



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

OBTENCIÓN DE PAR RESISTENTE CON
MÁQUINAS ASÍNCRONAS TRIFÁSICAS
ALIMENTADAS POR CORRIENTE
CONTINUA

MEMORIA PRESENTADA POR:

Miguel Martínez Molina

TUTOR/A:

Antonio Abellán García

GRADO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Convocatoria de defensa: Junio de 2021

Resumen / Abstract

El siguiente TFG pretende realizar el estudio teórico-práctico para generar pares de carga variables con máquinas asíncronas trifásicas trabajando en modo freno, mediante el método del frenado dinámico por inyección de corriente continua en el estátor. Este método consiste en la creación de un campo magnético por el estátor, fijo en el espacio y en el tiempo, que provoque un par electromagnético opuesto al giro del rotor.

The following Final degree project pretends to realize the theoretical and practical study to generate variable load torques with three-phase asynchronous machines working in braking mode, via dynamic braking by direct current injection on the armature. This method relates to the creation of a magnetic field on the armature, fix in the space and constant in time, that creates an electromagnetic torque defiance to the rotation on the rotor.

Palabras clave / Key words

Máquina asíncrona, frenado dinámico, campo magnético fijo y constante

Asynchronous machine, dynamic braking method, magnetic field constant and fix

AGRADECIMIENTOS

Primero de todo, me gustaría agradecer a mi tutor de TFG Antonio Abellán García, toda la ayuda aportada a la hora de realizar este trabajo, tanto teórica como a la hora de realizar los ensayos de laboratorio, y haberme dado la confianza y oportunidad de realizar un trabajo de fin de grado distinto y en algo en lo que yo siento una gran fascinación que son los motores eléctricos.

También, querría agradecer la motivación, el esfuerzo, el trato cercano y familiar otorgado por el profesorado del grado de ingeniería eléctrica durante mis cuatro años de grado y sobre todo a inicios de la pandemia, donde la ayuda y recursos otorgados al alumnado fue enorme y se aseguró una gran calidad en el aprendizaje, no perdiendo el año académico.

Por último, me gustaría darle las gracias a mi familia (en particular a mis padres María del Carmen y José María y a mi hermano Marcos) por todo el apoyo y ayuda otorgada en todo momento y haberme motivado siempre a hacer aquello que me propongo.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	FRENADO DÍNAMICO EN UNA MÁQUINA ASÍNCRONA	3
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.2.	EQUIVALENTE EN CC Y AC EN EL ESTÁTOR	3
2.2.1.	Conexión triángulo-a	6
2.2.2.	Conexión triángulo-b.....	9
2.2.3.	Conexión estrella - c	12
2.2.4.	Conexión estrella - d.....	15
2.2.5.	Conexión serie	18
2.3.	CIRCUITO ELÉCTRICO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS	23
2.4.	PAR ELÉCTRICO EN EL FRENADO DÍNAMICO	24
3.	ENSAYOS DE VACÍO Y CORTOCIRCUITO	25
3.1.	OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA R1 DEL ESTÁTOR.....	26
3.2.	ENSAYO DE CORTOCIRCUITO	29
3.3.	ENSAYO DE VACÍO	34
4.	CIRCUITO EQUIVALENTE REAL DE LOS MOTORES.....	49
5.	PAR DESARROLLADO POR EL MOTOR.....	50
6.	PAR DESARROLLADO EN EL FRENADO DINÁMICO.....	55
7.	VERIFICACIÓN DE LOS CIRCUITO EQUIVALENTES	65
8.	CONCLUSIÓN	67
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Estátor de una máquina trifásica. Máquinas Eléctricas; Jesús Fraile Mora; página 261	1
Figura 1.2 Rotor de jaula de ardilla. Máquinas Eléctricas; Jesús Fraile Mora; página 262	1
Figura 2.1 Flujo de potencia en frenado dinámico. Frenado de máquinas asíncronas o de inducción; Miguel Ángel Rodríguez Pozueta; Página 18.....	3
Figura 2.2 Conexiones eléctricas en el estátor conectado en C.C.	5
Figura 2.3 Conexión triángulo-a.....	6
Figura 2.4 Circuito eléctrico equivalente, triángulo-a.....	7
Figura 2.5 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema triángulo-a.....	8
Figura 2.6 Conexión triángulo-b	9
Figura 2.7 Circuito equivalente triángulo-b	9
Figura 2.8 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema triángulo-b.....	11
Figura 2.9 Conexión estrella-c.....	12
Figura 2.10 Circuito equivalente estrella-c.....	12
Figura 2.11 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema estrella-c.....	13
Figura 2.12 Conexión estrella-d	15
Figura 2.13 Circuito equivalente estrella-d	15
Figura 2.14 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema estrella-d.....	17
Figura 2.15 Conexión serie.....	18
Figura 2.16 Circuito equivalente serie.....	19
Figura 2.17 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema serie.....	20
Figura 2.18 Circuito equivalente de una máquina asíncrona; Máquinas eléctricas 5ta Edición; Jesús Fraile Mora; Página 275	23
Figura 2.19 Circuito equivalente en Frenado Dinámico.....	24
Figura 3.1 Comparación entre R_1 y $R_1 + 15\%$ en el motor Edibon.....	26
Figura 3.2 Comparación entre R_1 y $R_1 + 15\%$ en el motor Thurn Grande	27
Figura 3.3 Comparación entre R_1 y $R_1 + 15\%$ en el motor Thurn Pequeño.....	27
Figura 3.4 Conexionado para obtener R_1	28
Figura 3.5 Ensayo de cortocircuito.....	29
Figura 3.6 Circuito equivalente en ensayo de cortocircuito	31
Figura 3.7 Ensayo de vacío	34
Figura 3.8 Circuito equivalente del ensayo en vacío.....	44
Figura 4.1 Circuito equivalente del Motor EDIBON	49

Figura 4.2 Circuito equivalente del Motor Thurn Grande.....	49
Figura 4.3 Circuito equivalente del Motor Thurn Pequeño.....	49
Figura 5.1 Thurn P. Curva de Par a régimen nominal.....	51
Figura 5.2 Thurn P. Comparativa Ecuaciones del Par y punto de trabajo nominal	51
Figura 5.3 Thurn P. Curva Par-Deslizamiento con offset	51
Figura 5.4 Thurn P. Curva Par-Deslizamiento sin offset	51
Figura 5.5 Thurn P. Curva Par-rpm con offset.....	51
Figura 5.6 Thurn P. Curva Par-rpm sin offset	51
Figura 5.7 Thurn G. Curva de Par a régimen nominal	52
Figura 5.8 Thurn G. Comparativa Ecuaciones del Par y punto de trabajo nominal.....	52
Figura 5.9 Thurn G. Curva Par-Deslizamiento con offset.....	52
Figura 5.10 Thurn G. Curva Par-Deslizamiento sin offset.....	52
Figura 5.11 Thurn G. Curva Par-rpm con offset	52
Figura 5.12 Thurn G. Curva Par-rpm sin offset	52
Figura 5.13 EDIBON Curva de Par a régimen nominal.....	53
Figura 5.14 EDIBON Comparativa Ecuaciones del Par y punto de trabajo nominal	53
Figura 5.15 EDIBON Curva Par-Deslizamiento con offset	53
Figura 5.16 EDIBON Curva Par-Deslizamiento sin offset	53
Figura 5.17 EDIBON Curva Par-rpm con offset.....	53
Figura 5.18 EDIBON Curva Par-rpm sin offset.....	53
Figura 6.1 M.EDIBON, Par por rpm desarrollado con Icc del [20 – 80] % del valor nominal	56
Figura 6.2 M.EDIBON, Par por rpm con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	56
Figura 6.3 M.EDIBON, Par por frecuencia con Icc del [20 – 80] % del valor nominal	57
Figura 6.4 M.EDIBON, Par por frecuencia con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	57
Figura 6.5 M.Thurn Grande, Par por rpm con Icc del [20 – 80] % del valor nominal...	58
Figura 6.6 M.Thurn Grande, Par por rpm con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	58
Figura 6.7 M.Thurn Grande, Par por frecuencia con Icc del [20 – 80] % del valor nominal	59
Figura 6.8 M.Thurn Grande, Par por frecuencia con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	59
Figura 6.9 M.Thurn Pequeño, Par por rpm con Icc del [20 – 80] % del valor nominal.	60
Figura 6.10 M.Thurn Pequeño, Par por rpm con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	60

Figura 6.11 M.Thurn Pequeño, Par por frecuencia con Icc del [20 – 80] % del valor nominal	61
Figura 6.12 M.Thurn Pequeño, Par por frecuencia con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	61
Figura 6.13 M.EDIBON, Potencia consumida en el estátor con Icc del [20 – 80] % del valor nominal.....	62
Figura 6.14 M.EDIBON, Potencia en el eje con Icc del [20 – 80] % del valor nominal	62
Figura 6.15 M.EDIBON, Potencia consumida en el estátor con Icc del [100 – 160] % del valor nominal.....	62
Figura 6.16 M.EDIBON, Potencia en el eje con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	62
Figura 6.17 M. Thurn Grande, Potencia consumida en el estátor con Icc del [20 – 80] % del valor nominal.....	63
Figura 6.18 M. Thurn Grande, Potencia en el eje con Icc del [20 – 80] % del valor nominal	63
Figura 6.19 M.Thurn Grande, Potencia consumida en el estátor con Icc del [100 – 160] % del valor nominal.....	63
Figura 6.20 M. Thurn Grande, Potencia en el eje con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	63
Figura 6.21 M.Thurn Pequeño, Potencia consumida en el estátor con Icc del [20 – 80] % del valor nominal.....	64
Figura 6.22 M. Thurn Pequeño, Potencia en el eje con Icc del [20 – 80] % del valor nominal	64
Figura 6.23 M.Thurn Pequeño, Potencia consumida en el estátor con Icc del [100 – 160] % del valor nominal.....	64
Figura 6.24 M. Thurn Pequeño, Potencia en el eje con Icc del [100 – 160] % del valor nominal	64
Figura 7.1 Ensayo de verificación de los circuitos equivalentes.....	66

LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS

AC	Corriente alterna
CC	Corriente continua
N	Número de espiras de un bobinado
Keq	Factor de devanado
p	Par de polos
f.m.m.	Fuerza magnetomotriz
F	Fuerza magnetomotriz [Av]
Neq	Bobina equivalente
I _{cc}	Corriente continua [A]
I _{ac}	Valor eficaz de la corriente alterna [A]
I _n	Valor eficaz de la corriente nominal en la máquina [A]
V _{dc}	Tensión continua [V]
V _{cc}	Valor eficaz de la tensión alterna de cortocircuito [V]
V _{th}	Valor eficaz de la tensión del equivalente Thevenin [V]
P _{cu}	Pérdidas en el cobre [W]
P _{Fe}	Pérdidas en el hierro [W]
P _m	Pérdidas mecánicas [W]
R	Valor resistivo [Ω]
R _{th}	Valor resistivo del equivalente Thevenin [Ω]
X	Valor de la reactancia [$j \cdot \Omega$]
X _{th}	Valor de la reactancia del equivalente Thevenin [$j \cdot \Omega$]
n	Revoluciones por minuto [rpm]
s	Deslizamiento
ϕ_p	Flujo magnético por polo [Wb]
f	Frecuencia [Hz]

1. INTRODUCCIÓN

Un motor asíncrono, es aquella máquina eléctrica que crea movimiento mecánico rotatorio aplicando los principios de electromagnetismo y sobre todo la Ley de Faraday. Está formado por dos grandes elementos constructivos: el estátor, tal y como se puede ver en la Figura 1.1 y el rotor en la Figura 1.2.

El estátor o inductor es la parte inmóvil de la máquina, de forma cilíndrica y hueca por dentro para poder albergar el rotor, en su interior existen devanados hechos con conductores de cobre cuya misión es la de crear un campo magnético rotatorio que induzca al rotor y provoque el giro de la máquina.

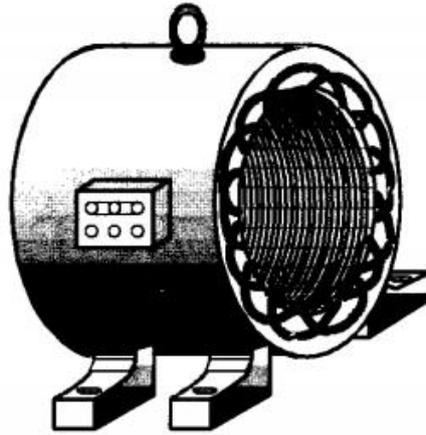


Figura 1.1 Estátor de una máquina trifásica. Máquinas Eléctricas; Jesús Fraile Mora; página 261

El rotor o inducido por otra parte, es la parte móvil que puede tener distintos aspectos constructivos como pueden ser: un bobinado interior, por el cual circulará una corriente y creará un segundo campo magnético en la máquina.

O una “jaula de ardilla”, compuesta por un cilindro con barras metálicas inyectadas en sus laterales, normalmente de aluminio, cortocircuitadas por dos anillos laterales. Por estas barras se inducen corrientes debido al campo magnético del inductor y crearán un segundo campo magnético, originando el giro del rotor.

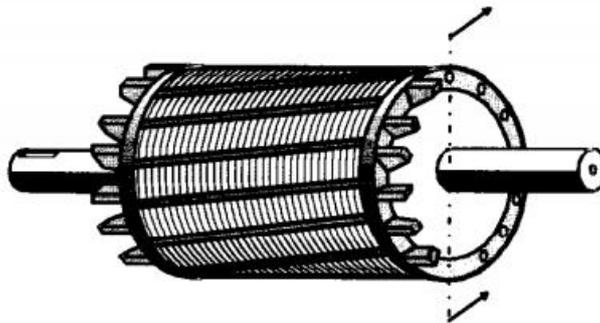


Figura 1.2 Rotor de jaula de ardilla. Máquinas Eléctricas; Jesús Fraile Mora; página 262

Para conseguir detener este tipo de máquinas, sin contar con medios mecánicos, los métodos más comunes son:

- **Frenado libre:** por el estátor deja de circular una corriente por lo cual ya no se inducen f.m.m. y el rotor pasa a girar libremente hasta que por la propia inercia se detiene.
- **Frenado a contracorriente:** se alternan las conexiones de 2 fases del estátor, creando una corriente de sentido inverso a la corriente inicial. Esto provoca una f.m.m. en oposición al giro de rotor, que terminará deteniendo el eje de la máquina. Sin embargo, si una vez detenido no se deja de alimentar a la máquina puede provocar que vuelva a girar de nuevo, pero en sentido inverso.
- **Frenado regenerativo:** se provoca, normalmente, mediante componentes electrónicos volviendo inferior la frecuencia del estátor ante la del rotor. Transformando al rotor en el inductor, el cual será ahora el que deba aportar la energía, que será en su caso la mecánica del eje. Obtenido por lo cual su frenado. Además, aparte de frenarse también suministrará energía de vuelta al sistema eléctrico.
- **Frenado dinámico:** en este caso, se inyecta corriente continua en el estátor creando un campo magnético fijo en el espacio y constante en el tiempo, que provocará el detenimiento del rotor debido a que en este se crea un par que trata de evitar las variaciones de flujo, por lo tanto, alineándose con el campo magnético del inductor.

Este último frenado será el objetivo de estudio para este trabajo y su enfoque será otorgado para crear pares resistentes para una máquina motora siempre en régimen permanente y obviando los transitorios.

2. FRENADO DÍNAMICO EN UNA MÁQUINA ASÍNCRONA

2.1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo académico se unirán por sus ejes dos máquinas asíncronas de las mismas características, donde una trabajará como motor a una velocidad asignada y la otra será la encargada de crear un par variable mediante corriente continua en su estátor.

Como se ha explicado anteriormente, en este procedimiento, el estátor es alimentado con corriente continua, provocando un campo magnético fijo y constante. Este efecto más el movimiento del rotor, inducirá en los conductores de él mismo fuerzas electromotrices, debido a que el rotor se verá afectado por unos enlaces de flujo variables, que generarán una corriente que creará un campo magnético en oposición al del estátor. Por ello, se creará un par en oposición al giro del rotor el cual determinará el par de trabajo de la máquina motora.

Debido a que en este método el estátor trabajará mediante corriente continua, generando un campo fijo y constante, no se transmitirá potencia al rotor, de forma que toda la energía aportada al estátor será disipada por sus conductores. Este fenómeno nos indica que nunca podremos aprovechar la energía mecánica, sino que esta se disipará en las resistencias del rotor.

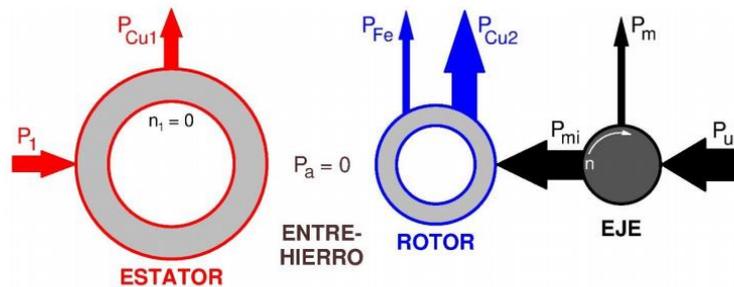


Fig. 16: Balance de potencias de una máquina asíncrona alimentada con corriente continua

Figura 2.1 Flujo de potencia en frenado dinámico. Frenado de máquinas asíncronas o de inducción; Miguel Ángel Rodríguez Pozueta; Página 18

2.2. EQUIVALENTE EN CC Y AC EN EL ESTÁTOR

Para poder trabajar y conseguir el par de frenado en el motor conectado a corriente continua, se obtendrá en equivalente entre la corriente continua y la alterna. Por ello, se calculará una fuerza magnetomotriz generada por un circuito en AC de valor máximo en amplitud, igual que otra formada por un circuito en CC.

Se sabe que la fuerza magnetomotriz producida en un bobinado es según la ecuación (2.1):

$$\vec{F} = \frac{4 \cdot Keq \cdot N}{\pi \cdot 2 \cdot p} \cdot \vec{I} = Neq \cdot \vec{I} \quad (2.1)$$

Donde:

N = Número de espiras de la bobina

Keq = Factor de devanado

p = Par de polos

La fuerza magnetomotriz generada por una corriente continua será según la ecuación (2.2):

$$F_{CC} = \frac{4 \cdot Keq \cdot N}{\pi \cdot 2 \cdot p} \cdot I = Neq \cdot I_{CC} \quad (2.2)$$

Para una corriente alterna monofásica de módulo igual a la amplitud máxima será en función de la ecuación (2.3):

$$F = \frac{4 \cdot Keq \cdot N}{\pi \cdot 2 \cdot p} \cdot \sqrt{2} \cdot I = Neq \cdot \sqrt{2} \cdot I_{AC} \quad (2.3)$$

La fuerza magnetomotriz formada por corriente alterna trifásica, aplicando el Teorema de Ferraris, se obtiene una fuerza magnetomotriz de amplitud equivalente a 3/2 de la generada por una sola fase independiente:

$$F_{AC} = \frac{3}{2} \cdot \frac{4 \cdot Keq \cdot N}{\pi \cdot 2 \cdot p} \cdot \sqrt{2} \cdot I = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot Neq \cdot I_{AC} \quad (2.4)$$

En la máquina encargada del frenado existen distintos tipos de conexionado, lo cual implicará que a cada bobinado estaremos suministrando una corriente distinta en función de la conexión. Obteniendo una fuerza magnetomotriz distinta y un equivalente en corriente alterna diferente.

Para este estudio se verán cinco conexionados posibles y se escogerá la mejor opción de la Figura 2.2 Conexiones eléctricas en el estátor conectado en C.C :

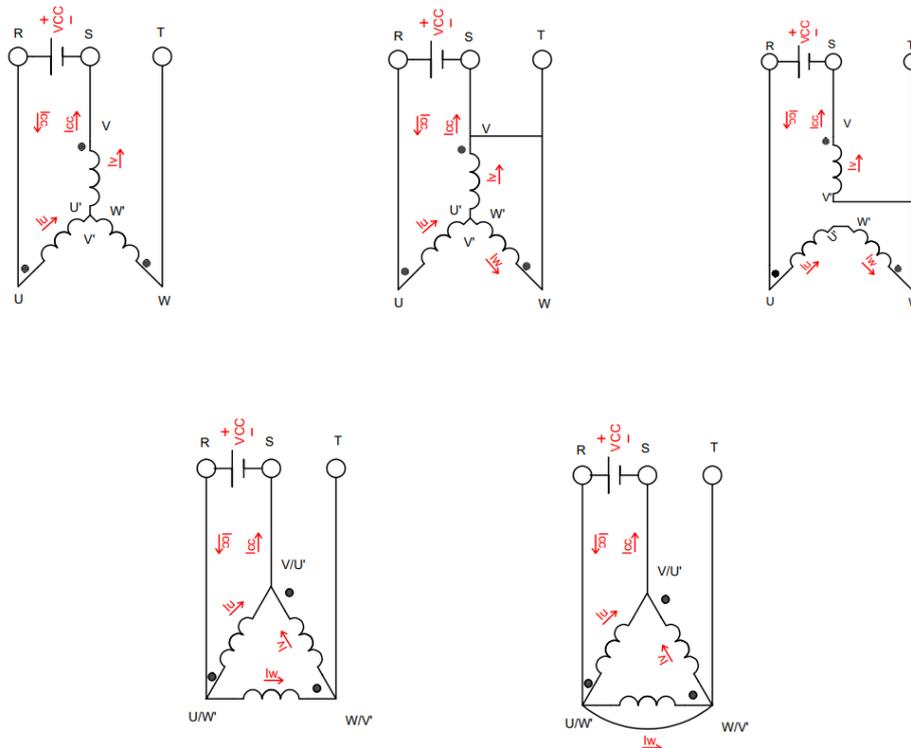


Figura 2.2 Conexiones eléctricas en el estátor conectado en C.C.

El procedimiento al cálculo de la f.m.m. será en función de los puntos homólogos de las bobinas. Donde si la corriente es entrante por el punto, se tomará la f.m.m. de sentido positivo, el sentido que tendría la máquina operando de forma nominal. Si es saliente será de sentido opuesto, lo cual implicará un giro de 180 grados / π radianes, al ángulo original.

Dado que la corriente continua dispone de un fasor fijo en el espacio, se obviará escribir fasores en los valores de CC

Por último, cabe destacar que serán utilizados valores eficaces en corriente alterna, ya que en valores de corrientes senoidales el valor medio es 0, impidiendo realizar cálculos y siempre en régimen permanente, los transitorios se obviarán.

2.2.1. Conexión triángulo-a

Tal y como se muestra en la Figura 2.3 Conexión triángulo-a, el estátor del freno estará conectado en triángulo, alimentado en corriente continua conectando las entradas U y V y además cortocircuitando la bobina W.

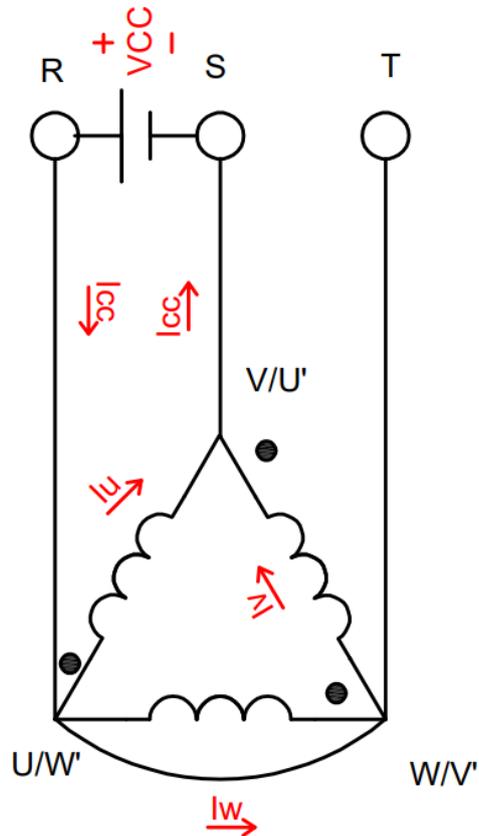


Figura 2.3 Conexión triángulo-a

Debido que estamos en CC, las bobinas no tienen valor inductivo, pero sí resistivo. Por ello, se obtiene la Figura 2.4 Circuito eléctrico equivalente, triángulo-a:

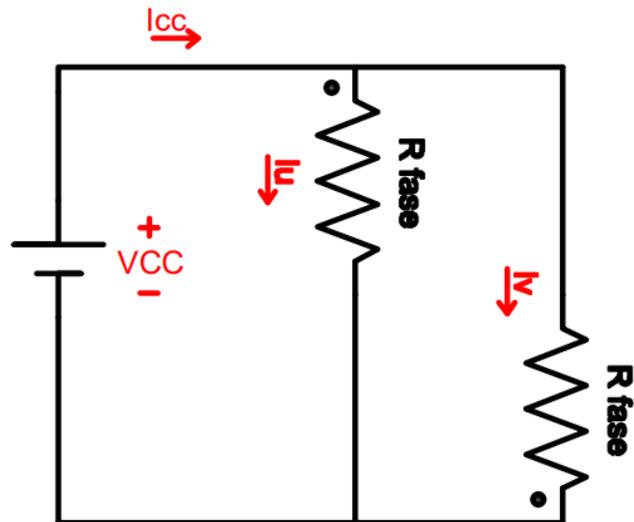


Figura 2.4 Circuito eléctrico equivalente, triángulo-a

Mediante esta conexión la corriente que circulará por el estátor será:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_{cc}} = \frac{V_{cc}}{\frac{R_f}{2}} \quad (2.5)$$

Dado que los bobinados están en paralelo y suponemos que tienen la misma resistencia en su devanado, podemos concluir que ambas corrientes serán iguales:

$$\frac{I_{cc}}{2} = I_u = I_v \quad (2.6)$$

Por lo tanto, recordando las ecuaciones de la fuerza magnetomotriz, la f.m.m. generada por cada bobinado será según las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9):

$$\vec{F}_U = C_F \cdot I_U = \vec{F}_M \quad (2.7)$$

Como: $I_u = I_v \quad (2.8)$

$$\vec{F}_U = -\vec{F}_V = -\vec{F}_M \quad (2.9)$$

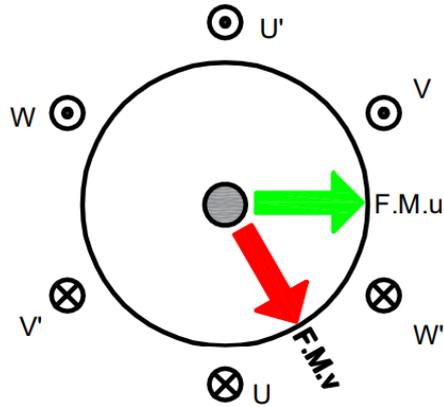


Figura 2.5 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema triángulo-a

Visualizando la Figura 2.5, se puede ver que la f.m.m. total generada por el estátor será:

$$\vec{F}_{cc} = F_M \cdot e^{0j} + F_M \cdot e^{-\frac{\pi}{3}j} = \sqrt{3} \cdot F_M \cdot e^{-\frac{\pi}{6}j} = \sqrt{3} \cdot C_F \cdot I_U = \frac{\sqrt{3}}{2} C_F \cdot I_{cc} \quad (2.10)$$

El equivalente entre CC y AC a la hora de generar la misma fuerza magnetomotriz, igualando en módulo la f.m.m. se obtienen las ecuaciones (2.11) y (2.12):

$$\vec{F}_{cc} = \vec{F}_{ac} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_F \cdot I_{cc} = \frac{3}{\sqrt{2}} C_F \cdot \vec{I}_{ac\ eq} \quad (2.11)$$

$$\vec{I}_{ac\ eq} = \frac{\sqrt{6}}{6} \cdot I_{cc} \quad (2.12)$$

2.2.2. Conexión triángulo-b

Tal y como se muestra en la Figura 2.6 Conexión triángulo-b, el estátor del freno estará conectado en triángulo y se alimentará en corriente continua conectando las entradas U y V.

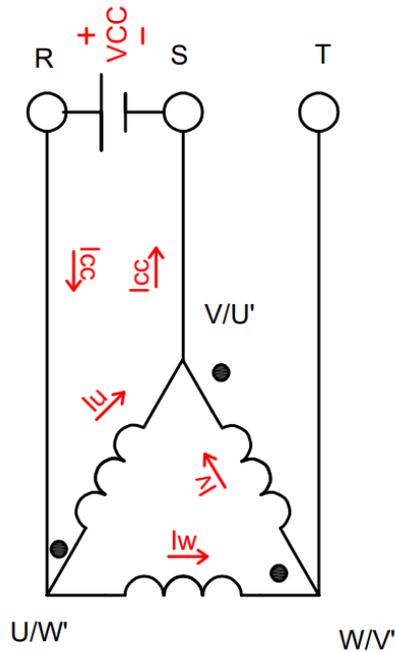


Figura 2.6 Conexión triángulo-b

Debido que estamos en CC, las bobinas no tienen valor inductivo, pero sí resistivo. Por ello, se obtiene la Figura 2.7 Circuito equivalente triángulo-b:

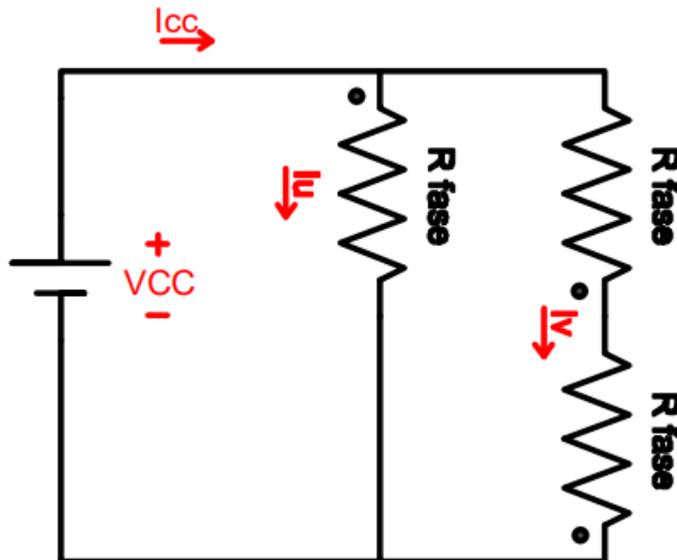


Figura 2.7 Circuito equivalente triángulo-b

Mediante esta conexión la corriente que circulará por el estátor será:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_{cc}} = \frac{V_{cc}}{\frac{R_f \cdot 2 \cdot R_f}{R_f + 2 \cdot R_f}} = \frac{V_{cc}}{\frac{2}{3} R_f} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{cc}}{R_f} \quad (2.13)$$

Dado que los bobinados están en paralelo y suponemos que tienen la misma resistencia en su devanado, la corriente que circulará será:

$$I_u = \frac{I_{cc} \cdot \frac{2}{3} R_f}{R_f} = I_{cc} \cdot \frac{2}{3} \quad (2.14)$$

$$I_v = I_w = \frac{I_{cc} \cdot \frac{2}{3} R_f}{2 \cdot R_f} = I_{cc} \cdot \frac{1}{3} \quad (2.15)$$

Por lo tanto, recordando las ecuaciones de la fuerza magnetomotriz, la f.m.m. generada por cada bobinado será según las ecuaciones (2.16), (2.17) y (2.18):

$$\vec{F}_U = C_F \cdot I_U = \vec{F}_M \quad (2.16)$$

Como:

$$I_V = I_u \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{3} = \frac{I_u}{2} \quad (2.17)$$

$$\vec{F}_v = \vec{F}_w = -\frac{\vec{F}_U}{2} = -\frac{\vec{F}_M}{2} \quad (2.18)$$

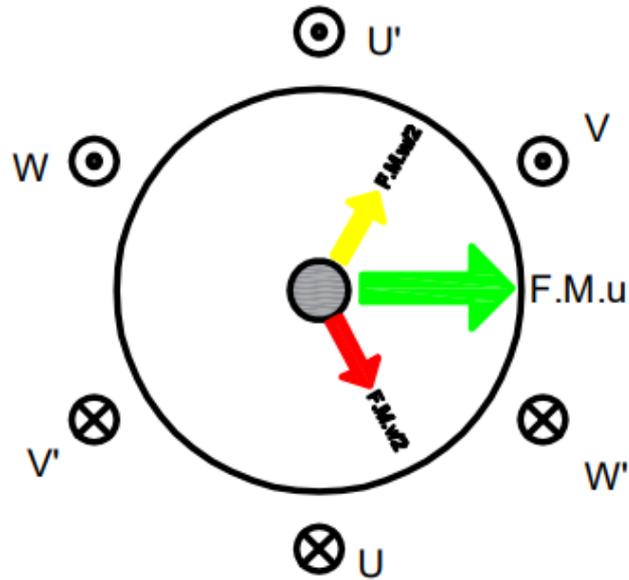


Figura 2.8 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema triángulo-b

Visualizando la Figura 2.8, se conoce que la f.m.m. total generada por el estátor será:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{cc} &= F_M \cdot e^{0j} + \frac{F_M}{2} \cdot e^{-\frac{\pi}{3}j} + \frac{F_M}{2} \cdot e^{\frac{\pi}{3}j} = 1.5 \cdot F_M \cdot e^{-\frac{\pi}{6}j} = 1.5 \cdot C_F \cdot I_U \\ &= C_F \cdot I_{cc}\end{aligned}\quad (2.19)$$

El equivalente entre CC y AC a la hora de generar la misma fuerza magnetomotriz, igualando estas fuerzas se obtendrán las ecuaciones (2.20) y (2.21):

$$\vec{F}_{cc} = \vec{F}_{ac} = C_F \cdot I_{cc} = \frac{3}{\sqrt{2}} C_F \cdot \vec{I}_{ac\ eq} \quad (2.20)$$

$$\vec{I}_{ac\ eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot I_{cc} \quad (2.21)$$

2.2.3. Conexión estrella - c

Tal y como se muestra en la Figura 2.9 Conexión estrella-c, el estátor del freno estará conectado en estrella y se alimentará en corriente continua conectando las entradas U y V.

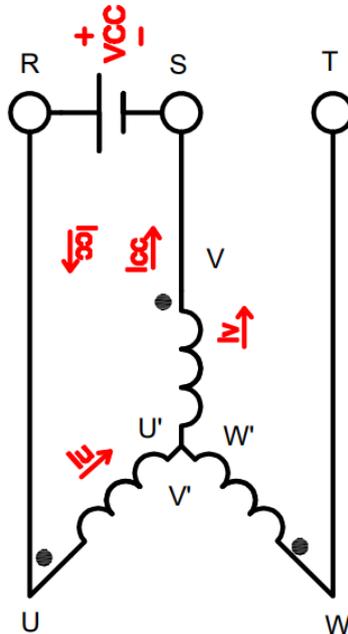


Figura 2.9 Conexión estrella-c

Debido que estamos en CC, las bobinas no tienen valor inductivo, pero sí resistivo. Por ello, se obtiene la Figura 2.10 Circuito equivalente estrella-c:

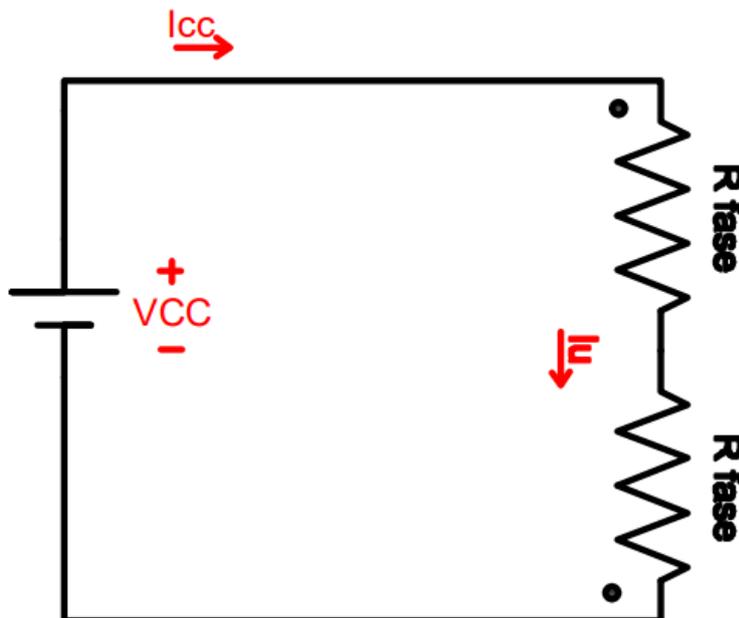


Figura 2.10 Circuito equivalente estrella-c

Mediante esta conexión la corriente que circulará por el estátor será:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_{cc}} = \frac{V_{cc}}{2 \cdot R_f} \quad (2.22)$$

Dado que los bobinados están en serie y suponemos que tienen la misma resistencia en su devanado, la corriente circulante por ellos será:

$$I_u = I_v = I_{cc} \quad (2.23)$$

Por lo tanto, recordando las ecuaciones de la fuerza magnetomotriz, la f.m.m. generada por cada bobinado será:

$$\vec{F}_U = C_F \cdot I_U = \vec{F}_M \quad (2.24)$$

Como:

$$I_V = I_U \quad (2.25)$$

$$\vec{F}_v = -\vec{F}_M \quad (2.26)$$

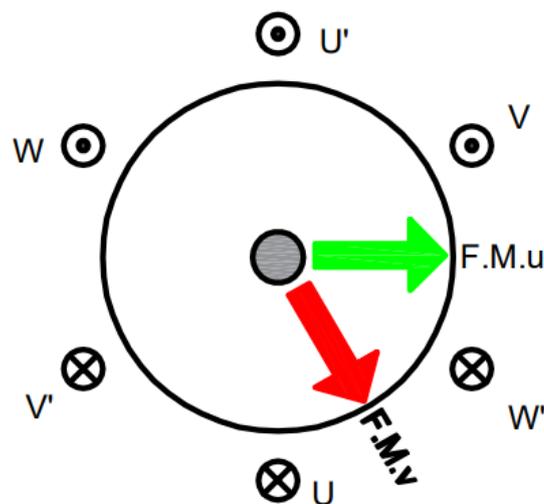


Figura 2.11 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema estrella-c

Visualizando la Figura 2.11, la f.m.m. total generada por el estátor será:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{F_{cc}} &= F_M \cdot e^{0j} + F_M \cdot e^{-\frac{\pi}{3}j} = \sqrt{3} \cdot F_M \cdot e^{-\frac{\pi}{6}j} = \sqrt{3} \cdot C_F \cdot I_U \\ &= \sqrt{3} \cdot C_F \cdot I_{cc}\end{aligned}\quad (2.27)$$

El equivalente entre CC y AC a la hora de generar la misma fuerza magnetomotriz, igualando estas fuerzas se obtendrán las ecuaciones (2.28) y (2.29):

$$\overrightarrow{F_{cc}} = \overrightarrow{F_{ac}} = \sqrt{3} \cdot C_F \cdot I_{cc} = \frac{3}{\sqrt{2}} C_F \cdot \overrightarrow{I_{ac\ eq}} \quad (2.28)$$

$$\overrightarrow{I_{ac\ eq}} = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot I_{cc} \quad (2.29)$$

2.2.4. Conexión estrella - d

Tal y como se muestra en la Figura 2.12 Conexión estrella-d, el estátor del freno estará conectado en estrella y se alimentará en corriente continua conectando las entradas U y V/W, poniendo las bobinas V y W en paralelo.

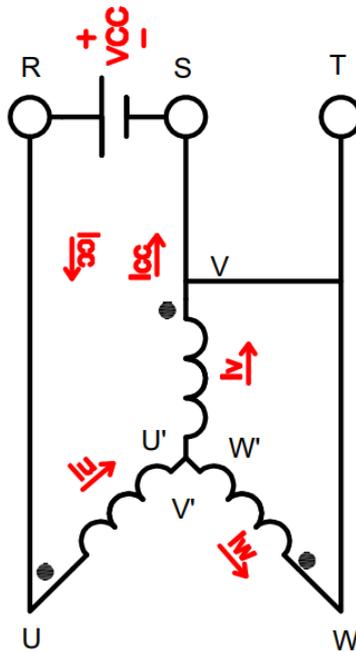


Figura 2.12 Conexión estrella-d

Debido que estamos en CC, las bobinas no tienen valor inductivo, pero sí resistivo. Obteniendo la Figura 2.13 Circuito equivalente estrella-d:

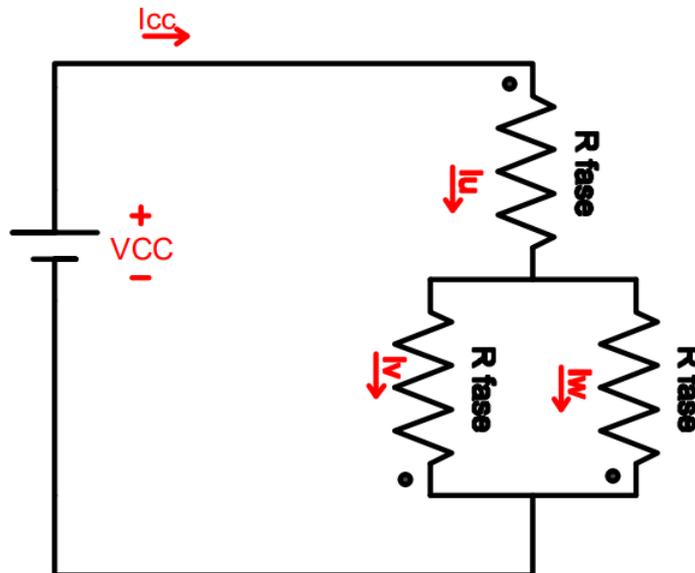


Figura 2.13 Circuito equivalente estrella-d

Mediante esta conexión la corriente que circulará por el estátor será:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_{cc}} = \frac{V_{cc}}{R_f + \frac{R_f}{2}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_{cc}}{R_f} \quad (2.30)$$

$$\frac{3}{2} \cdot I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_f} \quad (2.31)$$

Dado que la bobina U está en serie con las bobinas en paralelo V y W y suponemos sus resistencias iguales, la corriente que circulará por ellas será:

$$I_u = I_{cc} \quad (2.32)$$

$$I_v = I_w = \frac{I_u}{2} \quad (2.33)$$

Por lo tanto, recordando las ecuaciones de la fuerza magnetomotriz, la f.m.m. generada por cada bobinado será según las ecuaciones (2.34), (2.35) y (2.36):

$$\vec{F}_U = C_F \cdot I_U = \vec{F}_M \quad (2.34)$$

Como:

$$I_v = \frac{I_u}{2} \quad (2.35)$$

$$\vec{F}_v = -\frac{\vec{F}_M}{2} \quad (2.36)$$

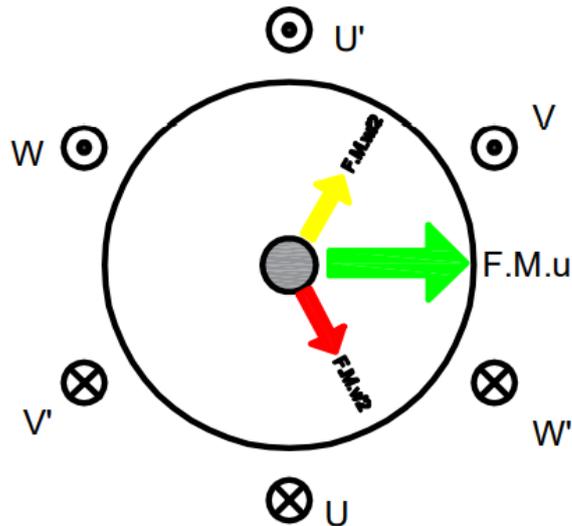


Figura 2.14 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema estrella-d

Visualizando la Figura 2.14, la f.m.m. total generada por el estátor será tal y como se muestra en la ecuación:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{cc} &= F_M \cdot e^{0j} + \frac{F_M}{2} \cdot e^{-\frac{\pi}{3}j} + \frac{F_M}{2} \cdot e^{\frac{\pi}{3}j} = \\ 1,5 \cdot F_M \cdot e^{0j} &= 1,5 \cdot C_F \cdot I_U = 1,5 \cdot C_F \cdot I_{cc} \end{aligned} \quad (2.37)$$

El equivalente entre CC y AC a la hora de generar la misma fuerza magnetomotriz, igualando estas fuerzas será:

$$\vec{F}_{cc} = \vec{F}_{ac} = 1,5 \cdot C_F \cdot I_{cc} = \frac{3}{\sqrt{2}} C_F \cdot \vec{I}_{ac\ eq} \quad (2.38)$$

$$\vec{I}_{ac\ eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_{cc} \quad (2.39)$$

2.2.5. Conexión serie

Tal y como se muestra en la Figura 2.15 Conexión serie , el estátor del freno estará conectado en serie y se alimentará en corriente continua conectando las entradas U y V, poniendo las bobinas en serie.

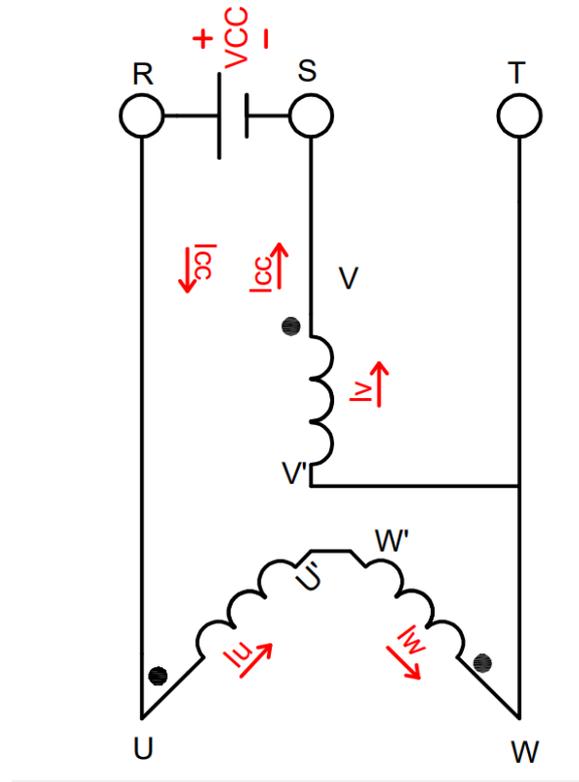


Figura 2.15 Conexión serie

Debido que estamos en CC, las bobinas no tienen valor inductivo, pero sí resistivo. Obteniendo la Figura 2.16 Circuito equivalente serie:

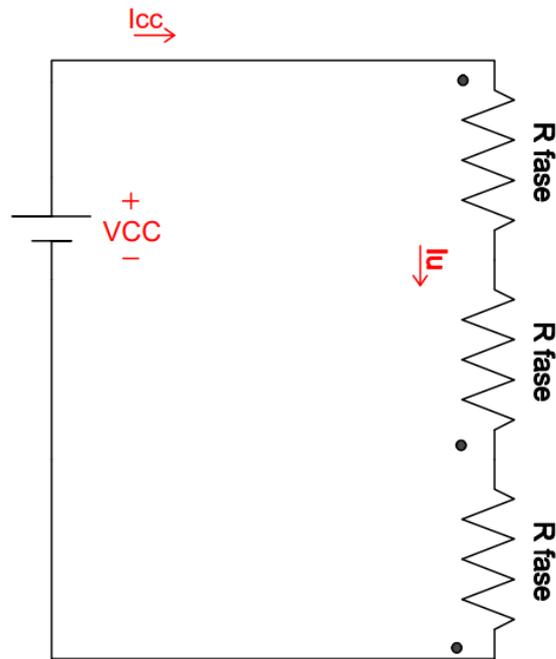


Figura 2.16 Circuito equivalente serie

Mediante esta conexión la corriente que circulará por el estátor será:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_{cc}} = \frac{V_{cc}}{3R_f} = \frac{1}{3} \cdot \frac{V_{cc}}{R_f} \quad (2.40)$$

Dado que la bobina U está en serie con las bobinas V y W y suponemos sus resistencias iguales, la corriente que circulará por ellas será:

$$I_v = I_w = I_u = I_{cc} \quad (2.41)$$

Por lo tanto, recordando las ecuaciones de la fuerza magnetomotriz y el criterio de los puntos homólogos, la f.m.m. generada por cada bobinado será según las ecuaciones (2.42), (2.43) y (2.44):

$$\vec{F}_U = C_F \cdot I_U = \vec{F}_M \quad (2.42)$$

Como:

$$I_V = I_W = I_u \quad (2.43)$$

$$-\vec{F}_V = -\vec{F}_W = \vec{F}_U \quad (2.44)$$

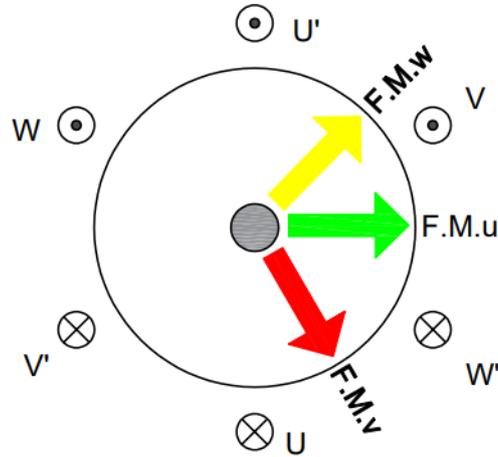


Figura 2.17 Posición de las fuerzas magnetomotrices según el esquema serie

Visualizando la Figura 2.17, la f.m.m. total generada por el estator será según la ecuación:

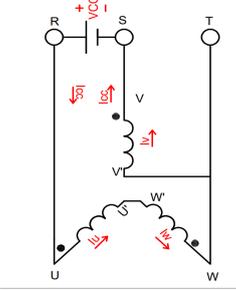
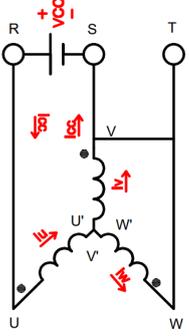
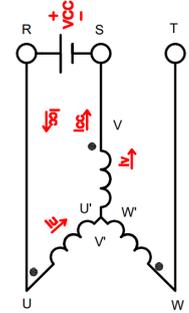
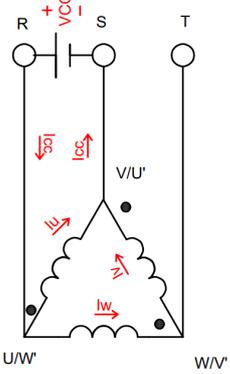
$$\begin{aligned} \vec{F}_{cc} &= F_M \cdot e^{0j} + F_M \cdot e^{-\frac{\pi}{3}j} + F_M \cdot e^{\frac{\pi}{3}j} = 2 \cdot F_M \cdot e^{0j} \\ &= 2 \cdot C_F \cdot I_U = 2 \cdot C_F \cdot I_{cc} \end{aligned} \quad (2.45)$$

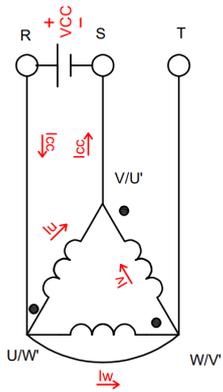
El equivalente entre CC y AC a la hora de generar la misma fuerza magnetomotriz, igualando estas fuerzas será:

$$\vec{F}_{cc} = \vec{F}_{ac} = 2 \cdot C_F \cdot I_{cc} = \frac{3}{\sqrt{2}} C_F \cdot \vec{I}_{ac\ eq} \quad (2.46)$$

$$\vec{I}_{ac\ eq} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot I_{cc} \quad (2.47)$$

En la siguiente tabla quedan resumidas las corrientes en función de las conexiones, cabe destacar que la conexión serie será la utilizada en este estudio ya que es la que mayores prestaciones otorga:

Conexión	$\overrightarrow{I_{ac\ eq}}$	Esquema
Serie	$\overrightarrow{I_{ac\ eq}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot I_{cc}$	
Estrella-d	$\overrightarrow{I_{ac\ eq}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_{cc}$	
Estrella-c	$\overrightarrow{I_{ac\ eq}} = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot I_{cc}$	
Triángulo-b	$\overrightarrow{I_{ac\ eq}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot I_{cc}$	

<p>Triángulo-a</p>	$\vec{I}_{ac eq} = \frac{\sqrt{6}}{6} \cdot I_{cc}$	
--------------------	---	---

2.3. CIRCUITO ELÉCTRICO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

En nuestra máquina motora, ya que trabaja como cualquier máquina asíncrona su circuito eléctrico equivalente será según la Figura 2.18:

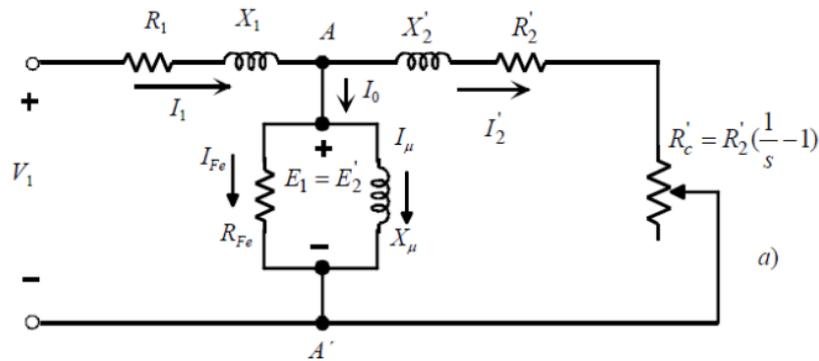


Figura 2.18 Circuito equivalente de una máquina asíncrona; Máquinas eléctricas 5ta Edición; Jesús Fraile Mora; Página 275

Y su ecuación del par será según la ecuación (2.48):

$$T = \frac{m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot V_{th_M}^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \left[\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2')^2 \right]} = \frac{m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_{2M}^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60}} \quad (2.48)$$

Sin embargo, en una máquina asíncrona alimentada con corriente continua en el estátor, no se puede emplear el circuito equivalente anterior.

Al alimentar en corriente continua, es creado un campo fijo en el espacio y constante en el tiempo. No obstante, el rotor está girando debido a la máquina motriz, sometiendo al bobinado del rotor a un campo magnético variable.

Este efecto si fuera observado desde el rotor, sería equiparable a que el rotor estuviera bloqueado y el estátor generara un campo magnético giratorio, provocando un deslizamiento unitario, tal y como se puede ver en la ecuación (2.49):

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Como $n = 0$

$$s = \frac{n_1}{n_1} = 1 \quad (2.49)$$

El análisis del circuito equivalente en el frenado dinámico se puede realizar con el circuito original y contemplando que el campo magnético creado por corriente continua es semejante a un campo magnético creado mediante corriente alterna, tal y como se vio en el apartado 2.2. Lo cual nos permite sustituir el circuito del devanado primario por una fuente de corriente alterna de valor eficaz constante, equivalente a la inyectada real en continua, debido a que estamos alimentando la máquina a corriente constante, en vez de con una fuente de tensión constante, tal y como se puede ver en la Figura 2.19

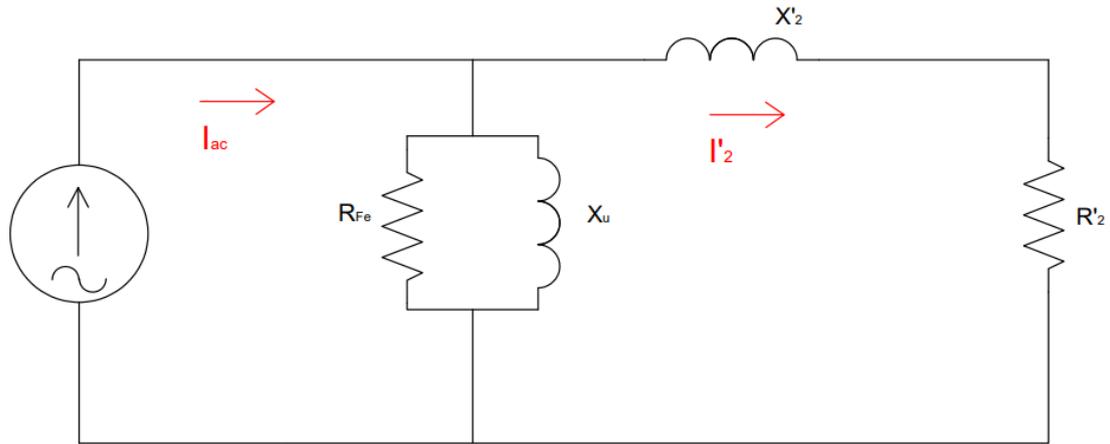


Figura 2.19 Circuito equivalente en Frenado Dinámico

Debido a que la corriente del estátor es conocida y constante, ya que será la variable de control, las impedancias del devanado han podido ser obviadas ya que tal y como se vio en la ecuación (2.48), el par motor depende de la corriente en el rotor y este puede ser obtenido mediante un divisor de corrientes tal y como se muestra en la ecuación (2.50)

$$I'_2 = \left| I_{ac} \cdot \frac{R_{Fe} + j \cdot X_{\mu}}{(R_{Fe} + j \cdot X_{\mu}) + (R'_2 + j \cdot X'_2)} \right| \quad (2.50)$$

2.4. PAR ELÉCTRICO EN EL FRENADO DÍNAMICO

Para el cálculo del par se utilizará solamente el módulo de la corriente, de ahí que en la ecuación (2.50) se calcule el módulo.

Una vez obtenida la corriente, solo faltaría calcular el par ejercido por el rotor que gira a la misma velocidad que la máquina motora, tal y como se puede ver en la ecuación (2.51)

$$T = \frac{m_1 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60}} \quad (2.51)$$

Por último, solo faltaría escoger la conexión deseada para alimentar al estátor con corriente continua de forma que podamos inyectar la corriente continua necesaria para obtener el par deseado. En nuestro caso será la conexión serie en el estátor.

3. ENSAYOS DE VACÍO Y CORTOCIRCUITO

Una vez obtenidas las ecuaciones de nuestro motor, deben ser descubiertas las variables constructivas del motor tales como las pérdidas en el hierro y mecánicas y sus valores resistivos e inductivos. Para ello, se realizarán los ensayos experimentales de vacío o de rotor libre y de cortocircuito o rotor bloqueado.

Antes de continuar con los ensayos, se anotará la placa de características de nuestros motores:

Máquina asíncrona trifásica			
Marca	VEN Motors Thurn (Pequeño)	VEN Motors Thurn	EDIBON
Tipo	Motor asíncrono	Motor asíncrono	Motor asíncrono
Clase	NEMA-A	NEMA-A	NEMA-A
Tensión asignada (V)	230	230	230
Corriente asignada (A)	2,8	3,55	3,6
Potencia asignada (W)	550	550	550
Velocidad (rpm)	1400	695	695
Frecuencia (Hz)	50	50	50
$\cos \varphi$	0,69	0,6	
Conexión	Triángulo	Triángulo	Triángulo

Para que los ensayos sean lo más precisos posibles, se utilizará en nuestro aparato de medida, Power Fluke, una bobina amperimétrica de 50 espiras para amplificar los valores por 50 de forma que los datos sean más precisos, anotándose en una tabla de medidas. Una vez obtenidos los datos, se dividirá la corriente y la potencia entre 50 de forma que obtengamos los valores reales, anotándose en otra tabla de medidas contigua a la anterior. Para el cálculo de las potencias se utilizará el método Aaron.

3.1. OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA R1 DEL ESTÁTOR

Antes de operar con los ensayos de vacío y cortocircuito, es necesario conocer la resistencia del estátor “R1” para seguir avanzando. Sin embargo, obtener este dato resultará sencillo. Debido a que estamos realizando un estudio donde estamos frenando el rotor mediante corriente continua y como se ha podido ver, se han formulado ecuaciones en el estátor con corriente continua de donde es posible obtener las resistencias del estátor conocidas la corriente y tensión.

En este caso se inyectará CC en dos devanados del estátor conectado en estrella tal y como se ve en la Figura 3.4. El valor resistivo obtenido en la ecuación (3.1), se debería incrementar un 15 %, ya que se debe tener en cuenta que en corriente alterna aparece el efecto coronario/skin donde la corriente no llega a ocupar la totalidad del área del conductor y el incremento resistivo a medida que la temperatura aumenta, ya que el ensayo se suele realizar en frío.

En este estudio se omitirá este incremento, ya que se ha observado que las curvas de Par son más semejantes al obtenido desde la placa de características, ya que el motor no se encontraba frío, porque eran tomadas las muestras tras el ensayo de vacío como se puede ver en las Figuras: Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3.

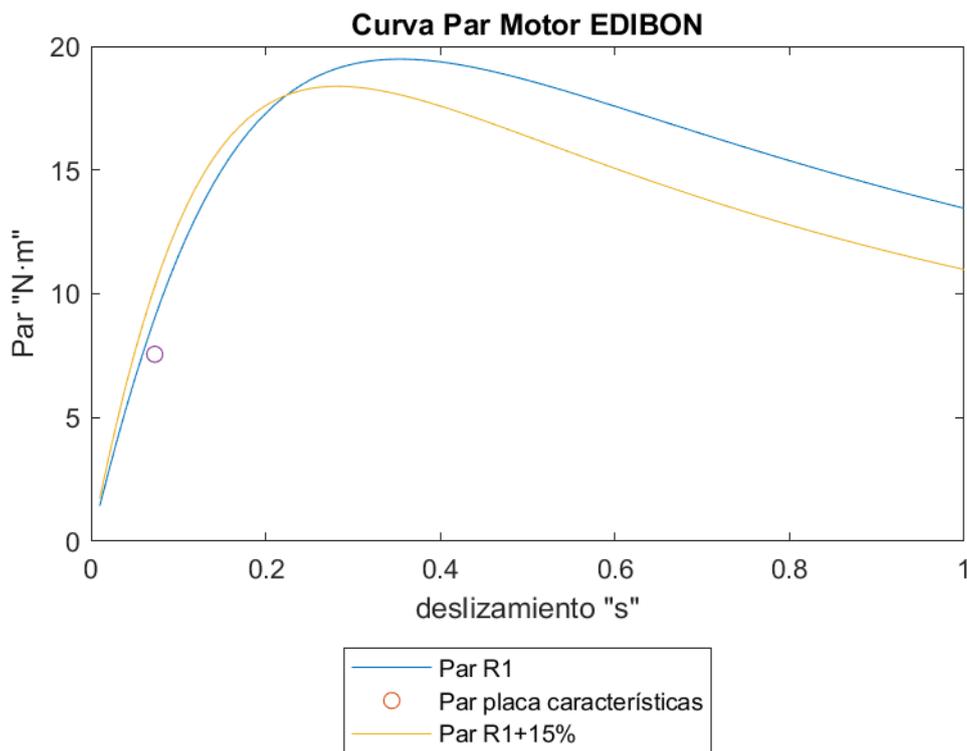


Figura 3.1 Comparación entre R_1 y $R_1 + 15\%$ en el motor Edibon

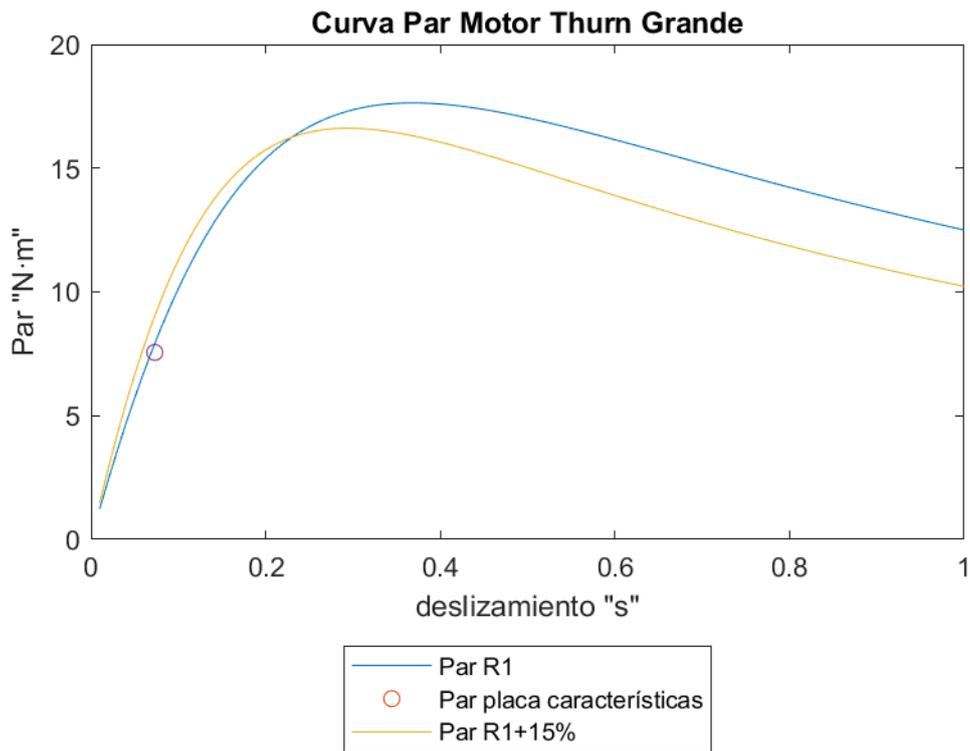


Figura 3.2 Comparación entre R_1 y $R_1 + 15\%$ en el motor Thurn Grande

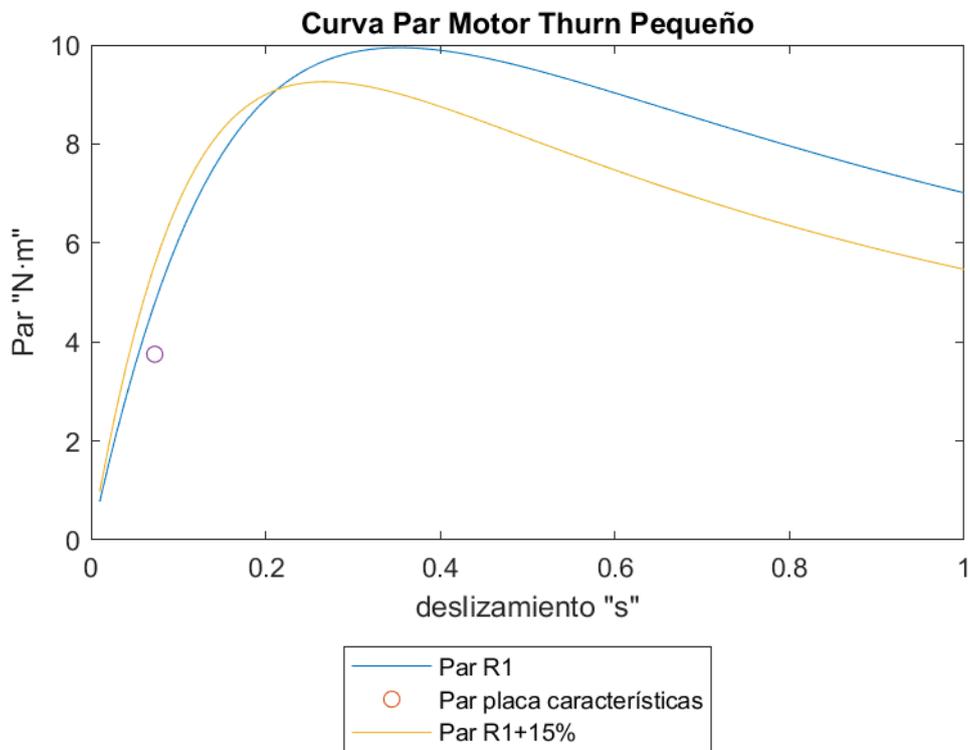


Figura 3.3 Comparación entre R_1 y $R_1 + 15\%$ en el motor Thurn Pequeño

Aun así, serán anotadas para seguir el criterio marcado según la norma UNE-EN 60034-2-1.

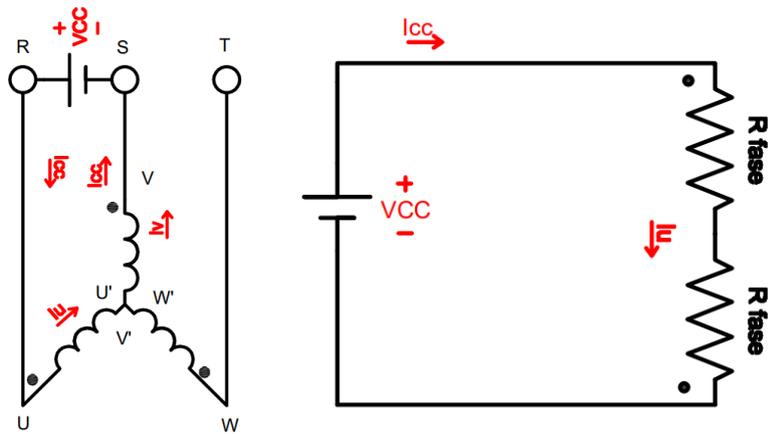


Figura 3.4 Conexión para obtener R1

$$2 \cdot R_1 = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (3.1)$$

$$1,15 \cdot R_1 = R_1 \text{ (en c. a)}$$

Motor	Vdc (V)	Idc (A)	R ₁ (Ω)	R ₁ x 1,15% (Ω)
VEN Motors Thurn (M.Pequeño)	46,75	1,584	14,7569444	16,9704861
VEN Motors Thurn	55,16	1,994	13,8314945	15,9062187
EDIBON	49,56	1,994	12,4272818	14,2913741

3.2. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

En el ensayo de cortocircuito el rotor es bloqueado y al estátor se aplica una tensión ascendente hasta alcanzar la corriente que circularía en régimen nominal. En este ensayo se anotará: P_{cc} (potencia consumida), I_{cc} (corriente de cortocircuito/nominal) y V_{cc} (tensión de cortocircuito).

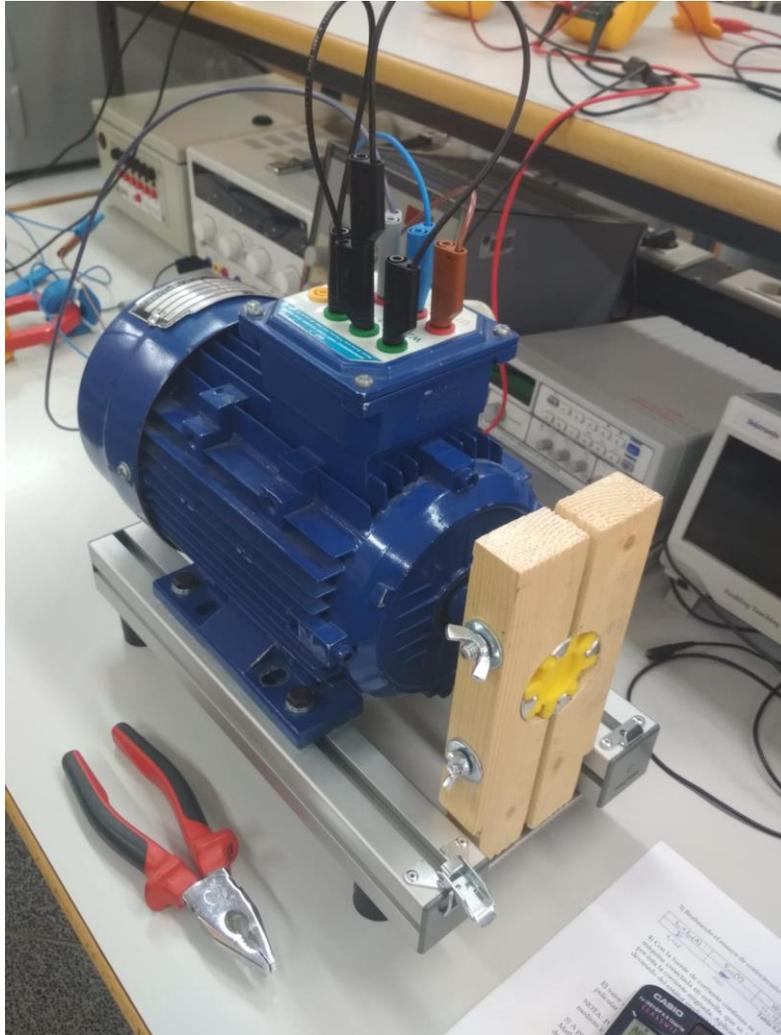


Figura 3.5 Ensayo de cortocircuito

VEN Motors Thurn (Pequeño)

$I_{cc} = I_{1n}$ (A)	$V_{cc,L}$ (V)	W_1 (kW)	W_2 (kW)	P_{cc} (kW)
141,9	59,45	1,89	8,16	10,05

$I_{cc} = I_{1n}$ (A)	$V_{cc,L}$ (V)	W_1 (W)	W_2 (W)	P_{cc} (W)
2,838	59,45	37,8	163,2	201

VEN Motors Thurn

$I_{cc} = I_{1n}$ (A)	$V_{cc,L}$ (V)	W_1 (kW)	W_2 (kW)	P_{cc} (kW)
182,6	83,85	2,54	14,38	16,92

$I_{cc} = I_{1n}$ (A)	$V_{cc,L}$ (V)	W_1 (W)	W_2 (W)	P_{cc} (W)
3,652	83,85	50,8	287,6	338,4

EDIBON

$I_{cc} = I_{1n}$ (A)	$V_{cc,L}$ (V)	W_1 (kW)	W_2 (kW)	P_{cc} (kW)
183,86	77,35	2,1	13,26	15,36

$I_{cc} = I_{1n}$ (A)	$V_{cc,L}$ (V)	W_1 (W)	W_2 (W)	P_{cc} (W)
3,6772	77,35	42	265,2	307,2

En este caso del rotor bloqueado, $n = 0$ y al mismo tiempo $s = 1$, consiguiendo $R'_c = 0$ por lo que el circuito equivalente (despreciando la rama paralela) queda como la Figura 3.6

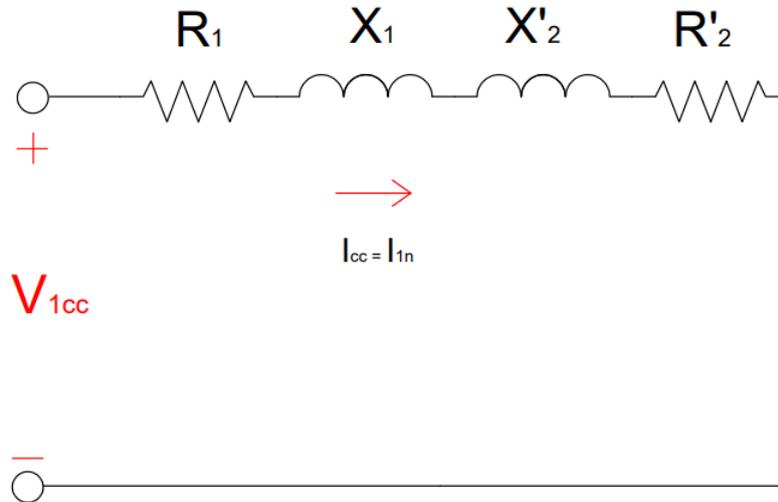


Figura 3.6 Circuito equivalente en ensayo de cortocircuito

Teniendo en cuenta la Figura 3.6, los componentes del circuito pueden ser calculados según las ecuaciones (3.2), (3.3) y (3.4):

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot V_{1cc} \cdot I_{1n}} \quad (3.2)$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = \cos \varphi_{cc} \cdot \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \quad (3.3)$$

Debido a que los motores son NEMA A, las inductancias de dispersión se repartirán en un 50-50 respecto de la inductancia de cortocircuito:

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = \sin \varphi_{cc} \cdot \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \quad (3.4)$$

Motor Thurn Pequeño

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{201}{3 \cdot 59,45 \cdot 1,6385} = 0,687 \rightarrow \varphi_{cc} = 46,542^\circ$$

$$R'_2 = \cos 46,542 \cdot \frac{59,45}{1,6385} - 14,76 = 10,2 \Omega$$

$$X'_2 = X_1 = \frac{\sin 46,542 \cdot \frac{59,45}{1,6385}}{2} = 13,17 j \Omega$$

Motor Thurn Grande

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{338,4}{3 \cdot 83,85 \cdot 2,11} = 0,638 \rightarrow \varphi_{cc} = 50,36^\circ$$

$$R'_2 = \cos 50,36 \cdot \frac{83,85}{2,11} - 13,83 = 11,54 \Omega$$

$$X'_2 = X_1 = \frac{\sin 50,36 \cdot \frac{83,85}{2,11}}{2} = 15,31 j \Omega$$

EDIBON

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{307,2}{3 \cdot 77,35 \cdot 2,12} = 0,624 \rightarrow \varphi_{cc} = 51,42^\circ$$

$$R'_2 = \cos 51,42 \cdot \frac{77,35}{2,12} - 12,42 = 10,29 \Omega$$

$$X'_2 = X_1 = \frac{\sin 51,42 \cdot \frac{77,35}{2,12}}{2} = 14,24 j \Omega$$

Los resultados obtenidos han sido comprendidos en la siguiente tabla:

	R'2 (Ω)	X1 = X'2 (j Ω)
Thurn Pequeño	10,2	13,169
Thurn Grande	11,54	15,31
EDIBON	10,3	14,24

3.3. ENSAYO DE VACÍO

Para obtener las pérdidas en el hierro, y de ahí su impedancia magnetizante, y las pérdidas mecánicas, se aplicará al estátor de la máquina asíncrona conectada en triángulo su tensión nominal de forma gradual, para evitar el pico de corriente en el arranque. Una vez alcanzada la tensión asignada, se irá disminuyendo y a la vez anotando los valores P_0 (potencia consumida) e I_0 (corriente de vacío).

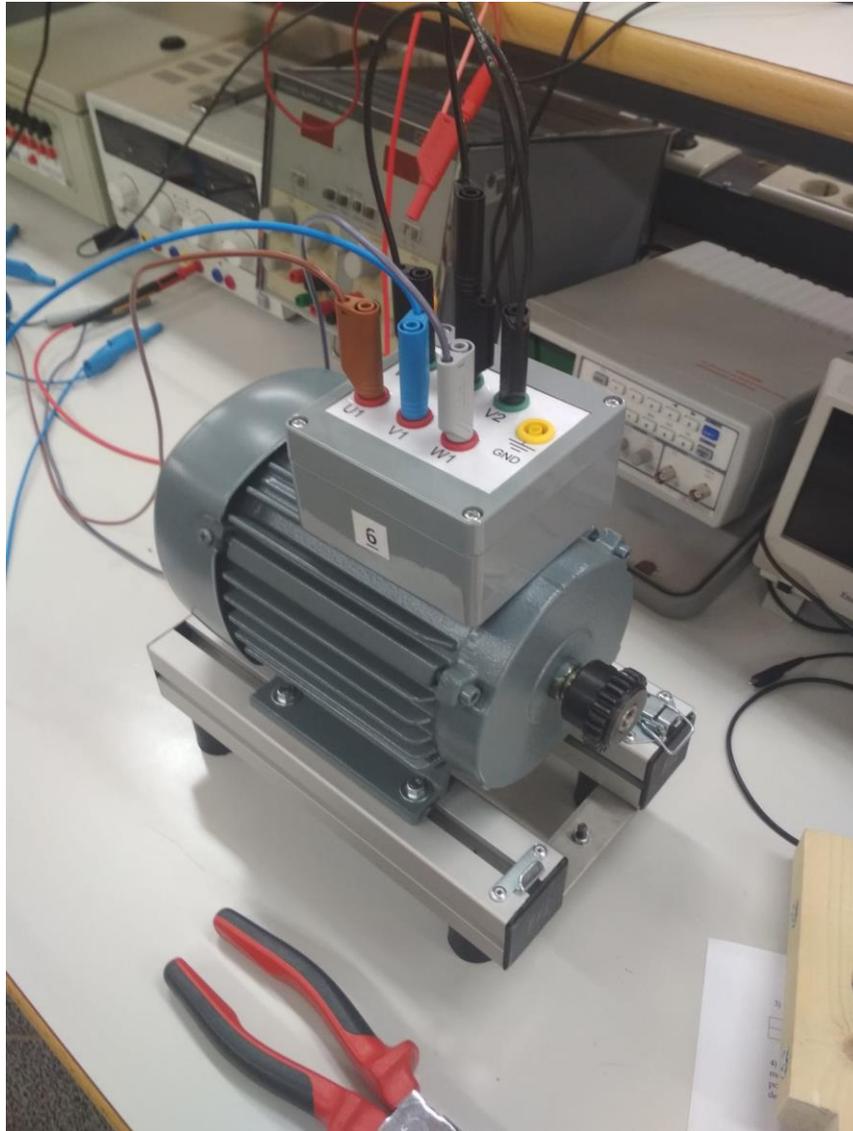


Figura 3.7 Ensayo de vacío

Despreciando las pérdidas en el cobre del rotor, ya que la corriente en él es prácticamente despreciable, se obtiene la ecuación (3.5):

$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{cu1}$$

$$P_0 - P_{cu1} = P_{Fe} + P_m$$

$$P_0 - 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 = P_{Fe} + P_m \quad (3.5)$$

Según la norma UNE-EN 60034-2-1, punto 6.1.3.2.4. La realización del ensayo en vacío debe realizarse por dos partes:

- Del [60 – 30] % de la tensión nominal para conocer las pérdidas mecánicas. Para su cálculo se determinará el corte de la recta a cero voltios, del cual obtendremos la potencia de pérdidas mecánicas.
- Del [110 – 90] % de la tensión nominal para conocer las pérdidas en el hierro. Para su cálculo se deberá de conocer la caída de tensión en el hierro para más o menos su tensión nominal y conocer que potencia es obtenida dentro de la curva y restarle las pérdidas mecánicas.

Debido a que existen pequeños desequilibrios en la fuente de alimentación trifásica, se analizarán las tres corrientes de alimentación, las dos tensiones de red y se ponderarán a la hora de realizar los cálculos.

Motor Thurn Pequeño

Ensayo de Pérdidas en el Hierro						
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)
250,3	250	182,7	177,9	183,8	-14,8	29,5
245,6	245,3	170,1	165,7	171,3	-13,4	27,1
235,4	234,9	147,1	143,4	148,1	-11,66	22,05
225,7	225,7	126,6	123	128,6	-10,03	18,08
215,7	215,3	109,6	107,2	110,4	-8,48	14,64
205,7	205,7	95,1	91,7	95,9	-7,14	11,9

Motor Thurn Pequeño

Ensayo de Pérdidas en el Hierro									
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)	$W_1 + W_2$ (W)	P_{cu1} (W)	$P_{Fe} + P_m$ (W)
250,3	250	3,654	3,558	3,676	-0,296	0,59	294,0	194,37	99,63
245,6	245,3	3,402	3,314	3,426	-0,268	0,542	274,0	168,65	105,35
235,4	234,9	2,942	2,868	2,962	-0,2332	0,441	207,8	126,17	81,63
225,7	225,7	2,532	2,46	2,572	-0,2006	0,3616	161,0	93,80	67,20
215,7	215,3	2,192	2,144	2,208	-0,1696	0,2928	123,2	70,21	52,99
205,7	205,7	1,902	1,834	1,918	-0,1428	0,238	95,2	52,41	42,79

Motor Thurn Pequeño

Ensayo de Pérdidas Mecánicas						
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W₁ (kW)	W₂ (kW)
140,7	140,6	47,2	44,4	47,4	-2,34	3,93
130,7	130,7	42,9	40,9	43,7	-2,04	3,42
121,2	121,2	39,4	37,3	40,3	-1,71	2,94
110,9	111,1	35,6	33,81	36,4	-1,41	2,45
100,8	101,1	32,51	30,2	33,07	-1,115	1,998
90,6	90,9	29,01	26,66	29,65	-0,865	1,629
81	81,3	25,62	24	26,37	-0,671	1,337
70,4	70,8	21,94	20,99	23,01	-0,486	1,066

Motor Thurn Pequeño

Ensayo de Pérdidas Mecánicas									
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W₁ (kW)	W₂ (kW)	W₁ + W₂ (W)	P_{cu1} (W)	P_{Fe} + P_m (W)
140,7	140,6	0,944	0,888	0,948	-0,0468	0,0786	31,8	12,65	19,15
130,7	130,7	0,858	0,818	0,874	-0,0408	0,0684	27,6	10,66	16,94
121,2	121,2	0,788	0,746	0,806	-0,0342	0,0588	24,6	8,98	15,62
110,9	111,1	0,712	0,6762	0,728	-0,0282	0,049	20,8	7,34	13,46
100,8	101,1	0,6502	0,604	0,6614	-0,0223	0,03996	17,66	6,02	11,64
90,6	90,9	0,5802	0,5332	0,593	-0,0173	0,03258	15,28	4,77	10,51
81	81,3	0,5124	0,48	0,5274	-0,01342	0,02674	13,32	3,79	9,53
70,4	70,8	0,4388	0,4198	0,4602	-0,00972	0,02132	11,6	2,85	8,75

Motor Thurn Grande

Ensayo de Pérdidas en el Hierro						
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)
250,7	250,5	217,3	212	220,2	-18,1	35,4
245,3	245,5	205,8	201,4	209,4	-17	32,9
235,9	235,6	187,8	183,4	190,6	-15,2	28,4
225,7	225,7	171	167,2	174,2	-13,6	24,7
215,8	215,8	157,1	154,1	159,9	-12,17	21,54
205,6	205,3	145	141,5	146,3	-10,63	18,63

Motor Thurn Grande

Ensayo de Pérdidas en el Hierro									
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)	$W_1 + W_2$ (W)	P_{cu1} (W)	$P_{Fe} + P_m$ (W)
250,7	250,5	4,346	4,24	4,404	-0,362	0,708	346	276,68	69,32
245,3	245,5	4,116	4,028	4,188	-0,34	0,658	318	249,35	68,65
235,9	235,6	3,756	3,668	3,812	-0,304	0,568	264	206,99	57,01
225,7	225,7	3,42	3,344	3,484	-0,272	0,494	222	172,20	49,80
215,8	215,8	3,142	3,082	3,198	-0,2434	0,4308	187,4	145,55	41,85
205,6	205,3	2,9	2,83	2,926	-0,2126	0,3726	160	122,84	37,16

Motor Thurn Grande

Ensayo de Pérdidas Mecánicas						
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)
140,9	140,9	91,9	89	93,2	-4,56	8,14
130,7	130,6	84,6	82,1	85,2	-3,88	6,99
120,7	120,9	77,9	75,3	79	-3,29	5,95
110,6	110,8	70,7	68,8	71,9	-2,73	5
100,8	100,9	64,4	62	64,9	-2,18	4,12
90,6	90,8	57,4	55,7	58,4	-1,74	3,38
80,6	80,9	50,6	49,4	52,2	-1,35	2,74
70,7	71,3	44,7	43	46,2	-1,002	2,164

Motor Thurn Grande

Ensayo de Pérdidas Mecánicas									
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)	$W_1 + W_2$ (W)	P_{Cu1} (W)	$P_{Fe} + P_m$ (W)
140,9	140,9	1,838	1,78	1,864	-0,0912	0,1628	71,6	49,27	22,33
130,7	130,6	1,692	1,642	1,704	-0,0776	0,1398	62,2	41,85	20,35
120,7	120,9	1,558	1,506	1,58	-0,0658	0,119	53,2	35,36	17,84
110,6	110,8	1,414	1,376	1,438	-0,0546	0,1	45,4	29,30	16,10
100,8	100,9	1,288	1,24	1,298	-0,0436	0,0824	38,8	24,00	14,80
90,6	90,8	1,148	1,114	1,168	-0,0348	0,0676	32,8	19,29	13,51
80,6	80,9	1,012	0,988	1,044	-0,027	0,0548	27,8	15,19	12,61
70,7	71,3	0,894	0,86	0,924	-0,02004	0,04328	23,24	11,76	11,48

EDIBON

Ensayo de Pérdidas en el Hierro						
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W₁ (kW)	W₂ (kW)
250,2	250,5	220,7	213,4	221,5	-16,9	36,2
245,1	245,3	208,3	201,7	209,2	-15,8	33,3
235,5	235,9	188	181,7	188,8	-13,9	28,7
225,3	225,5	168,8	164	169,9	-12,3	24,5
215,4	215,5	153,5	149,2	154,4	-10,82	21,24
205,8	205,7	140,7	136,3	141	-9,52	18,43

EDIBON

Ensayo de Pérdidas en el Hierro									
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	W₁ (kW)	W₂ (kW)	W₁ + W₂ (W)	P_{cu1} (W)	P_{Fe} + P_m (W)
250,2	250,5	4,414	4,268	4,43	-0,338	0,724	386	281,89	104,11
245,1	245,3	4,166	4,034	4,184	-0,316	0,666	350	251,46	98,54
235,5	235,9	3,76	3,634	3,776	-0,278	0,574	296	204,56	91,44
225,3	225,5	3,376	3,28	3,398	-0,246	0,49	244	165,73	78,27
215,4	215,5	3,07	2,984	3,088	-0,2164	0,4248	208,4	137,02	71,38
205,8	205,7	2,814	2,726	2,82	-0,1904	0,3686	178,2	114,54	63,66

EDIBON

Ensayo de Pérdidas Mecánicas						
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_s (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)
140,1	140,2	85,4	81,8	85,3	-3.64	7,76
130,7	130,9	78,8	75,8	79,1	-3.1	6,78
120,3	120,4	71,8	69,1	72,4	-2.53	4,77
111,1	110,8	66,1	63,4	65,8	-2.02	4,88
100,5	100,8	60	56,8	59,7	-1.57	4,06
90,3	90,6	53,4	51,2	53,9	-1.2	3,39
80,7	81	47,8	45,9	48,3	-0.88	2,79
70,6	71,2	42,2	40,5	43,4	-0,605	2,276

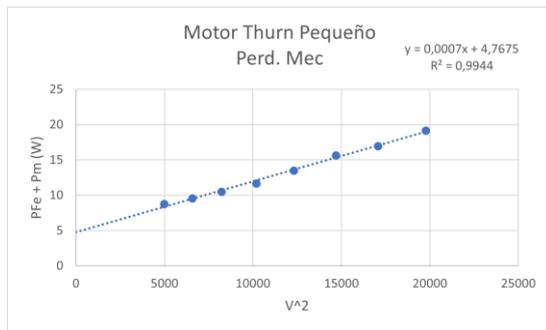
EDIBON

Ensayo de Pérdidas Mecánicas									
V_{RS} (V)	V_{RS} (V)	I_R (A)	I_s (A)	I_T (A)	W_1 (kW)	W_2 (kW)	$W_1 + W_2$ (W)	P_{cu1} (W)	$P_{Fe} + P_m$ (W)
140,1	140,2	1,708	1,636	1,706	-0,0728	0,1552	82,4	41,81	40,59
130,7	130,9	1,576	1,516	1,582	-0,062	0,1356	73,6	35,82	37,78
120,3	120,4	1,436	1,382	1,448	-0,0506	0,0954	44,8	29,84	14,96
111,1	110,8	1,322	1,268	1,316	-0,0404	0,0976	57,2	25,02	32,18
100,5	100,8	1,2	1,136	1,194	-0,0314	0,0812	49,8	20,43	29,37
90,3	90,6	1,068	1,024	1,078	-0,024	0,0678	43,8	16,47	27,33
80,7	81	0,956	0,918	0,966	-0,0176	0,0558	38,2	13,21	24,99
70,6	71,2	0,844	0,81	0,868	-0,0121	0,04552	33,42	10,43	22,99

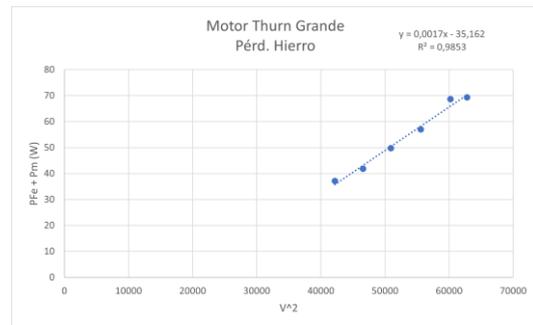
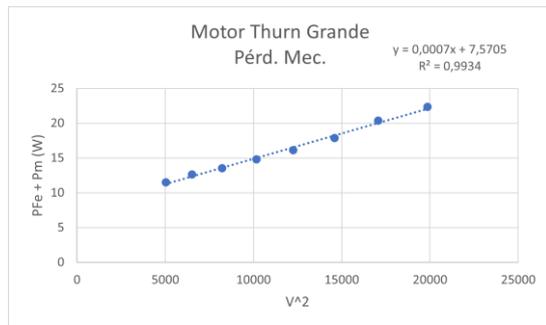
Nótese que para la última tabla existe una fila de valores marcados en rojo ya que no tienen sentido y puede haberse debido a un fallo en el ensayo, por ello serán descartados a la hora de realizar las gráficas.

Una vez obtenidos los valores, se dibujará una gráfica donde se representarán las pérdidas en el hierro y mecánicas en función de la tensión asignada fase-neutro según la ecuación (3.5). Para evitar cometer errores en la extrapolación, en el eje de abscisas se representará el cuadrado de la tensión.

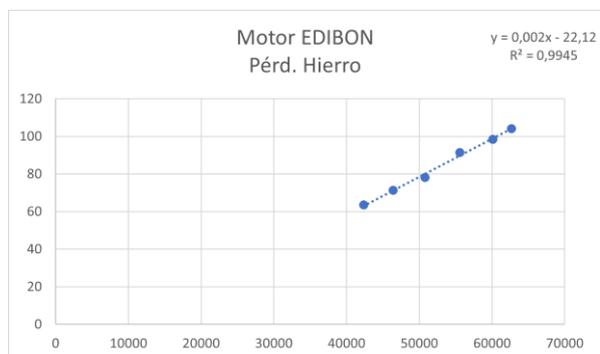
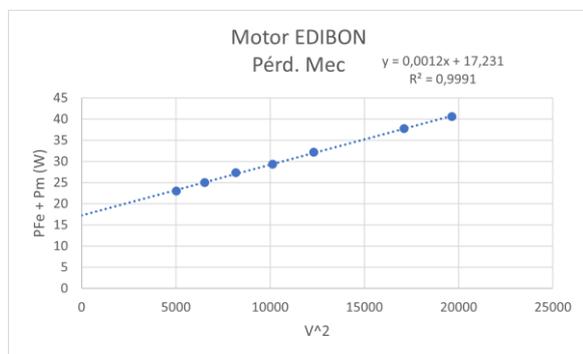
Motor Thurn Pequeño



Motor Thurn Grande



EDIBON



Gracias a las gráficas se puede observar que el punto de corte en el eje Y, que dará las pérdidas mecánicas para cada motor serán:

	Pérdidas mecánicas (W)
Motor Thurn Pequeño	4,7675
Motor Thurn Grande	7,5705
Motor EDIBON	17,231

Para conocer las pérdidas en el hierro, tal y como se explicó anteriormente, debemos de operar con la caída de tensión en el hierro U_i y no la de entrada V_{1n} . Por ello se deberán de realizar los cálculos mostrados en la ecuación (3.6) para cada motor, según se muestra en la Figura 3.8.

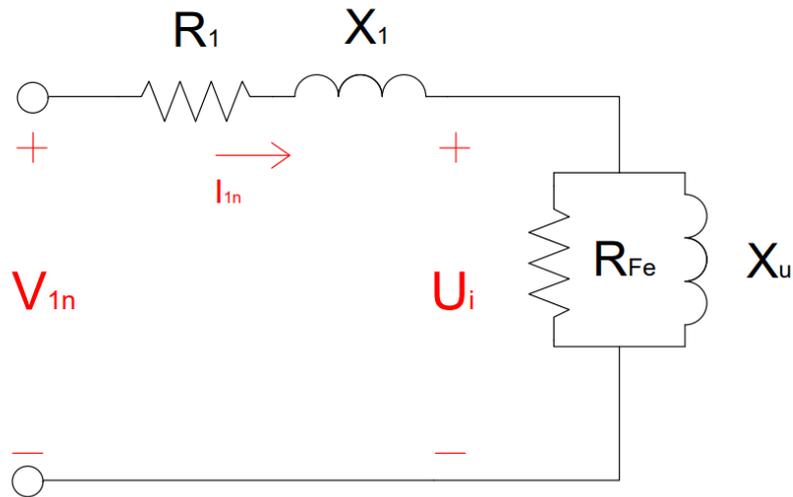


Figura 3.8 Circuito equivalente del ensayo en vacío

$$U_i = \vec{V}_{1n} + \vec{I}_{1n} \cdot (R_1 + j X_1) \quad (3.6)$$

La única incógnita es conocer el ángulo de fase de la tensión y la corriente, pero si sabemos que colocando \vec{V}_{1n} como origen de fases y conociendo la potencia suministrada al motor tal y como se muestra en la ecuación (3.7). El ángulo de \vec{I}_{1n} será el mismo que φ_0 conjugado.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot V_{1n} \cdot I_{1n}} \quad (3.7)$$

En la ecuación (3.6) U_i carece de vector porque solo nos interesa el módulo de su tensión.

Motor Thurn Pequeño

$$\cos \varphi_0 = \frac{207,8}{3 \cdot 235,15 \cdot 1,688} = 0,1745 \rightarrow \varphi_0 = 79,95^\circ$$

$$U_i = 235,15 \cdot e^{0j} + 1,688 \cdot e^{79,95j} \cdot (14,76 + j \cdot 13,17) = 209,9 \text{ V}$$

Motor Thurn Grande

$$\cos \varphi_0 = \frac{264}{3 \cdot 235,75 \cdot 2,1623} = 0,1726 \rightarrow \varphi_0 = 80,06^\circ$$

$$U_i = 235,75 \cdot e^{0j} + 2,1623 \cdot e^{80,06j} \cdot (13,83 + j \cdot 15,31) = 199,4 \text{ V}$$

EDIBON

$$\cos \varphi_0 = \frac{296}{3 \cdot 235,7 \cdot 2,1496} = 0,1947 \rightarrow \varphi_0 = 78,77^\circ$$

$$U_i = 235,7 \cdot e^{0j} + 2,1496 \cdot e^{78,77j} \cdot (12,43 + j \cdot 14,29) = 201,5 \text{ V}$$

Los resultados obtenidos quedan resumidos en la siguiente tabla:

	U_i (V)
Motor Thurn Pequeño	209,9
Motor Thurn Grande	199,4
EDIBON	201,5

El siguiente paso será conocer las pérdidas en el hierro para la tensión U_i . Para ello utilizaremos la ecuación de la recta de pérdidas en el hierro obtenida de cada motor y restaremos las pérdidas mecánicas, ya que en la recta están representadas ambas pérdidas.

Motor Thurn Pequeño

$$P_{Fe} + P_m = 0,0032 \cdot V^2 - 93,547 \quad P_{Fe} + P_m = 0,0032 \cdot 209,9^2 - 93,547 = 47,44 \text{ W}$$

$$P_{Fe} = [P_{Fe} + P_m] - P_m \quad P_{Fe} = 47,44 - 4,77 = 42,67 \text{ W}$$

Motor Thurn Grande

$$P_{Fe} + P_m = 0,0017 \cdot V^2 - 35,162 \quad P_{Fe} + P_m = 0,0017 \cdot 199,4^2 - 35,162 = 32,43 \text{ W}$$

$$P_{Fe} = [P_{Fe} + P_m] - P_m \quad P_{Fe} = 32,43 - 7,57 = 24,86 \text{ W}$$

EDIBON

$$P_{Fe} + P_m = 0,002 \cdot V^2 - 22,12 \quad P_{Fe} + P_m = 0,002 \cdot 201,5^2 - 22,12 = 59,08 \text{ W}$$

$$P_{Fe} = [P_{Fe} + P_m] - P_m \quad P_{Fe} = 59,08 - 17,231 = 41,85 \text{ W}$$

Por último, se deberán aplicar las ecuaciones (3.8), (3.9), (3.10), (3.11) y (3.12):

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{3 \cdot U_i \cdot I_{1n}} \quad (3.8)$$

$$I_{Fe} = I_{1n} \cdot \cos \varphi_0 \quad (3.9) \quad I_{\mu} = I_{1n} \cdot \sin \varphi_0 \quad (3.10)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_i}{I_{Fe}} \quad (3.11) \quad X_{\mu} = \frac{U_i}{I_{\mu}} \quad (3.12)$$

Motor Thurn Pequeño

$$\cos \varphi_0 = \frac{42,87}{3 \cdot 209,9 \cdot 1,688} = 0,04014 \rightarrow \varphi_0 = 87,7^\circ$$

$$I_{Fe} = 1,688 \cdot \cos 87,7 = 0,0678 \text{ A} \quad I_\mu = 1,688 \cdot \sin 87,7 = 1,687 \text{ A}$$

$$R_{Fe} = \frac{209,9}{0,0678} = 3097,6 \Omega \quad X_\mu = \frac{209,9}{1,687} = 124,45 \text{ j } \Omega$$

Motor Thurn Grande

$$\cos \varphi_0 = \frac{24,86}{3 \cdot 199,4 \cdot 2,16} = 0,0192 \rightarrow \varphi_0 = 88,9^\circ$$

$$I_{Fe} = 2,16 \cdot \cos 88,9 = 0,0415 \text{ A} \quad I_\mu = 2,16 \cdot \sin 88,9 = 2,162 \text{ A}$$

$$R_{Fe} = \frac{199,4}{0,0415} = 4798,113 \Omega \quad X_\mu = \frac{199,4}{2,162} = 92,23 \text{ j } \Omega$$

EDIBON

$$\cos \varphi_0 = \frac{41,85}{3 \cdot 201,5 \cdot 2,15} = 0,0322 \rightarrow \varphi_0 = 88,15^\circ$$

$$I_{Fe} = 2,15 \cdot \cos 88,15 = 0,069 \text{ A} \quad I_\mu = 2,15 \cdot \sin 88,15 = 2,15 \text{ A}$$

$$R_{Fe} = \frac{201,5}{0,0486} = 2910,312 \Omega \quad X_\mu = \frac{201,5}{2,15} = 93,79 \text{ j } \Omega$$

Los resultados obtenidos quedan resumidos en la siguiente tabla:

	$R_{Fe} (\Omega)$	$X_{\mu} (j \Omega)$
Motor Thurn Pequeño	3097,587	124,45
Motor Thurn Grande	4798,113	92,23
EDIBON	2910,312	93,79

4. CIRCUITO EQUIVALENTE REAL DE LOS MOTORES

Una vez obtenidas las impedancias del circuito equivalente de los motores, serán representadas en el circuito de forma que sea posible trabajar con las ecuaciones.

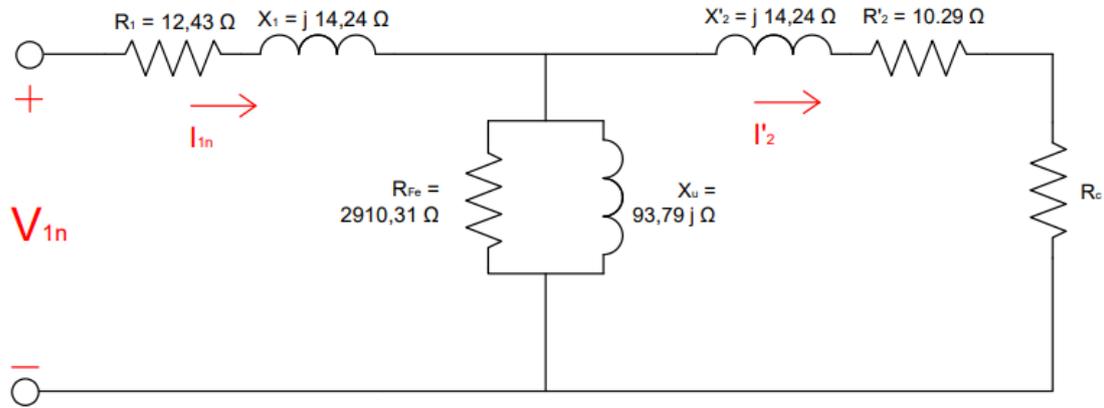


Figura 4.1 Circuito equivalente del Motor EDIBON

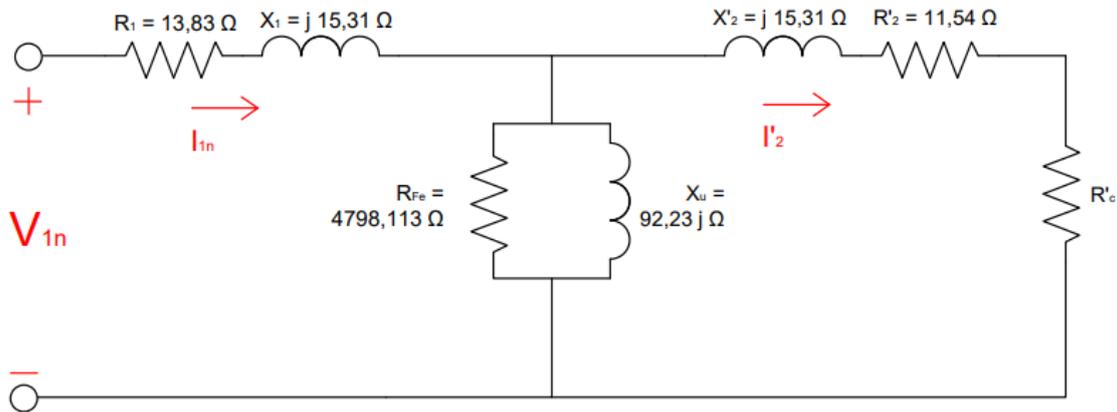


Figura 4.2 Circuito equivalente del Motor Thurn Grande

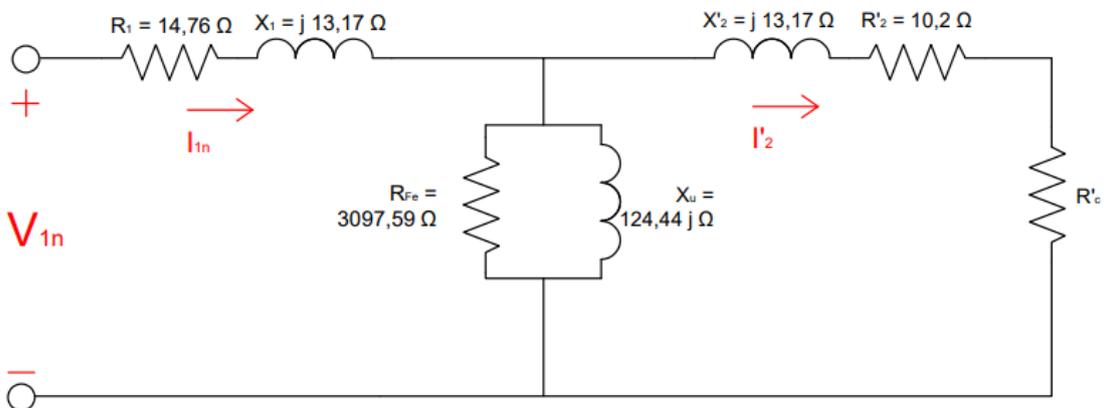


Figura 4.3 Circuito equivalente del Motor Thurn Pequeño

5. PAR DESARROLLADO POR EL MOTOR

Para conocer los pares desarrollados por los motores, los circuitos equivalentes de las figuras: Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 deben ser simplificados para facilitar el cálculo. Por ello, se aplicará el equivalente Thevenin a la malla perteneciente al estátor y la rama de las pérdidas en el hierro, de forma que se tenga una única malla y corriente circulante a identificar.

Una vez obtenido, se aplicará a calcular el par mediante la ecuación (2.48)

$$T = \frac{m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot V_{th_M}^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \left[\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2')^2 \right]}$$

Dado que se desea ver el desarrollo del par motor a distintos valores de deslizamiento y de frecuencia, eso implica variaciones en los valores de inductancia por valor de frecuencia. Debido a que realizar de forma manual el par desarrollado por cada variación de frecuencia y deslizamiento resultaría en una tarea ardua, se ha utilizado la herramienta informática *Matlab* para realizar los cálculos y mostrarlos en las siguientes figuras:

Motor Thurn Pequeño

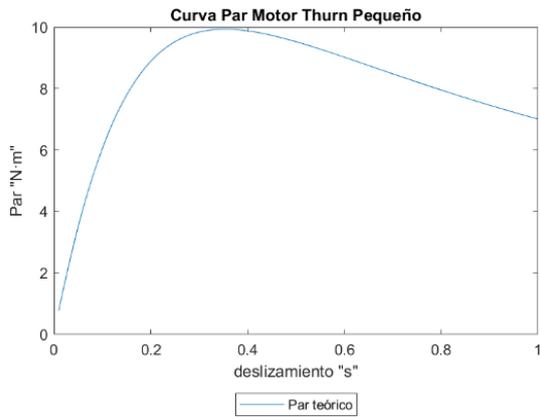


Figura 5.1 Thurn P. Curva de Par a régimen nominal

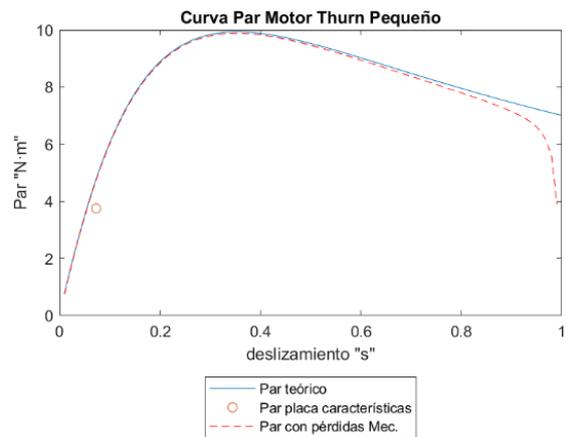


Figura 5.2 Thurn P. Comparativa Ecuaciones del Par y punto de trabajo nominal

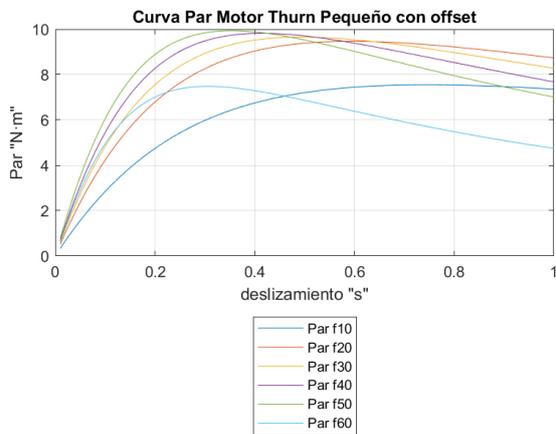


Figura 5.3 Thurn P. Curva Par-Deslizamiento con offset

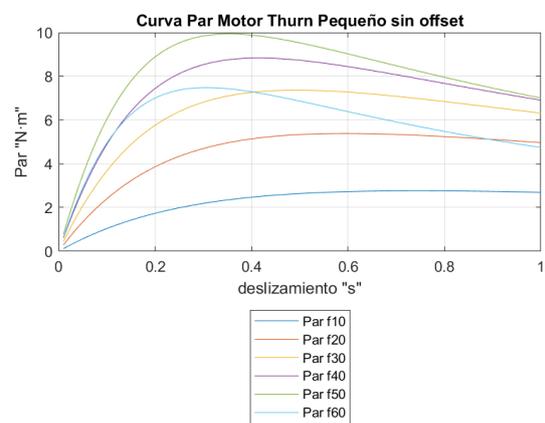


Figura 5.4 Thurn P. Curva Par-Deslizamiento sin offset

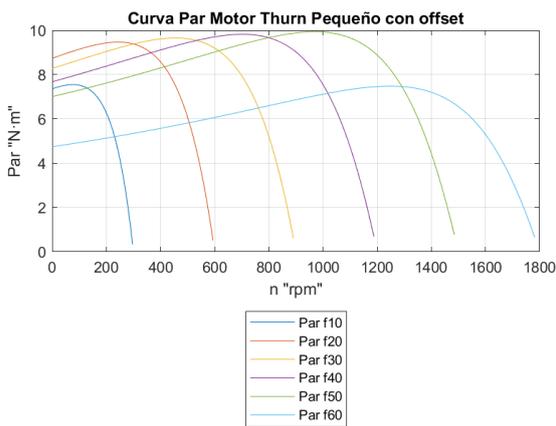


Figura 5.5 Thurn P. Curva Par-rpm con offset

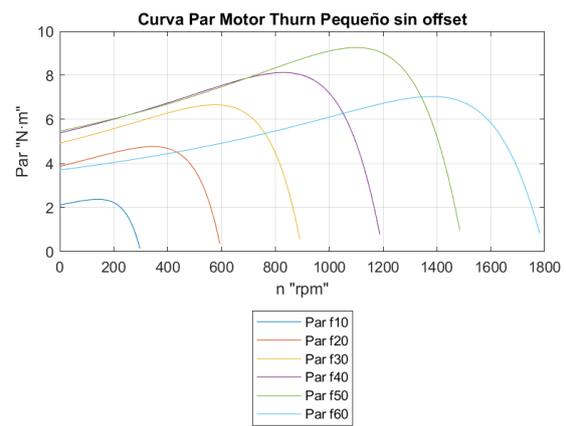


Figura 5.6 Thurn P. Curva Par-rpm sin offset

Motor Thurn Grande

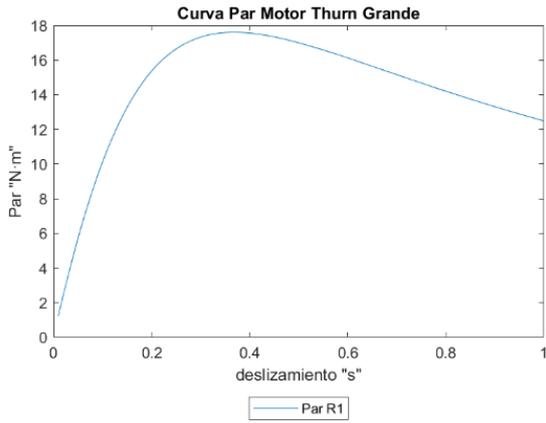


Figura 5.7 Thurn G. Curva de Par a régimen nominal

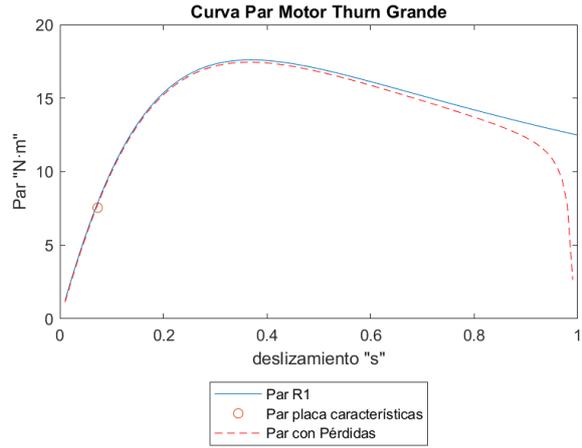


Figura 5.8 Thurn G. Comparativa Ecuaciones del Par y punto de trabajo nominal

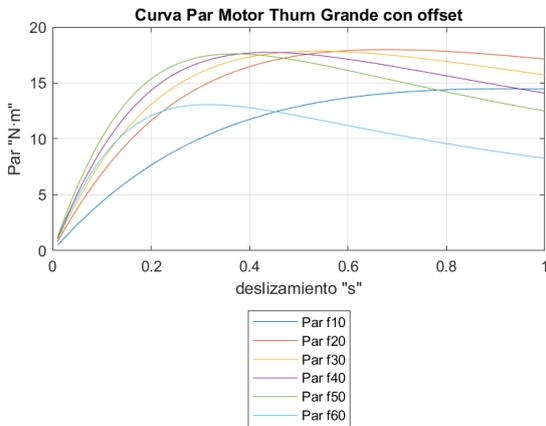


Figura 5.9 Thurn G. Curva Par-Deslizamiento con offset

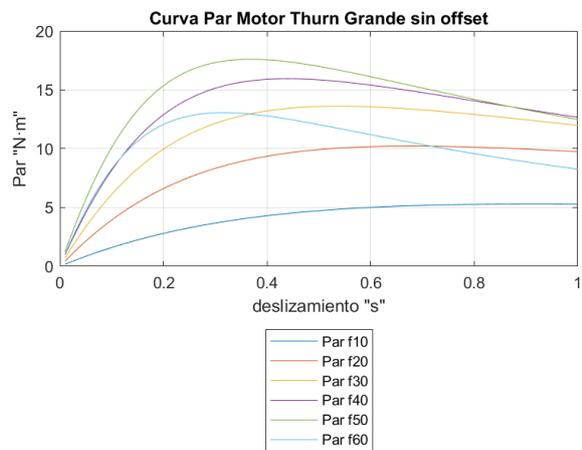


Figura 5.10 Thurn G. Curva Par-Deslizamiento sin offset

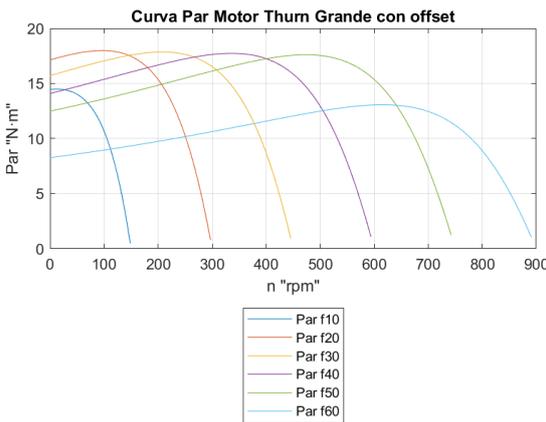


Figura 5.11 Thurn G. Curva Par-rpm con offset

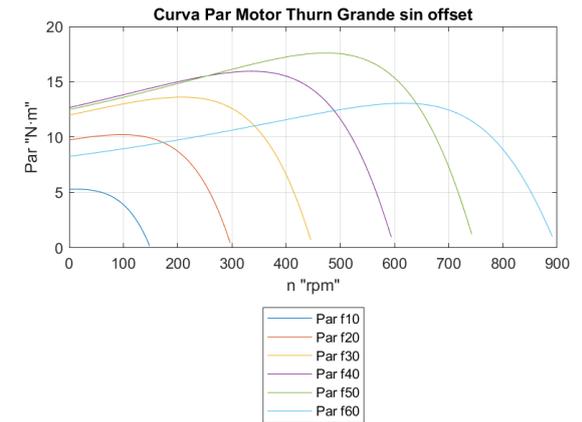


Figura 5.12 Thurn G. Curva Par-rpm sin offset

EDIBON

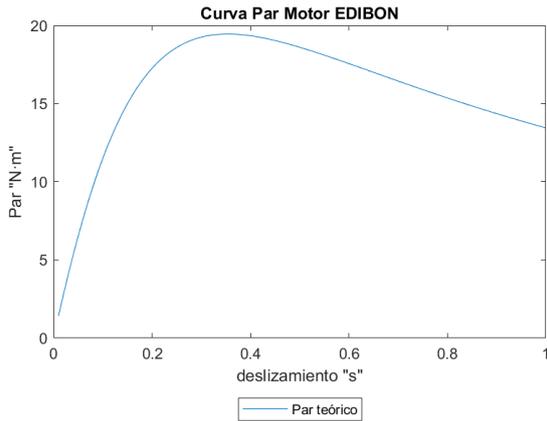


Figura 5.13 EDIBON Curva de Par a régimen nominal

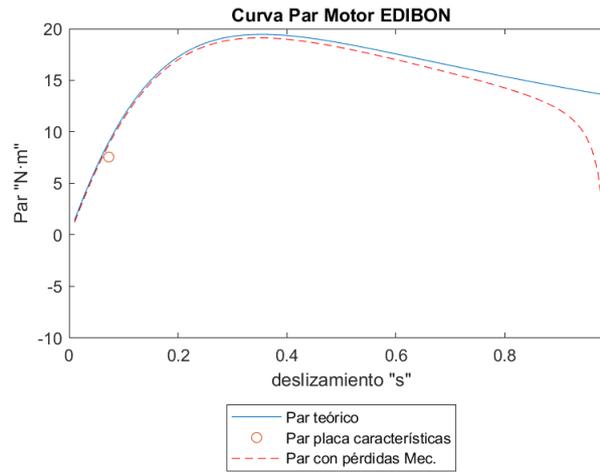


Figura 5.14 EDIBON Comparativa Ecuaciones del Par y punto de trabajo nominal

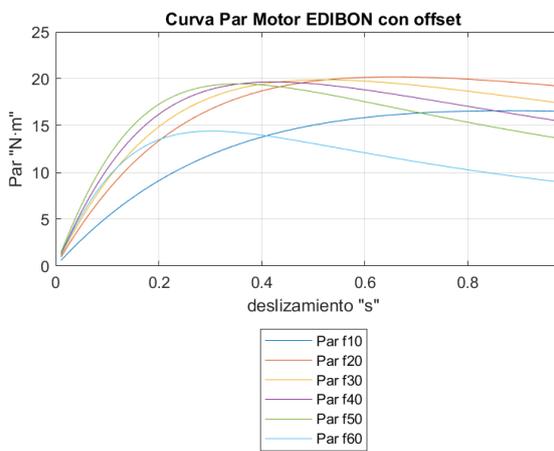


Figura 5.15 EDIBON Curva Par-Deslizamiento con offset

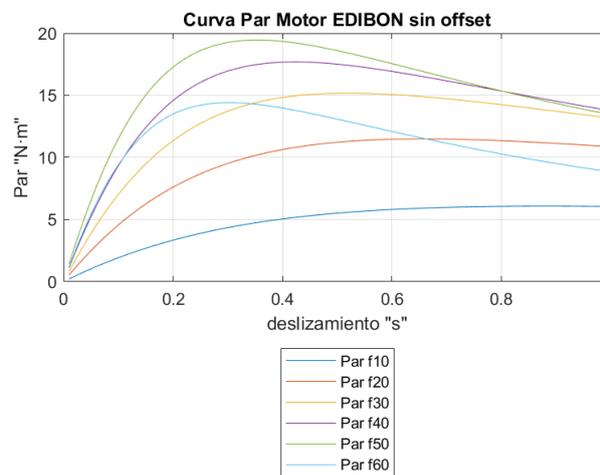


Figura 5.16 EDIBON Curva Par-Deslizamiento sin offset

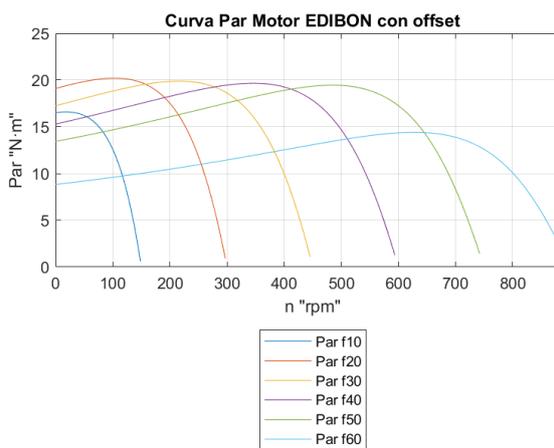


Figura 5.17 EDIBON Curva Par-rpm con offset

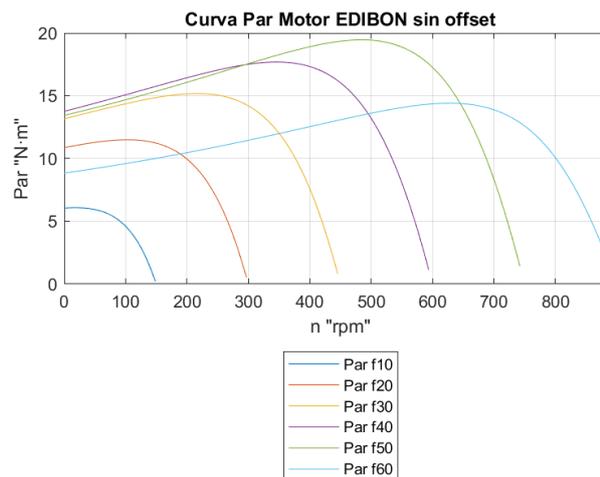


Figura 5.18 EDIBON Curva Par-rpm sin offset

Para poder obtener las curvas de par a distinta frecuencia se ha utilizado un control escalar.

El control escalar consiste en mantener el flujo magnético por polo en el entrehierro constante ante variaciones de la frecuencia de alimentación. Esto es debido a que el flujo magnético por polo en el entrehierro es directamente proporcional a la tensión en el entrehierro E_1 e inversamente proporcional a f_1 tal y como se muestra en la ecuación (5.1):

$$\phi_p = \frac{E_1}{4,44 \cdot k_{w,1} \cdot f_1 \cdot N_1} \quad (5.1)$$

Esto implica que una reducción de la frecuencia de entrada sin variar E_1 provocaría un aumento en el flujo pudiendo llegar a la saturación. Para que esto no pase se debe mantener constante $\frac{E_1}{f_1}$. En nuestro caso, no controlaremos E_1 sino la tensión de entrada V_1 ya que resulta más sencillo y se demuestra que es prácticamente igual en la ecuación (5.2):

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + R_1 \cdot \vec{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \vec{I}_1$$

$$\phi_p = \frac{1}{4,44 \cdot k_{w,1} \cdot N_1} \cdot \left| \frac{\vec{E}_1}{f_1} \right| = \frac{1}{4,44 \cdot k_{w,1} \cdot N_1} \cdot \left| \frac{\vec{V}_1}{f_1} - \frac{R_1 \cdot \vec{I}_1}{f_1} - \frac{j \cdot X_1 \cdot \vec{I}_1}{f_1} \right| \quad (5.2)$$

Por lo cual:

$$\phi_p = \frac{1}{4,44 \cdot k_{w,1} \cdot N_1} \cdot \left| \frac{\vec{E}_1}{f_1} \right| \approx \frac{1}{4,44 \cdot k_{w,1} \cdot N_1} \cdot \left| \frac{\vec{V}_1}{f_1} \right|$$

También, como se ha podido ver en las figuras anteriores, aparece el término offset, este término significa que a bajas frecuencias el cociente $\frac{V_1}{f_1}$ debe ser elevado. Esto es debido a que en bajas frecuencias el valor resistivo aumentará en valor relativo mientras que el inductivo no. Sin embargo, tampoco se puede aumentar mucho el cociente $\frac{V_1}{f_1}$ ya que no podemos sobrepasar la tensión máxima de alimentación, es por esto que nunca se llega a equiparar el par máximo a baja frecuencia con el nominal.

La limitación de tensión también provocará que a altas frecuencias el motor desarrolle un par inferior del nominal como se ha podido comprobar en las figuras anteriores.

6. PAR DESARROLLADO EN EL FRENADO DINÁMICO

Por último, faltaría utilizar la máquina de frenado para generar pares variables en función de la corriente continua inyectada en la conexión serie en el estátor, según la ecuación (2.51):

$$T = \frac{m_1 \cdot \frac{R'_2}{1} \cdot I'^2_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60}}$$

$$I'_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \cdot T}{m_1 \cdot R'_2}}$$

$$I_{ac} = \left| I'_2 \cdot \frac{(R_{Fe} + j \cdot X_\mu) + (R'_2 + j \cdot X'_2)}{R_{Fe} + j \cdot X_\mu} \right|$$

$$I_{ac\ eq} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot I_{cc}$$

$$I_{cc} = \frac{3}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot I_{ac\ eq}$$

En las siguientes gráficas se mostrarán los pares resistentes generados por las distintas máquinas eléctricas en función de su velocidad y frecuencia. Para los distintos pares generados se ha inyectado una corriente continua en el estátor desde el 20 % de la corriente nominal de alimentación hasta un 160 % a la vez que se ha ido variando la velocidad/frecuencia de la máquina.

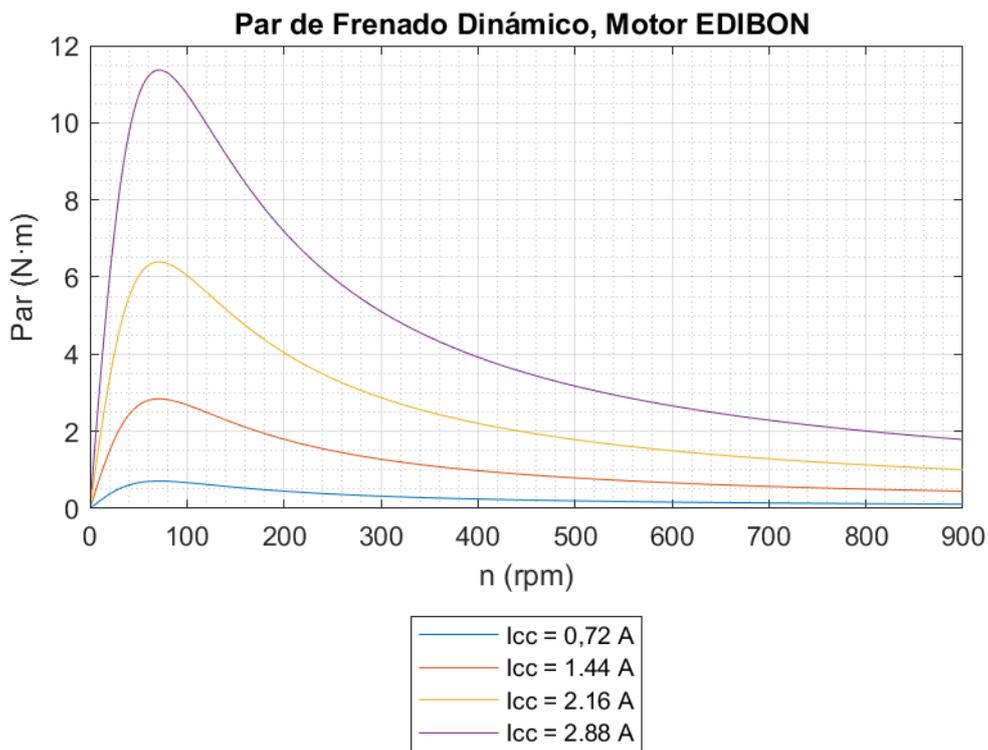


Figura 6.1 M.EDIBON, Par por rpm desarrollado con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

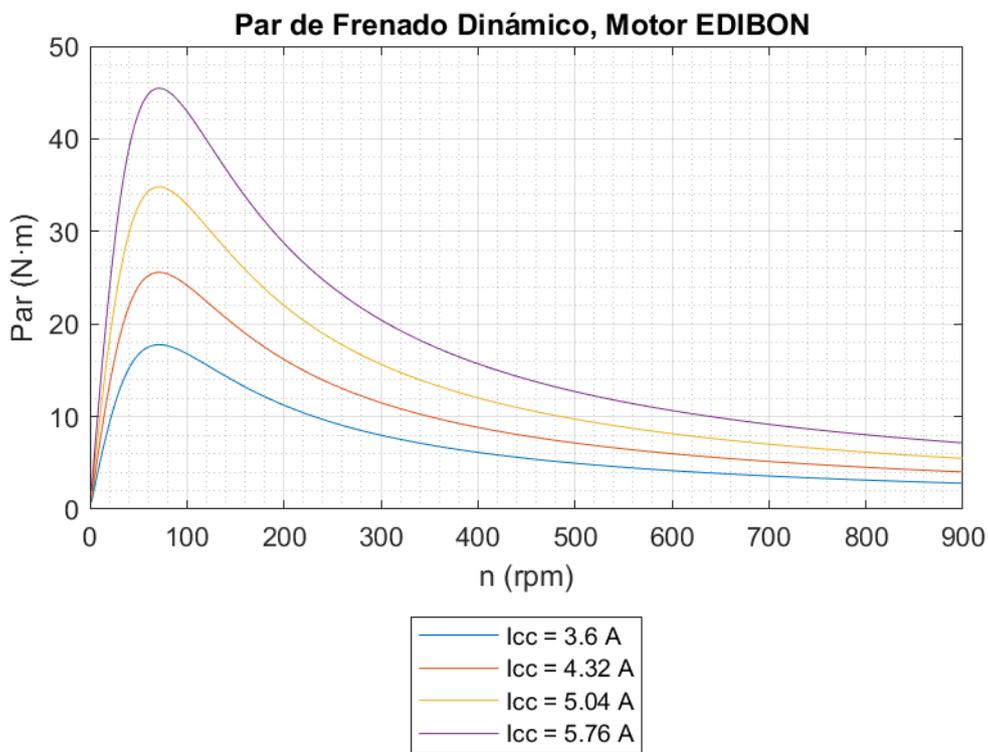


Figura 6.2 M.EDIBON, Par por rpm con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

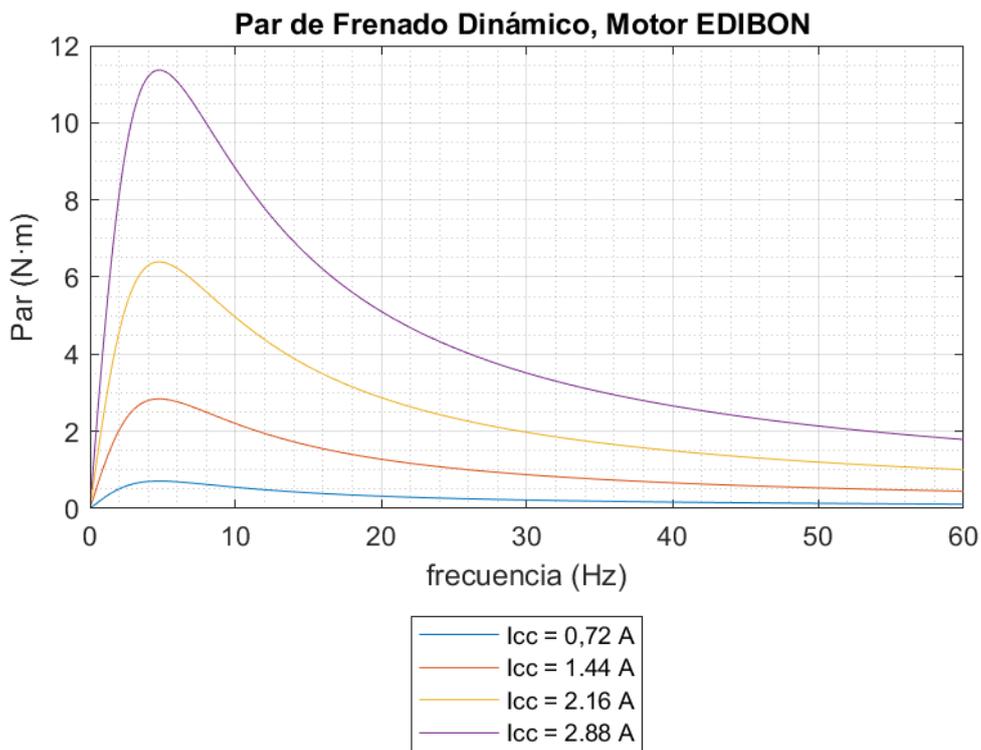


Figura 6.3 M.EDIBON, Par por frecuencia con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

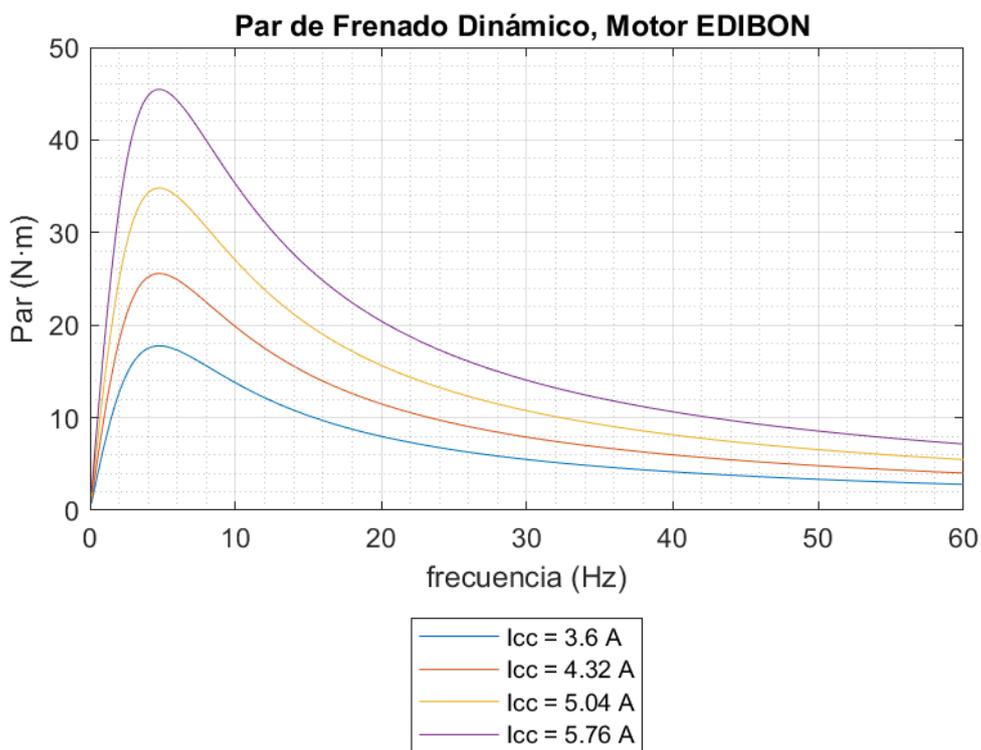


Figura 6.4 M.EDIBON, Par por frecuencia con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

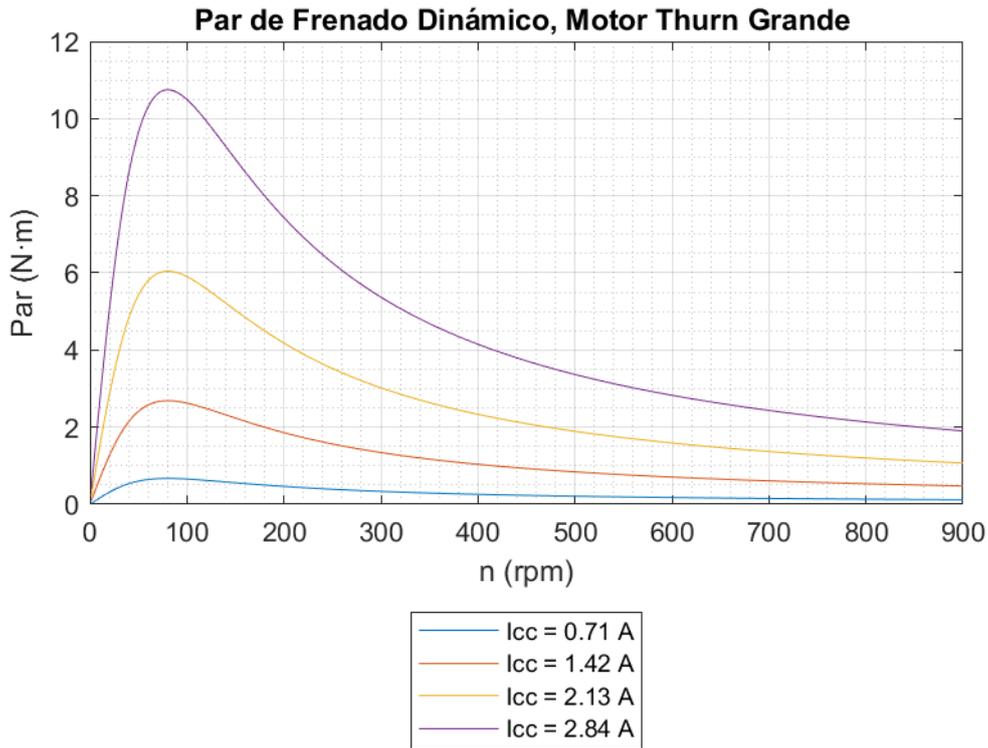


Figura 6.5 M.Thurn Grande, Par por rpm con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

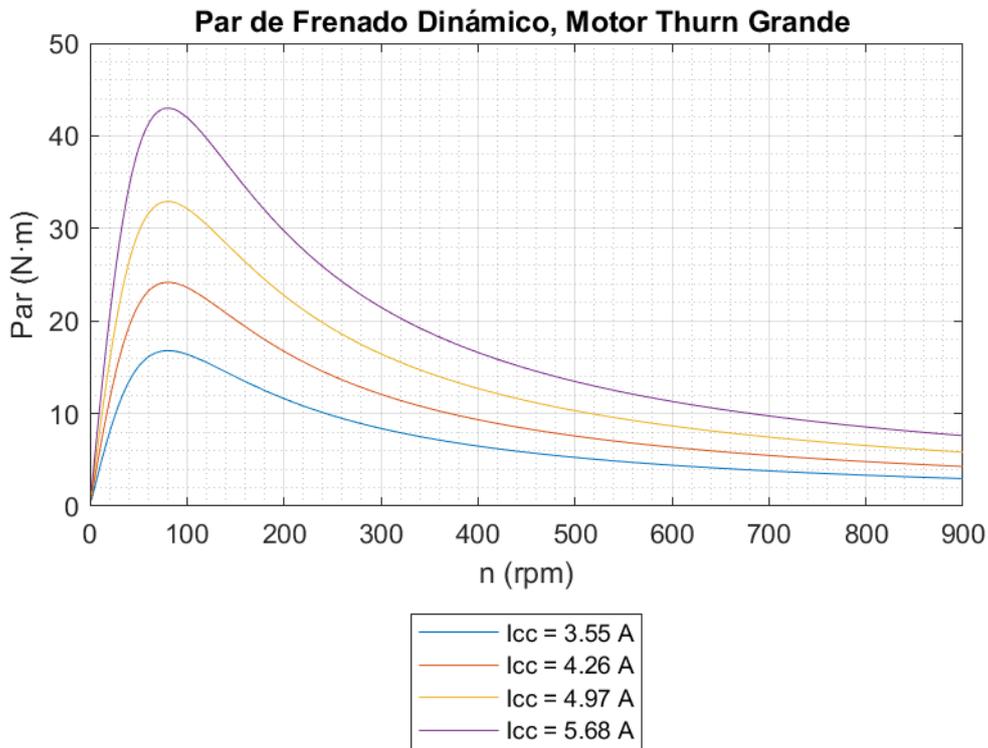


Figura 6.6 M.Thurn Grande, Par por rpm con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

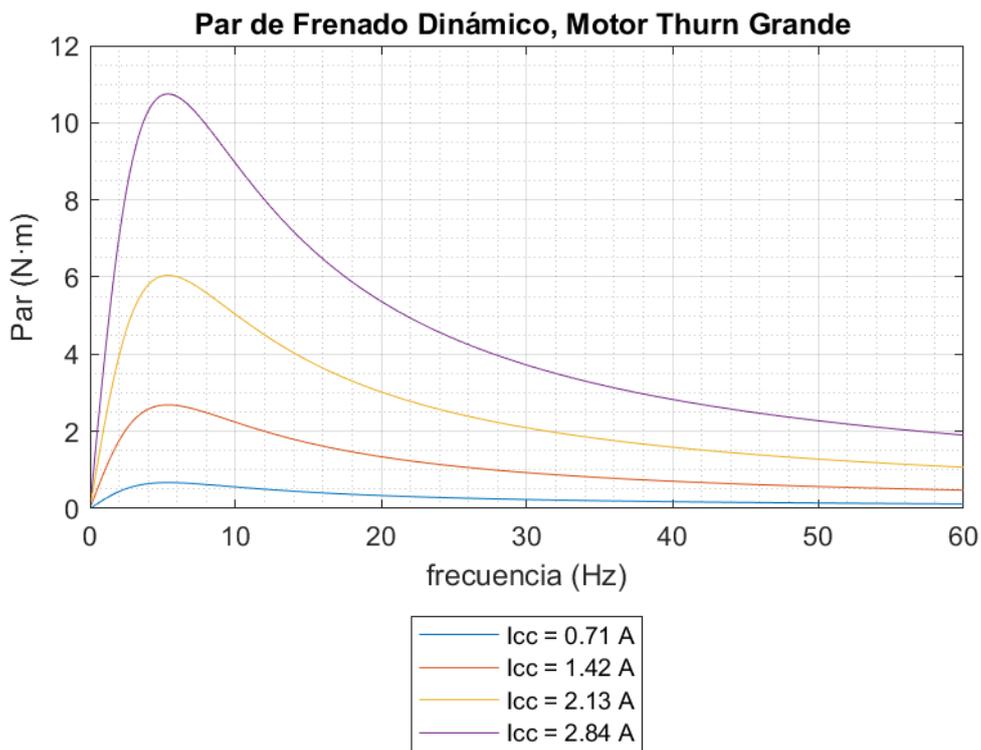


Figura 6.7 M.Thurn Grande, Par por frecuencia con Icc del [20 – 80] % del valor nominal

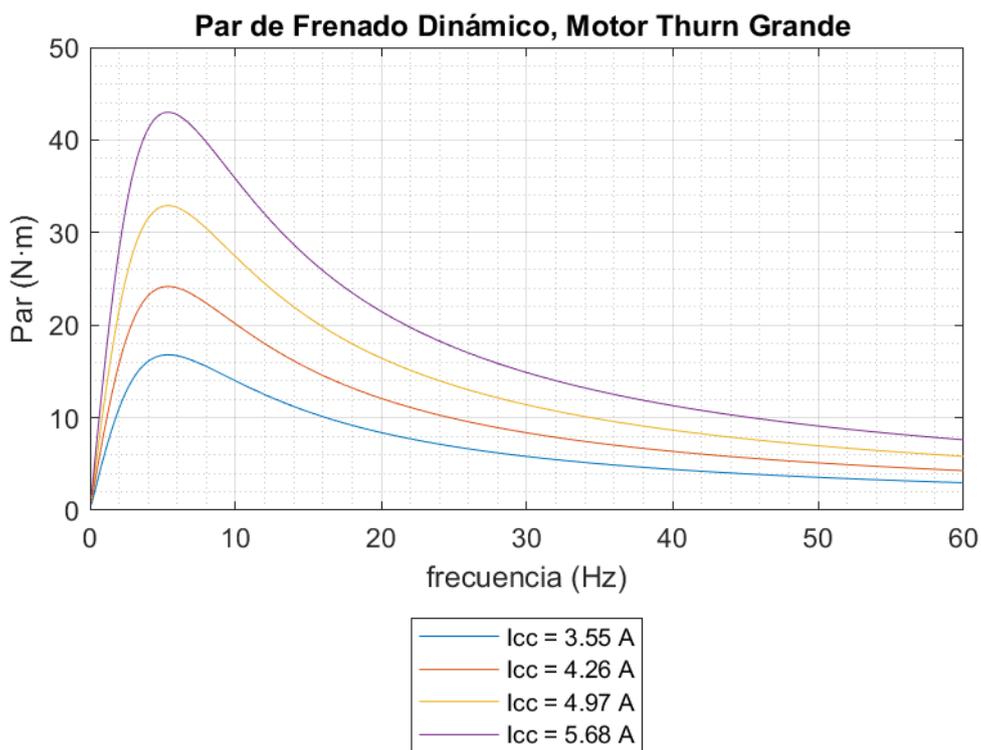


Figura 6.8 M.Thurn Grande, Par por frecuencia con Icc del [100 – 160] % del valor nominal

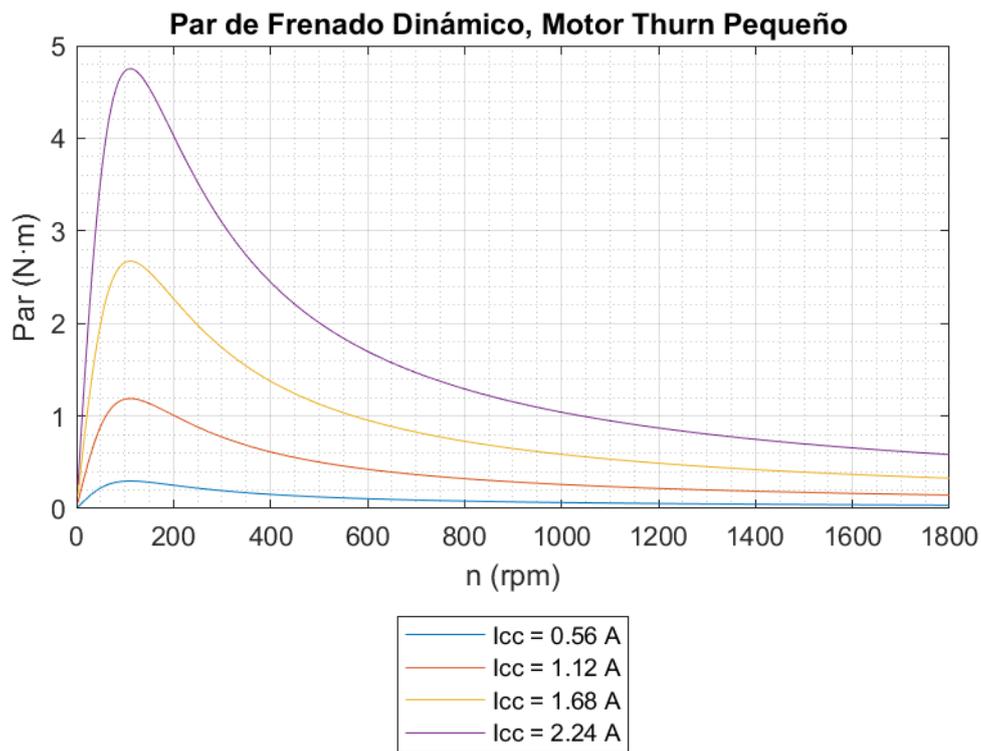


Figura 6.9 M.Thurn Pequeño, Par por rpm con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

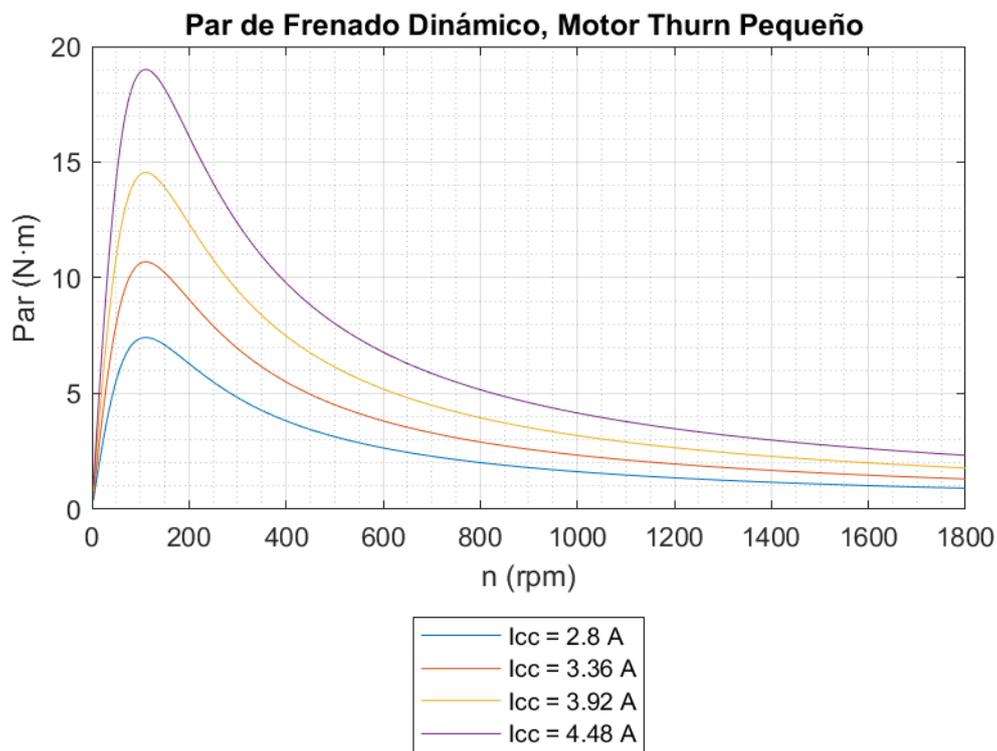


Figura 6.10 M.Thurn Pequeño, Par por rpm con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

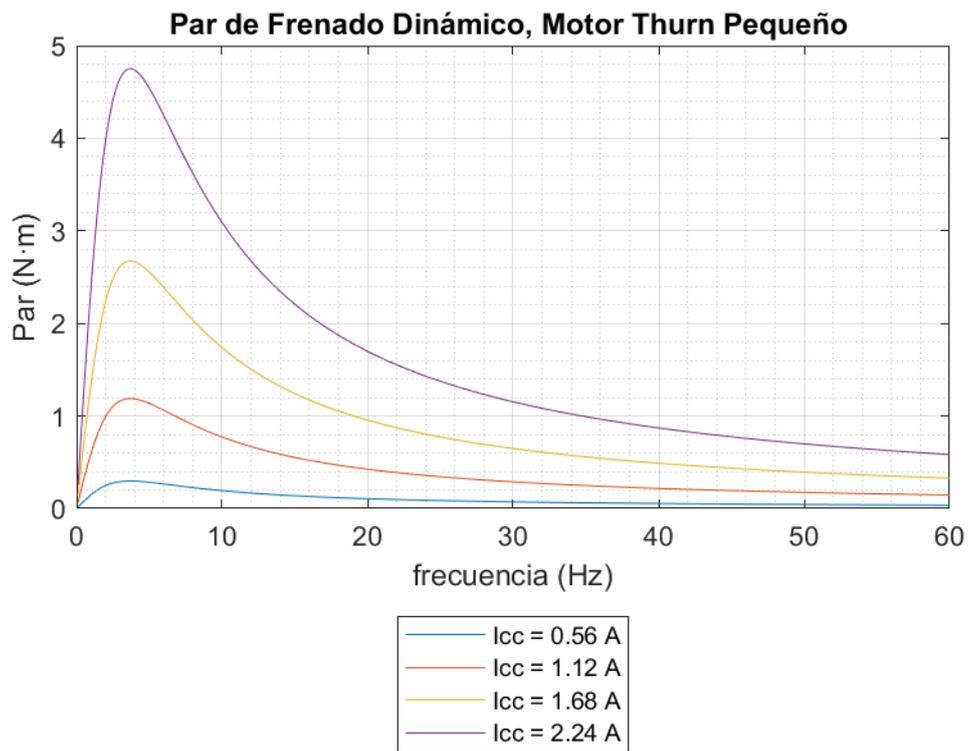


Figura 6.11 M.Thurn Pequeño, Par por frecuencia con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

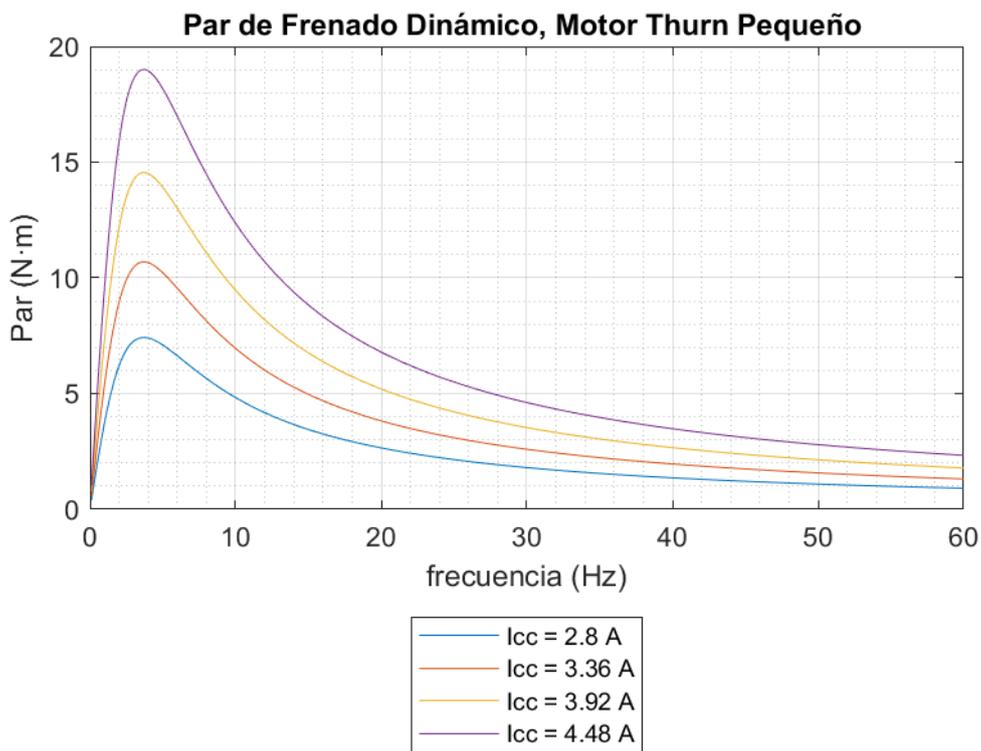


Figura 6.12 M.Thurn Pequeño, Par por frecuencia con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

Por último, como inciso, se mostrará la potencia generada en el eje de la máquina donde se generan los pares variables y la consumida en el estátor de dicha máquina, para demostrar la inexistencia de flujo de potencia entre ellas y que, por ello, la corriente en el estátor es invariable frente a los cambios de par en la máquina, tal y como se vio en el apartado 2.1.

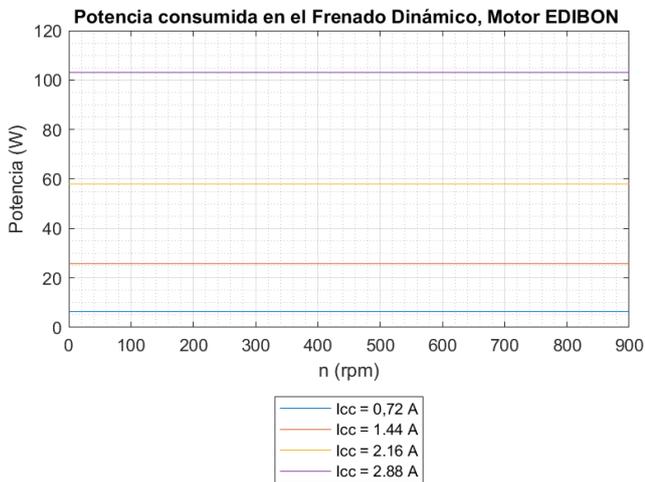


Figura 6.13 M.EDIBON, Potencia consumida en el estátor con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

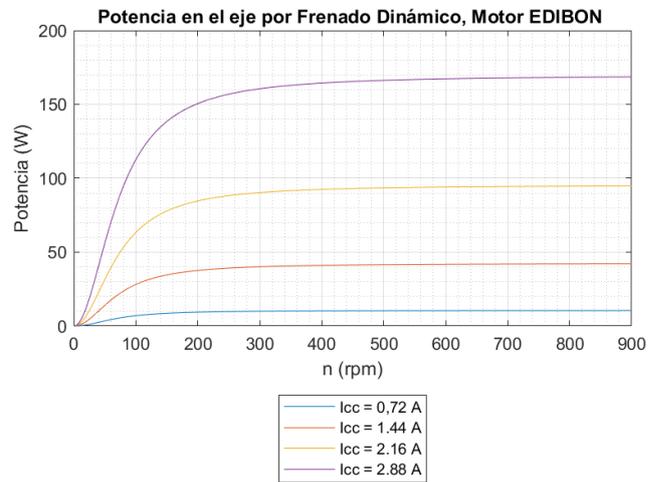


Figura 6.14 M.EDIBON, Potencia en el eje con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

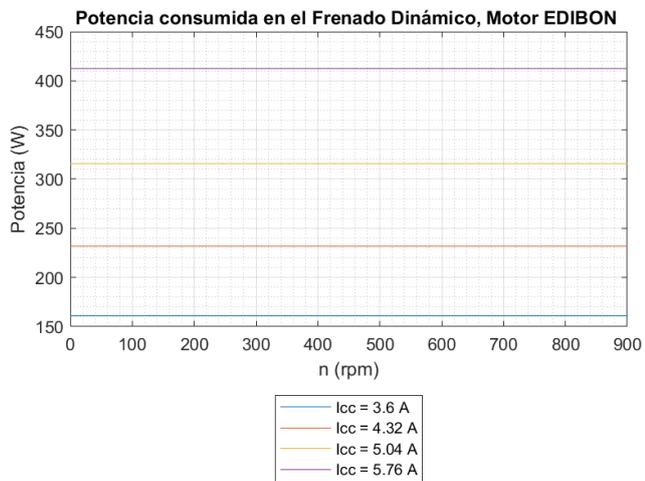


Figura 6.15 M.EDIBON, Potencia consumida en el estátor con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

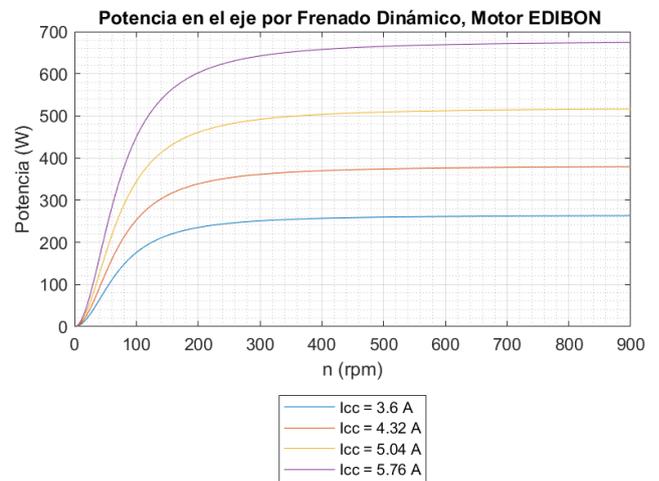


Figura 6.16 M.EDIBON, Potencia en el eje con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

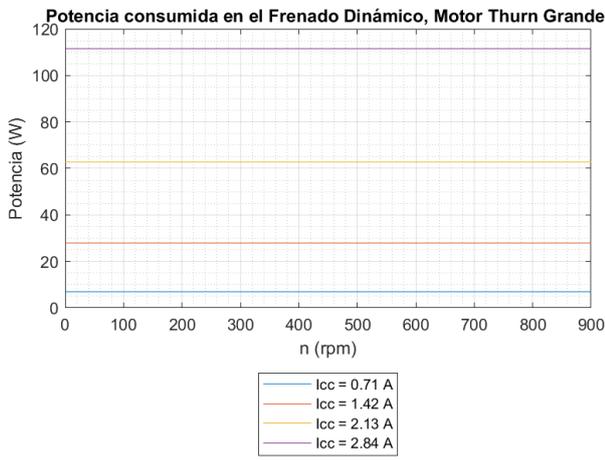


Figura 6.17 M. Thurn Grande, Potencia consumida en el estátor con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

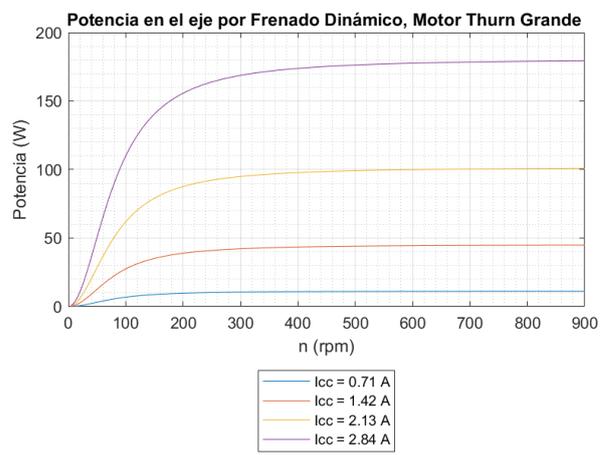


Figura 6.18 M. Thurn Grande, Potencia en el eje con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

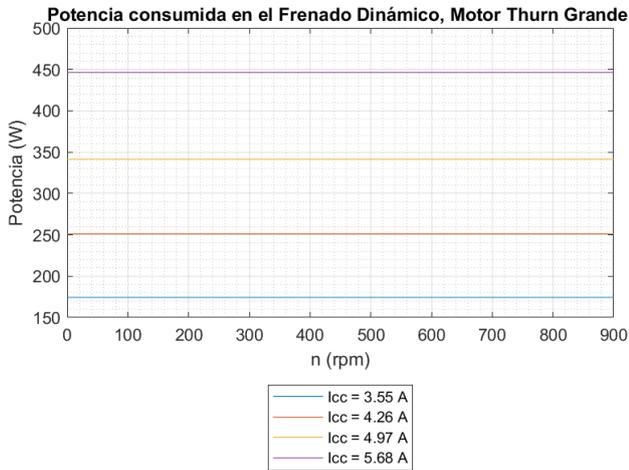


Figura 6.19 M. Thurn Grande, Potencia consumida en el estátor con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

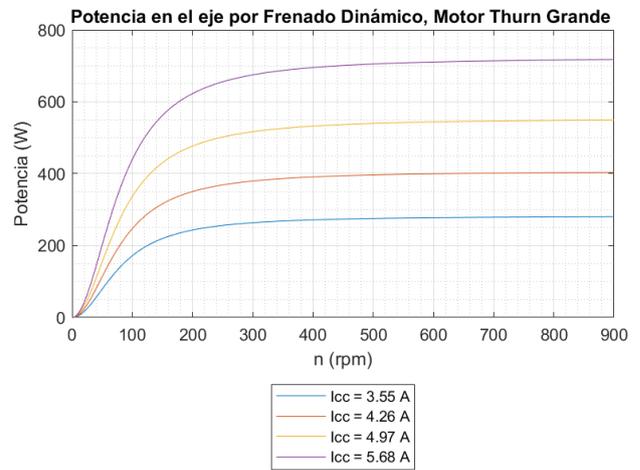


Figura 6.20 M. Thurn Grande, Potencia en el eje con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

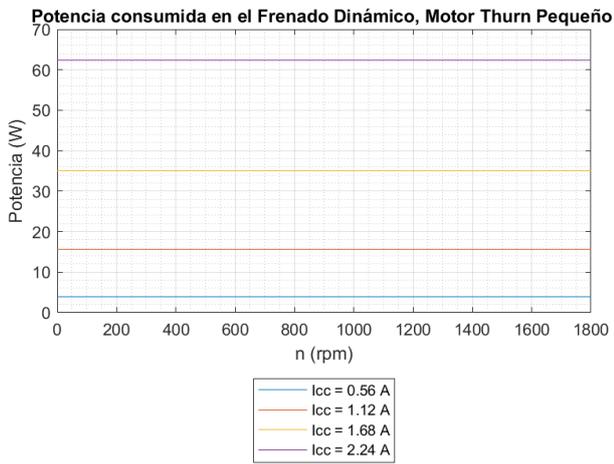


Figura 6.21 M.Thurn Pequeño, Potencia consumida en el estátor con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

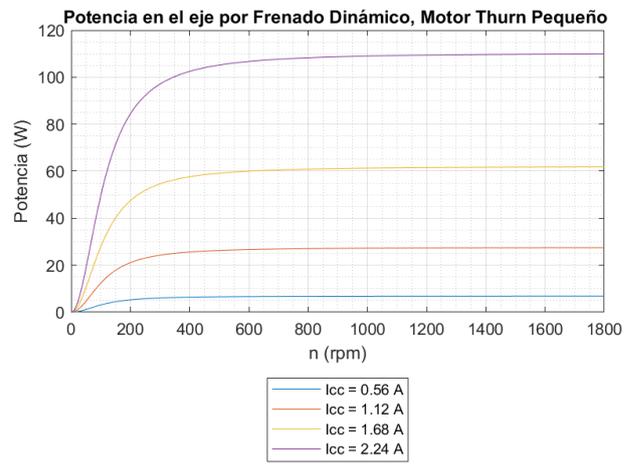


Figura 6.22 M. Thurn Pequeño, Potencia en el eje con I_{cc} del [20 – 80] % del valor nominal

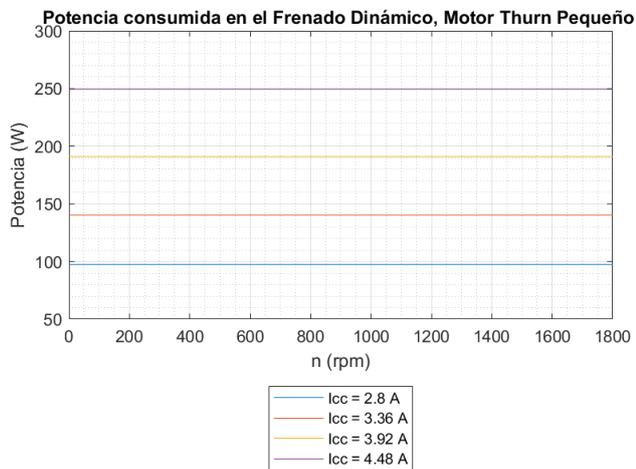


Figura 6.23 M.Thurn Pequeño, Potencia consumida en el estátor con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

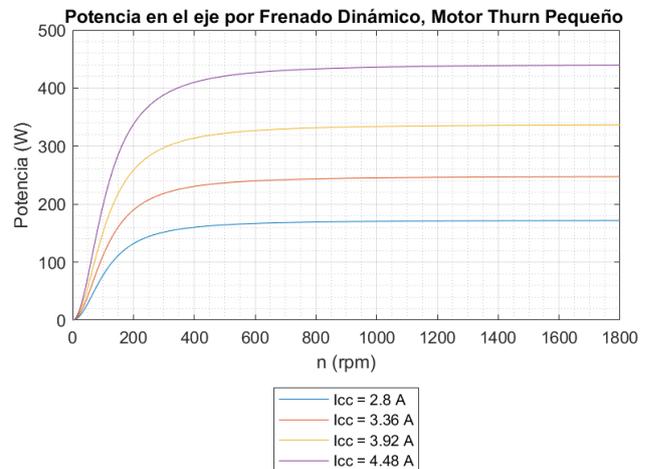


Figura 6.24 M. Thurn Pequeño, Potencia en el eje con I_{cc} del [100 – 160] % del valor nominal

7. VERIFICACIÓN DE LOS CIRCUITO EQUIVALENTES

Para poder dar por concluido el estudio, se ha ensayado sobre un motor EDIBON trabajando como motor y un motor Thurn Grande actuando como generador de pares variables tal y como se puede ver en las siguientes imágenes:

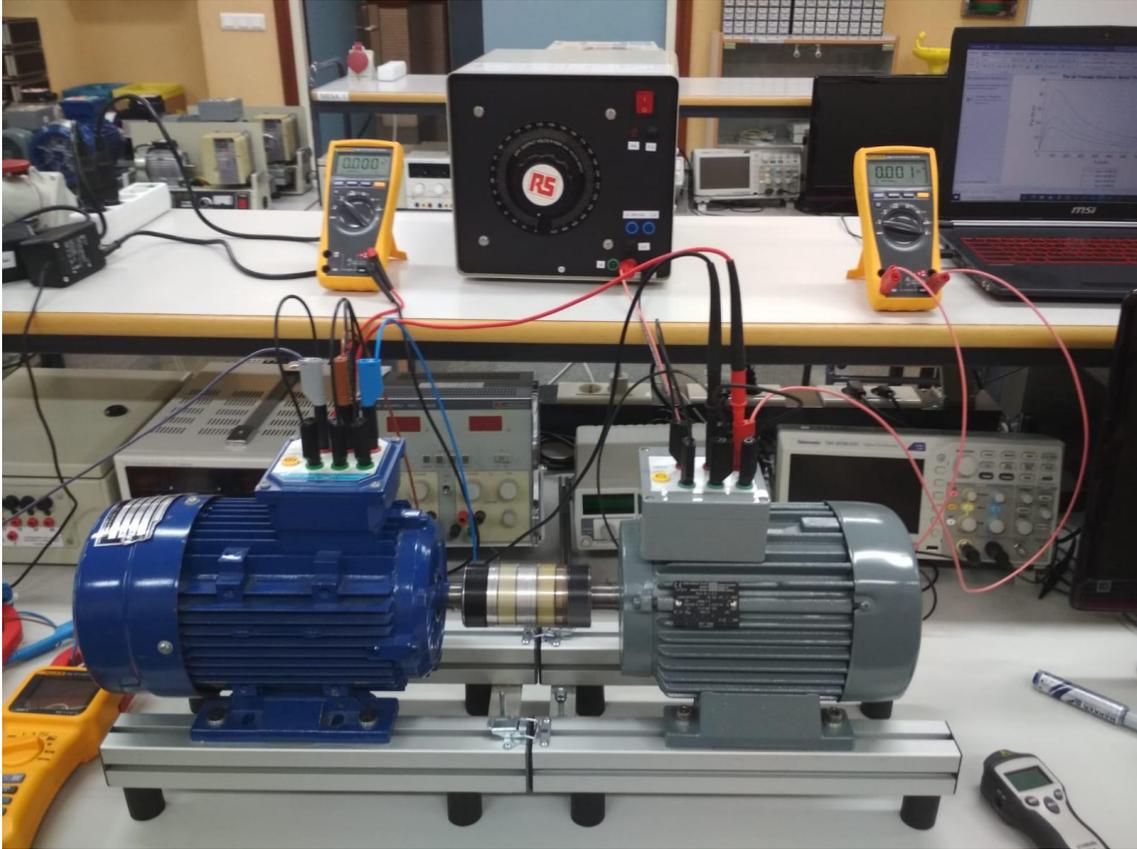




Figura 7.1 Ensayo de verificación de los circuitos equivalentes

Mediante la placa de características, sabemos que la máquina en condiciones nominales, el motor EDIBON, gira a 695 rpm y desarrolla un par de más o menos 7.56 N·m el cual es coincidente a nuestra curva obtenida por el circuito equivalente.

De esta forma, para comprobar que hemos realizado un buen cálculo del circuito equivalente, crearemos en el motor Thurn un par de más o menos 7.56 N·m para la velocidad de 695 rpm y comprobaremos que la máquina motora sí que gira a 695 rpm.

Mediante la herramienta de cálculo Matlab se ha comprobado que a 4.97 A de corriente continúa se obtendría un par de 7.562 N·m. De forma que a unos $4.97 \pm 0.1 A$, se conseguirá poner la máquina a trabajar en régimen nominal.

Como resultado se ha obtenido una velocidad de 688 rpm lo cual es un resultado satisfactorio, porque la desviación no es muy pronunciada y no se tuvieron en cuenta parte de las pérdidas que surgen en el motor debido a su complejidad de cálculo.

8. CONCLUSIÓN

En este trabajo de fin de grado se ha conseguido una forma de obtener pares variables en una máquina asíncrona de forma que se puedan realizar diversos ensayos sobre máquinas motoras cuando se es requerido variar el par de trabajo. Sin embargo, como se pudo ver en el apartado 7 para frecuencias elevadas se requieren corrientes continuas muy superiores al valor nominal de corriente admisible por los bobinados.

Por ello, este método debería de utilizarse para frecuencias bajas ya que el par obtenido es muy elevado con corrientes inferiores a la nominal o períodos de tiempo bajos en los ensayos a frecuencias elevadas para evitar un sobrecalentamiento en los conductores.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. MÁQUINAS ELÉCTRICAS; Jesús Fraile Mora; Mc Graw Hill, sexta edición, 2008.
2. FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS; Stephen J. Chapman; Mc Graw Hill.
3. MÁQUINAS ELÉCTRICAS; A.E. Fitzgerald, Jr.Charles Kingsley y Stephen D. Umans; Mc Graw Hill, sexta edición, 2004.
4. MODERN POWER ELECTRONIS AND AC DRIVES; Bimal K. Bose; Prentice Hall, 2002.
5. HIGH-POWER CONVERTERS AND AC DRIVES; Bin Wu; IEEE Press, Wiley-Interscience, 2006.
6. ADVANCED ELECTRIC DRIVES; Ned Mohand; Mnpere, 2001.
7. FRENADO DE MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN; Miguel Ángel Rodríguez Pozueta.