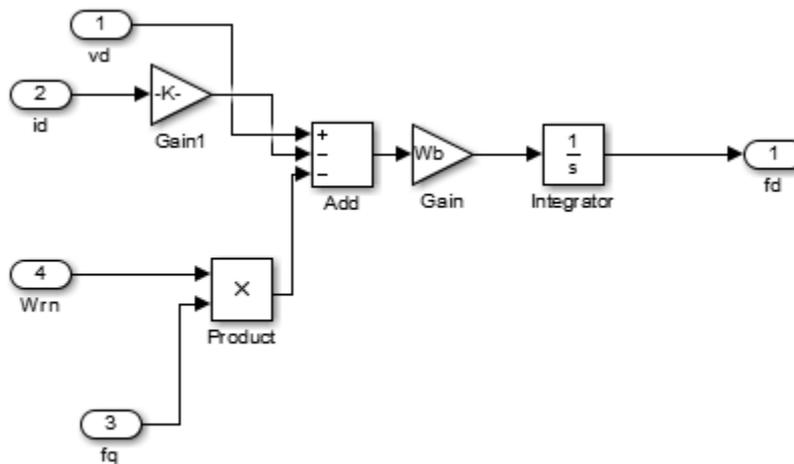


Figura 63: Estructura interna de la función de flujo d del rotor

Estas ecuaciones son fácilmente reconocibles en los bloques ya que se aplican tal cual prácticamente. Las siguientes si que se debe operar entre ellas para llegar a las soluciones del modelo propuesto:

$$\psi_Q = L_s * i_Q + L_m * i_q$$

Ecuación 96: Ecuación de flujo q del estator

$$\psi_D = L_s * i_D + L_m * i_d$$

Ecuación 97: Ecuación de flujo d del estator

$$\psi_q = L_r * i_q + L_m * i_Q$$

Ecuación 98: Ecuación de flujo q del rotor

$$\psi_d = L_r * i_d + L_m * i_D$$

Ecuación 99: Ecuación de flujo d del rotor

En este caso operamos de la siguiente manera, debemos restarlos entre ellos para obtener ecuaciones de esta forma:

$$\psi_Q - \psi_q = L_s * i_Q + L_m * i_q - L_r * i_q - L_m * i_Q$$

$$\psi_Q * L_r - \psi_q * X_m = L_s * i_Q * L_r + L_m * i_q L_r - L_r * i_q * L_m - L_m * i_Q * L_m$$

$$\psi_Q * L_r - \psi_q * L_m = L_s * i_Q * L_r - L_m * i_q * L_m$$

$$\psi_Q * L_r - \psi_q * L_m = (L_s * L_r - L_m^2) i_Q$$

$$\frac{\psi_Q * L_r - \psi_q * L_m}{(L_s * L_r - L_m^2)} = i_Q$$

Ecuación 100: Obtención de la ecuación de las intensidades

Con el mismo procedimiento obtenemos  $i_D$ ,  $i_d$  e  $i_q$  con lo que podemos completar los bloques de funciones que nos quedaban:

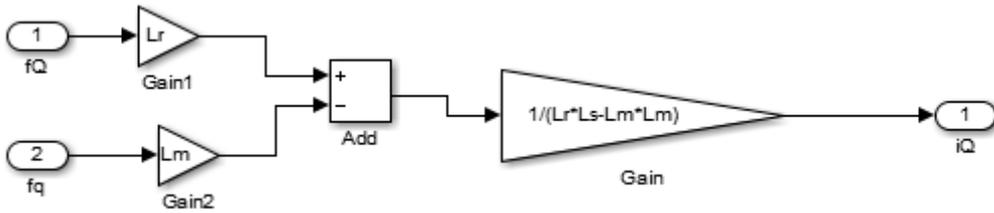


Figura 64: Estructura interna de la función de intensidad q del estator

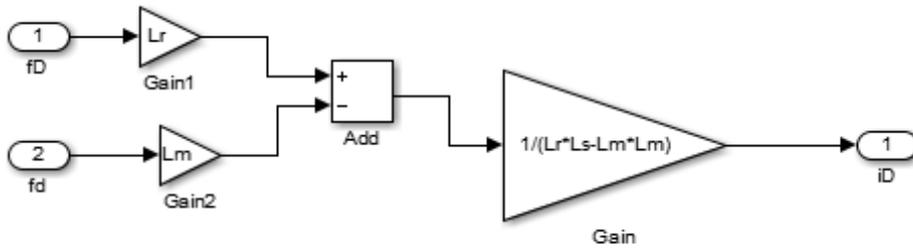


Figura 65: Estructura interna de la función de intensidad d del estator

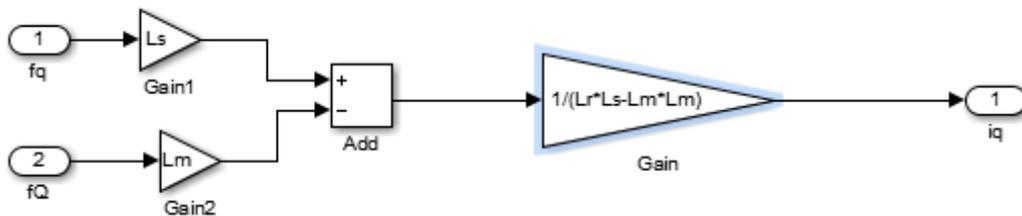


Figura 66: Estructura interna de la función de intensidad q del rotor

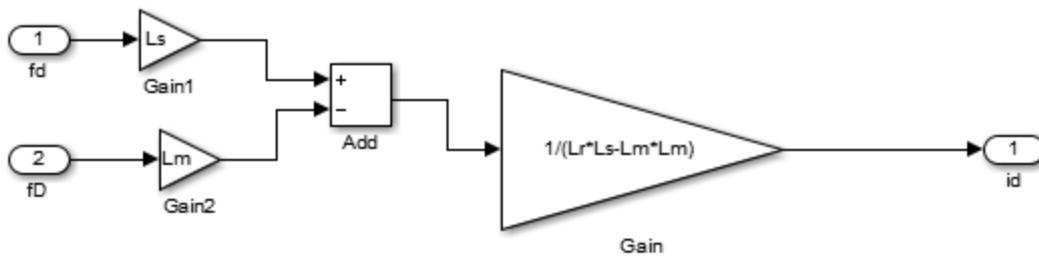


Figura 67: Estructura interna de la función de intensidad d del rotor

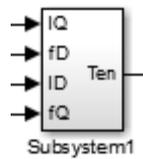


Figura 68: Bloque de la función de par

En este caso aplicando directamente la fórmula obtenemos el par del motor:

$$T_{en} = \frac{3P}{4} (i_Q * \psi_D + i_D * \psi_Q)$$

Ecuación 101: Par motor

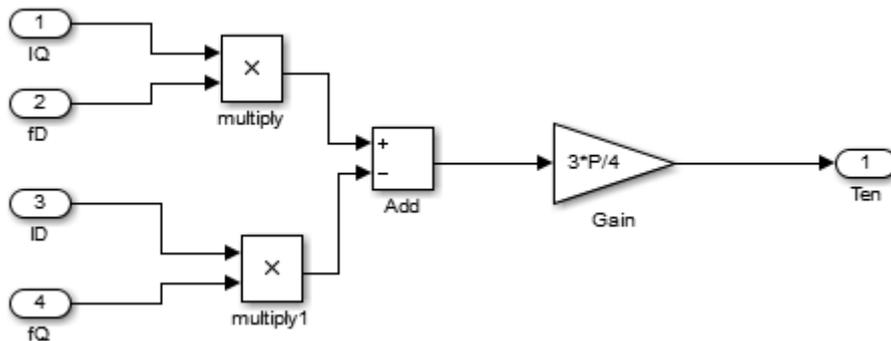


Figura 69: Estructura interna de la fórmula del par

Por último nos falta obtener la velocidad del motor.

$$\frac{d\omega_{rn}}{dt} = (T_{en} - T_{ln}) * \frac{1}{J} * \frac{p}{2}$$

Ecuación 102: Velocidad del rotor

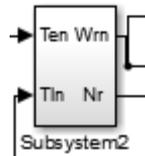


Figura 70: Bloque de la velocidad del rotor

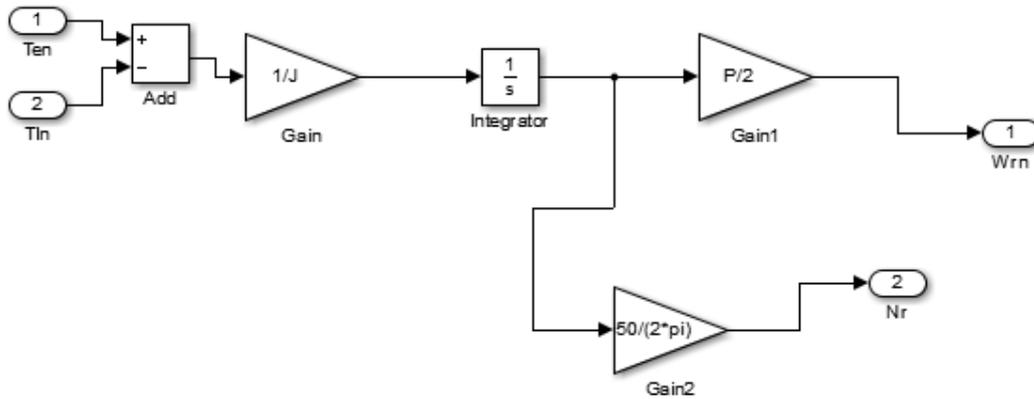
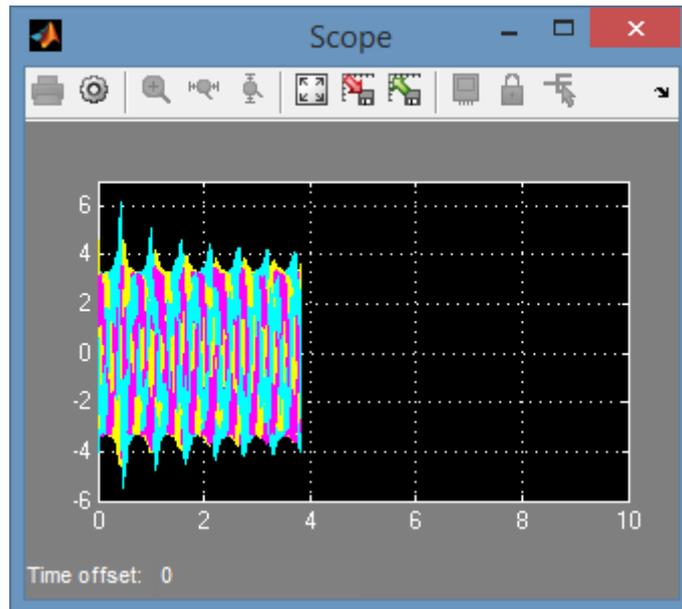


Figura 71: Estructura interna del bloque de la velocidad del rotor

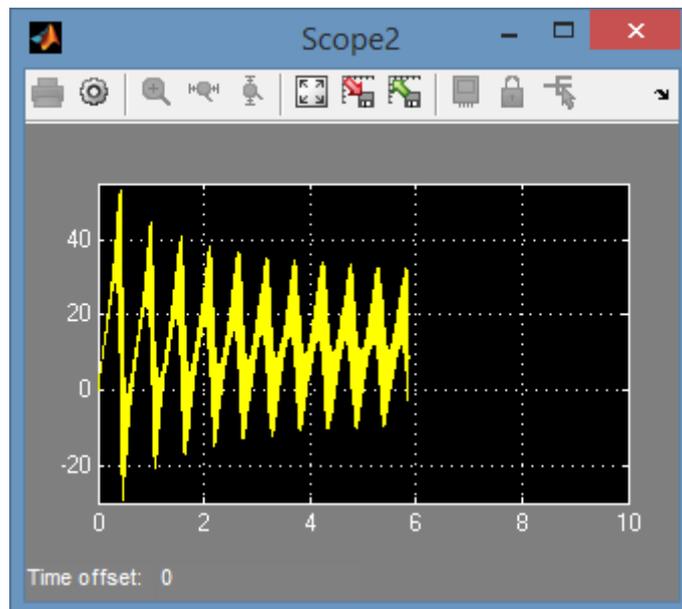
Ya hemos visto todos los bloques y ecuaciones utilizadas. Sin embargo se han seguido teniendo una serie de variables sin valor, principalmente resistencias y reactancias. Por lo tanto a este programa de Simulink le acompaña uno bastante simple donde se introducen los diferentes valores de los parámetros del motor. El código sería el siguiente:

```
Rs=43.122; %Resistencia del estator
Rr=10.831; %Resistencia del rotor
Ls=0.95+0.38i;%Inductancia del estator
Lr=(0.95+0.1i);%Inductancia del rotor
Lm=(0.95); % Inductancia mutua
P=2; %Pares de polos del motor
J=0.00442;%Inercia
```

Los resultados obtenidos serían los siguientes:



*Figura 72: Intensidades del estator con modelo dinámico propio*



*Figura 73: Velocidad con modelo dinámico propio*

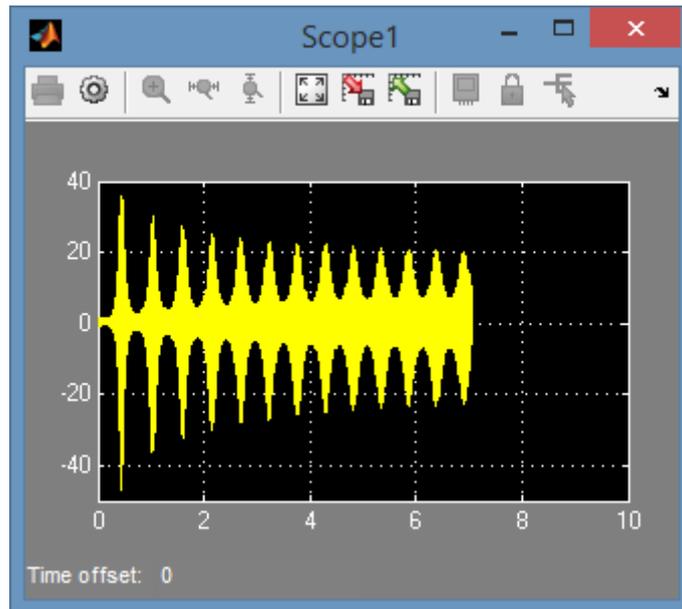


Figura 74: Par con modelo dinámico propio

En este caso no se nos estabilizan los resultados. Aunque si que cuadra el cambio de intensidades con respecto a la relación de transformación que se debe tener. Sin embargo si adaptamos nuestro modelo a que tenga una intensidad igual a la del modelo del motor de Matlab el resultado si que no sale igual. Por lo tanto se podría decir que el modelo dinámico se ha creado correctamente sin embargo las simplificaciones que se realizan hacen que nuestro motor no funcione correctamente. Esto se podría deber principalmente a su relación de transformación diferente de la unidad, debido a que la mayoría de motores y ejemplos que se usan en los libros no cambian esta relación.

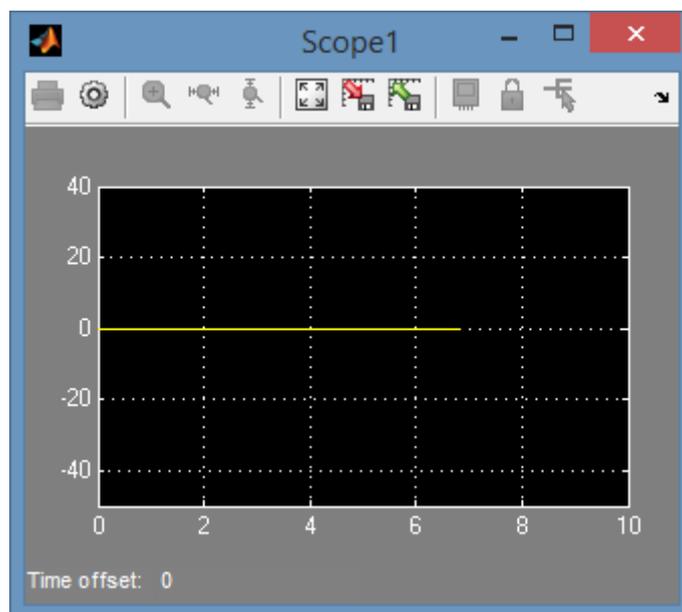


Figura 75: Par con modelo propio en caso de adaptar la intensidad a la del modelo de matlab

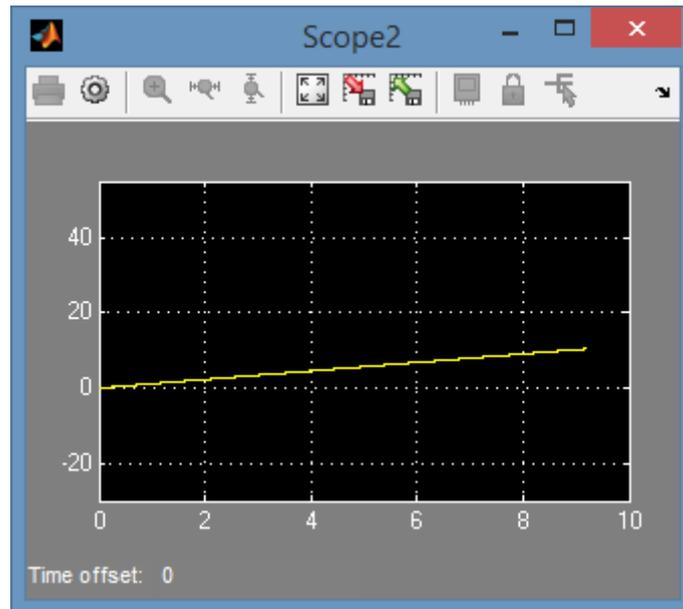


Figura 76: Velocidad del modelo dinámico propio con la intensidad del motor de Matlab

## 9. Conclusiones

Con este proyecto hemos conseguido profundizar en los motores de inducción. Por un lado hemos realizado una caracterización del motor mediante la normativa IEC-60034. Sería una manera común de proceder en cualquier industria, para asegurar la correcta realización del trabajo. Aunque los métodos que exponen son más laboriosos que los que ofrecen los libros comunes de máquinas eléctricas nos proporcionan menor incertidumbre. Aunque no se han podido seguir algunos de los pasos debido a falta de material en el laboratorio, sí que se han seguido la mayoría. Principalmente hemos realizado ensayos que tienen que ver con las pérdidas divididas del motor. Y a partir de ellos y las fórmulas que nos indican en la normativa hemos podido obtener todos los parámetros del circuito equivalente, además de la inercia y gran parte de las pérdidas del motor de manera separada.

Por otro lado hemos desarrollado los modelos matemáticos, tanto el estático como el dinámico en ejes d-q. Gracias a ello hemos podido desarrollar una simulación Matlab y Simulink. Sin embargo los resultados obtenidos no han sido los esperados. No se ha conseguido simular el motor de manera adecuada. Por un lado Matlab incluye un motor de inducción el cual no nos ha servido ya que no incluye la posibilidad de tener una relación de transformación estator-rotor diferente de uno. Por otro lado hemos desarrollado un modelo propio. Sin embargo tampoco ha funcionado adecuadamente. Aunque en este caso si tiene en cuenta la relación de transformación, no se estabiliza en los resultados de velocidad del rotor y par. Esto se puede deber principalmente a que los modelos matemáticos realizados tienen una serie de simplificaciones, y al tener nuestro motor una relación de transformación poco común (Incluso la normativa nos indica que en caso de no saber dicho valor se considera 1) es posiblemente una de las causas del problema. Igualmente si se ha comprobado que ambos modelos coincidirían en el caso de que se tuviera una relación de transformación igual a la unidad.

## 10. Bibliografía

### 10.1. Bibliografía básica

- [1] *Máquinas eléctricas rotativas*. UNE EN 60034.
- [2] Leonhard, W. *Control of electrical drives*. Ed. Springer, 2001

### 10.2. Bibliografía complementaria

#### 10.2.1. Libros

- [1] Chapman Stephen J., *Máquinas eléctricas*, Mc GrawHill, 2005.
- [2] Fraile Mora, J. *Máquinas eléctricas*, Mc GrawHill, 2003.
- [3] Sanz Feito, J. *Máquinas eléctricas*, Pearson Educación, 2002.

#### 10.2.2. Apuntes

- [4] *La máquina de asíncrona I: Determinación de parámetros y curvas características*. Departamento de ingeniería eléctrica UPCT.
- [5] *Fundamentos del análisis dinámico de las máquinas asíncronas de inducción*. Departamento de ingeniería eléctrica UPCT.

#### 10.2.3. Publicaciones

- [6] Sifat Shah, A. Rashid, MKL Bhatti., *Direct Qadrate (D-Q) Modeling of 3-Phase Induction Motor Using Matlab/Simulink.*, COMSATS Institute of Information and Technology, Abbottabar, Pakistan.
- [7] G. Renukadevi, K.Rajambal., *Generalized d-q Model of n-phase Induction Motor drive.*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Comunnication Engineering Vol: 6, No:9, 2012.
- [8] Abhinav, Venu Sanwan, *Normalized Dynamic Simulation of 3-phase Induction motor using MATLAB/SIMULINK*. Electrical department, PEC University of technology Chandigarh-160012, India.
- [9] Dal Y. Ohm. *DYNAMIC MODEL OF INDUCTION MOTORS FOR VECTOR CONTROL*. Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia.
- [10] Mircea Popescu. *Induction motor modelling for vector control purposes*. Helsinki University of Technology Department of Electrical and Comunnications Engineering Laboratory of Electromechanics.
- [11] Alecsandru Simon, Leonard Livadaru and Adrian Munteanu. *Gh. Asachi*. Technical University of Iasi, Electrical Engineering Faculty, Romania.

## 11. Referencias

### 11.1. Figuras

Figura 1: Estator. Imagen obtenida en el proyecto "Diagnóstico en tiempo real de fallos en motores eléctricos alimentados desde variadores de frecuencia mediante inyección de una señal de alta frecuencia" De la Universidad de Oviedo. ....	10
Figura 2: Rotor jaula de ardilla. Imagen obtenida de la web <a href="http://www.tuveras.com">http://www.tuveras.com</a> .....	11
Figura 3: Rotor devanado o de anillos. Imagen obtenida de la web " <a href="http://apuntescientificos.org">http://apuntescientificos.org</a> " .....	11
Figura 4: Despiece de elementos de ambos tipos de motores. Imagen obtenida del blog <a href="http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com.es">http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com.es</a> .....	12
Figura 5: Circuito equivalente de un motor de inducción.....	13
Figura 6: Motor de inducción del estudio .....	18
Figura 7: Motor de inducción del estudio .....	19
Figura 8: Chapa de características del motor .....	19
Figura 9: Freno mecánico .....	20
Figura 10: Polímetro digital.....	21
Figura 11: Wattímetro digital. Displays. Y control. ....	21
Figura 12: Wattímetro digital. Bornes de conexión .....	22
Figura 13: Fuente de tensión continua. ....	22
Figura 14: Unidad de control del servofreno .....	23
Figura 15: Cables de conexión del motor.....	23
Figura 16: Acoplamiento y protección para el motor. ....	24
Figura 17: Conexión para la medición de la resistencia del estator .....	25
Figura 18: Conexión para la medición de la resistencia del rotor.....	25
Figura 19: Conexión del motor en el ensayo de vacío .....	29
Figura 20: Conexión del motor en el ensayo de rotor bloqueado .....	41
Figura 21: Conexión del freno mecánico al motor .....	41
Figura 22: Conexión ensayo de carga.....	53
Figura 23: Conexión del servofreno como carga.....	54
Figura 24: Circuito equivalente a partir del ensayo de carga.....	71
Figura 25: Circuito equivalente a partir del ensayo de rotor bloqueado.....	71
Figura 26: Conexión para el ensayo de deceleración.....	73
Figura 27: Pantalla principal de ActiveServo .....	77
Figura 28: Parte superior del programa ActiveServo .....	77
Figura 29: Propiedades en ActiveServo.....	78
Figura 30: Botones de accionamiento en ActiveServo.....	78
Figura 31: Parte lateral de la pantalla principal de ActiveServo .....	79
Figura 32: Parte lateral de la pantalla principal de ActiveServo .....	80
Figura 33: Curva de pares de giro que se puede modificar en ActiveServo .....	81
Figura 34: Modelo real de una máquina trifásica de inducción con tres devanados estáticos y tres rotóricos. Imagen obtenida de los apuntes "Induction motor modelling for vector control purposes" de Helsinki University. ....	83
Figura 35: Circuito eléctrico de la máquina eléctrica generalizada con ejes dq. De los apuntes de "Máquinas eléctricas" de la Universidad Politécnica de Cartagena. ....	88

Figura 36: Transformación de Clark. Imagen de los apuntes de Máquinas eléctricas de la UPCT. .....	90
Figura 37: Transformada de Park. Imagen obtenida de los apuntes de máquinas eléctricas de la UPCT .....	91
Figura 38: Simulando el motor con el modelo matemático de Simulink.....	92
Figura 39: Características del generador de tensión trifásico.....	93
Figura 40: Características del motor asíncrono en el modelo de Matlab .....	94
Figura 41: Características del motor asíncrono con el modelo de Matlab .....	95
Figura 42: Bus Selector en el modelo del motor de Matlab .....	96
Figura 43: Resultados de par y velocidad en el ensayo con el motor de Matlab.....	96
Figura 44: Intensidades de estator y rotor en el ensayo con el motor de Matlab.....	97
Figura 45: Bloque principal del modelo dinámico propio .....	98
Figura 46: Bloque secundario del modelo dinámico propio .....	98
Figura 47: Bloque transformador abc-dq.....	99
Figura 48: Estructura interna del bloque transformador abc-dq.....	99
Figura 49: Bloque transformador dq-abc.....	100
Figura 50: Estructura interna del bloque transformador dq-abc.....	100
Figura 51: Conexión de los bloques de funciones dentro del modelo.....	100
Figura 52: funciones para obtener el flujo e intensidad d del rotor .....	101
Figura 53: funciones para obtener el flujo e intensidad q del rotor .....	101
Figura 54: funciones para obtener el flujo e intensidad d del estator.....	101
Figura 55: funciones para obtener el flujo e intensidad q del estator.....	101
Figura 56: Estructura interna del bloque de parámetros d del rotor .....	101
Figura 57: Estructura interna del bloque de parámetros q del rotor .....	102
Figura 58: Estructura interna del bloque de parámetros d del estator .....	102
Figura 59: Estructura interna del bloque de parámetros q del estator .....	102
Figura 60: Estructura interna de la función de flujo q del estator .....	103
Figura 61: Estructura interna de la función de flujo d del estator .....	103
Figura 62: Estructura interna de la función de flujo q del rotor .....	104
Figura 63: Estructura interna de la función de flujo d del rotor .....	104
Figura 64: Estructura interna de la función de intensidad q del estator .....	105
Figura 65: Estructura interna de la función de intensidad d del estator .....	105
Figura 66: Estructura interna de la función de intensidad q del rotor.....	105
Figura 67: Estructura interna de la función de intensidad d del rotor.....	106
Figura 68: Bloque de la función de par .....	106
Figura 69: Estructura interna de la fórmula del par.....	106
Figura 70: Bloque de la velocidad del rotor .....	107
Figura 71: Estructura interna del bloque de la velocidad del rotor .....	107
Figura 72: Intensidades del estator con modelo dinámico propio .....	108
Figura 73: Velocidad con modelo dinámico propio .....	108
Figura 74: Par con modelo dinámico propio .....	109
Figura 75: Par con modelo propio en caso de adaptar la intensidad a la del modelo de matlab .....	109
Figura 76: Velocidad del modelo dinámico propio con la intensidad del motor de Matlab ....	110

## 11.2. Tablas

Tabla 1: Ensayos para motores de inducción según normativa UNE-EN-60034-2-1 .....	17
Tabla 2: resistencia del estator .....	25
Tabla 3: Resistencia del estator.....	26
Tabla 4: Resistencia del estator.....	26
Tabla 5: Resistencia del rotor .....	26
Tabla 6: Resistencia del rotor .....	26
Tabla 7: Resistencia del rotor .....	27
Tabla 8: Resistencias de estator y rotor .....	27
Tabla 9: Relación de transformación estator-rotor .....	27
Tabla 10: Relación de transformación estator-rotor .....	28
Tabla 11: Relación de transformación estator-rotor .....	28
Tabla 12: Tabla de resultados tras el ensayo 1 de vacío .....	29
Tabla 13: Tabla de resultados tras el ensayo 2 de vacío .....	30
Tabla 14: Tabla de resultados tras el ensayo 3 de vacío .....	30
Tabla 15: Pérdidas divididas del ensayo de vacío 1 .....	31
Tabla 16: Pérdidas divididas del ensayo de vacío 2 .....	31
Tabla 17: Pérdidas divididas del ensayo de vacío 3 .....	31
Tabla 18: Pérdidas de rozamiento y ventilación en los ensayos realizados.....	33
Tabla 19: parámetros obtenidos del ensayo de vacío 1.....	36
Tabla 20: parámetros obtenidos del ensayo de vacío 2.....	38
Tabla 21: parámetros obtenidos del ensayo de vacío 3.....	39
Tabla 22: Resistencia del hierro .....	40
Tabla 23: Resultados del primer ensayo de rotor bloqueado.....	42
Tabla 24: Resultados del segundo ensayo de rotor bloqueado .....	42
Tabla 25: Resultados del tercer ensayo de rotor bloqueado .....	42
Tabla 26: Resultados obtenidos del primer ensayo de rotor bloqueado.....	44
Tabla 27: Resultados obtenidos del segundo ensayo de rotor bloqueado.....	44
Tabla 28: Resultados obtenidos del tercer ensayo de rotor bloqueado.....	45
Tabla 29: Inductancia mutua y tensión magnetizante en el primer ensayo de rotor bloqueado .....	46
Tabla 30: Inductancia mutua y tensión magnetizante en el segundo ensayo de rotor bloqueado .....	47
Tabla 31: Inductancia mutua y tensión magnetizante en el tercer ensayo de rotor bloqueado.....	48
Tabla 32: Inductancias de estator y rotor según el primer ensayo de rotor bloqueado .....	49
Tabla 33: Inductancias de estator y rotor según el segundo ensayo de rotor bloqueado .....	50
Tabla 34: Inductancias de estator y rotor según el tercer ensayo de rotor bloqueado .....	51
Tabla 35: Resistencias obtenidas antes y después del primer ensayo de carga .....	54
Tabla 36: Resultados del primer ensayo de carga.....	55
Tabla 37: Resistencias obtenidas antes y después del segundo ensayo de carga .....	55
Tabla 38: Resultados del segundo ensayo de carga.....	56
Tabla 39: Resistencias obtenidas antes y después del tercer ensayo de carga .....	56
Tabla 40: Resultados del tercer ensayo de carga.....	57
Tabla 41: Inductancias totales y de dispersión a partir del primer ensayo de carga.....	60
Tabla 42: Inductancias totales y de dispersión a partir del segundo ensayo de carga .....	61
Tabla 43: Inductancias totales y de dispersión a partir del tercer ensayo de carga .....	62

Tabla 44: Inductancia y tensión de magnetización en el primer ensayo de carga .....	63
Tabla 45: Inductancia y tensión de magnetización en el segundo ensayo de carga.....	64
Tabla 46: Inductancia y tensión de magnetización en el tercer ensayo de carga.....	65
Tabla 47: Cálculo de las inductancias de estator y rotor .....	67
Tabla 48: Cálculo de las inductancias de estator y rotor .....	67
Tabla 49: Cálculo de las inductancias de estator y rotor .....	68
Tabla 50: Valores del motor a flujo constantes en el ensayo de carga.....	70
Tabla 51: Valores del motor a flujo constante en el ensayo de rotor bloqueado .....	70
Tabla 52: Resistencia del hierro en el ensayo de carga .....	70
Tabla 53: Resistencia del hierro en el ensayo de rotor bloqueado.....	70
Tabla 54: Variación media de la velocidad.....	76

### 11.3. Gráficas

Gráfico 1: Tensión al cuadrado frente a pérdidas mecánicas y del hierro.....	32
Gráfico 2: Tensión al cuadrado frente a pérdidas mecánicas y del hierro 2.....	33
Gráfico 3: Tensión al cuadrado frente a pérdidas mecánicas y del hierro 3.....	33
Gráfico 4: Pérdidas en el hierro 1.....	34
Gráfico 5: Pérdidas en el hierro 2.....	35
Gráfico 6: Pérdidas en el hierro 3.....	35
Gráfico 7: Relación $L_{ts}-I_m$ 1er ensayo.....	37
Gráfico 8: Relación $L_{ts}-U_{is}=0$ 1er ensayo .....	37
Gráfico 9: Relación $L_{ts}-I_m$ 2º ensayo.....	38
Gráfico 10: Relación $L_{ts}-U_{is}=0$ 2º ensayo.....	38
Gráfico 11: Relación $L_{ts}-I_m$ 3er ensayo.....	39
Gráfico 12: Relación $L_{ts}-U_{is}=0$ 3er ensayo.....	39
Gráfico 13: Inductancia de dispersión total en función de la intensidad .....	44
Gráfico 14: Inductancia de dispersión total en función de la intensidad .....	45
Gráfico 15: Inductancia de dispersión total en función de la intensidad .....	45
Gráfico 16: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante.....	47
Gráfico 17: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante.....	48
Gráfico 18: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante.....	49
Gráfico 19: Relación entre la intensidad de magnetización y las inductancias de estator y rotor .....	50
Gráfico 20: Relación entre la intensidad de magnetización y las inductancias de estator y rotor .....	51
Gráfico 21: Relación entre la intensidad de magnetización y las inductancias de estator y rotor .....	52
Gráfico 22: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante.....	64
Gráfico 23: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante.....	65
Gráfico 24: Inductancia mutua en función de la tensión magnetizante.....	66
Gráfico 25: Relación de inductancias de estator y rotor con la intensidad .....	67
Gráfico 26: Relación de inductancias de estator y rotor con la intensidad .....	68
Gráfico 27: Relación de inductancias de estator y rotor con la intensidad .....	69
Gráfico 28: Ensayo de deceleración 1 .....	73
Gráfico 29: Ensayo de deceleración 2 .....	74
Gráfico 30: Ensayo de deceleración 3 .....	74

Gráfico 31: Relación velocidad con deceleración 1.....	75
Gráfico 32: Relación velocidad con deceleración 2.....	75
Gráfico 33: Relación velocidad con deceleración 3.....	76