



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SAN SEBASTIÁN**

TECNUN

UNIVERSIDAD DE NAVARRA

*Práctica nº 3: Sistemas Eléctricos*

**ESTUDIO DE LA MÁQUINA DE C.C.**

## **ÍNDICE**

1	Objetivo de la Práctica.....	4
2	La Máquina de Corriente Continua.....	5
3	Ensayos Realizados en la Práctica .....	9
3.1	Medida de Resistencias.....	9
3.2	Ensayo de Rozamiento .....	9
3.3	Estudio del Comportamiento como Generador .....	9
3.3.1	Generador en Vacío y sin Excitación .....	10
3.3.2	Generador en Vacío con Excitación Independiente .....	10
3.3.3	Generador con Carga y Excitación en Paralelo.....	11
3.4	Estudio del Comportamiento como Motor.....	11
3.4.1	Estudio del Par Motor con Excitación Independiente .....	11
3.4.2	Estudio del Par Motor con Excitación en Serie .....	12
3.5	Estudio de la Velocidad.....	12
3.5.1	Influencia de la Tensión de Alimentación .....	13
3.5.2	Influencia del Flujo por Polo .....	13
4	Esquemas Experimentales.....	15
4.1	Medida de Resistencias.....	15
4.2	Ensayo de Rozamiento .....	15
4.3	Comportamiento como Generador .....	15
4.3.1	Generador en Vacío y sin Excitación .....	15
4.3.2	Generador en Vacío con Excitación Independiente .....	16
4.3.3	Generador con Carga y Excitación en Paralelo.....	16

4.4 Comportamiento como Motor .....	17
4.4.1 Estudio del Par Motor con Excitación Independiente .....	17
4.4.2 Estudio del Par Motor con Excitación en Serie .....	18
4.5 Estudio de la Velocidad.....	19
4.5.1 Influencia de la Tensión de Alimentación.....	19
4.5.2 Influencia del Flujo por Polo .....	20
5 Material y Equipo Necesario .....	21
6 Pautas de Desarrollo de la Práctica.....	22

## **1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA**

El objetivo fundamental de la práctica es que el alumno se familiarice con los conceptos más básicos relacionados con las máquinas de corriente continua, así como con la realización de los ensayos más comunes.

Concretamente, se pretende dar una idea general del funcionamiento de estas máquinas, así como de la influencia de diversos parámetros eléctricos en su comportamiento. Se pretende que el alumno sea capaz de determinar las curvas más características que definen su modo de trabajo, determinando el cambio de funcionamiento que experimentan cuando se introduce una variación en algún parámetro del circuito.

De todas formas, por ser más utilizado el motor que el generador, en esta práctica nos centraremos en el estudio de las máquinas de CC en su comportamiento como motor, sin dejar de lado que la propia máquina también puede comportarse como generador sin cambios en su estructura.

## **2 LA MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA**

Las máquinas de corriente continua constan esencialmente de dos devanados (aunque también puede disponer de otro shunt) alimentados con CC.

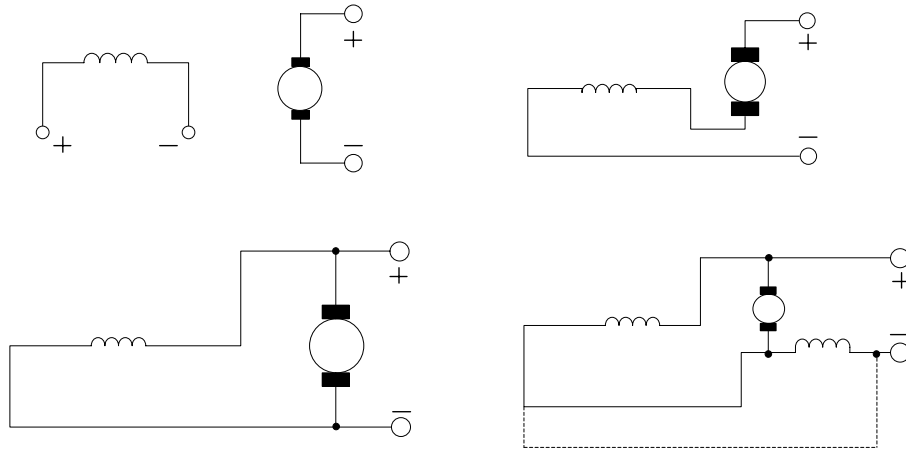
Uno de los devanados se denomina inductor y está en el estator de la máquina; el otro, llamado inducido, está en el rotor. En el caso de funcionamiento como motor, ambos bobinados están alimentados con CC. En el caso de que funcione como generador, se alimenta con CC el inductor y se obtiene una f.e.m. en el inducido (también continua).

En este tipo de máquinas existen dos campos: el primero, creado en el estator y que será fijo; y, el segundo, generado por las corrientes que circulan por las espiras del rotor. El objetivo, en el caso del motor, es el de conseguir un campo magnético en el rotor que interaccione con el del estator para producir un valor de par máximo. Para lograr esto se debe cumplir que ambos campos sean perpendiculares entre sí en todo momento. En el caso del generador, se trata de generar de la forma más eficiente posible una tensión continua en bornes del inducido y para ello se mantendrá una velocidad fija en el rotor para que sus espiras y bobinas, al moverse respecto del campo principal del rotor, proporcionen una tensión fija que se rectifica y suma en el exterior de rotor. Ambos objetivos se cumplen gracias a las escobillas y el colector de delgas.

El estator de una máquina de CC genera un campo magnético fijo. Este campo se puede obtener por medio de imanes permanentes o mediante bobinas recorridas por corriente continua y montadas en polos salientes (suele ser el caso más habitual). Si se opta por esta segunda opción existen diversos tipos de excitación:

- Excitación independiente: La corriente que alimenta al devanado inductor es ajena a la propia máquina y procede de una fuente independiente externa, tal como puede verse en la figura a).
- Autoexcitación: En este caso, la corriente de excitación procede de la propia máquina. Según la forma de obtener esta corriente se tienen tres tipos diferentes de máquinas de CC:
  - Excitación Serie: devanado del inductor en serie con el de inducido. Véase la figura b).

- Excitación derivación: devanado del inductor conectado directamente a las escobillas; por lo tanto, en paralelo con el de inducido. Véase la figura c).
- Excitación compuesta o mixta: una bobina en serie y la otra en paralelo. Véase la figura d).



La nomenclatura de los bobinados es la siguiente:

- Bobinado de Inducido: Sus terminales se denominan siempre AB, independientemente del tipo de excitación.
- Bobinado de Inductor: Sus terminales se denominan de forma diferente dependiendo del tipo de excitación.

➤ Excitación Independiente: IK

a) Excitación Independiente

➤ Excitación Derivación, Paralelo o Shunt: CD

➤ Excitación Serie: EF

➤ Excitación Compuesta o Compound: EF, la parte serie, y, CD, la parte en paralelo.

- Bobinado de Compensación: Si hay polos de compensación, para reducir en lo posible la reacción de inducido, sus terminales se denominan GH.

En el caso de la máquina de CC disponible para esta práctica de laboratorio, los bobinados de la máquina pueden conectarse de formas diferentes para conseguir los distintos tipos de máquinas que se van a ensayar. En el laboratorio se definirán esas conexiones, que no son diferentes de las que se han mostrado.

c) Excitación derivación (shunt)

Cualquiera que sea el tipo de máquina (excitación independiente, paralelo o serie) y ya sea generador o motor, su comportamiento está basado en el conocimiento de dos magnitudes fundamentales: la tensión inducida en el rotor y el par mecánico que se desarrolla, o viceversa.

En cualquier caso, trabaje como generador de CC o como motor, se aplica una corriente al inductor para generar el campo magnético principal. En el caso del generador, se hace girar el inducido (mediante una turbina de cualquier tipo) y, cuando las espiras del inducido pasan por delante de los polos se inducen tensiones en las espiras de las bobinas que son prácticamente proporcionales a la inducción del campo magnético principal, a la longitud de los conductores y a la velocidad con la que se mueven respecto del campo. Este efecto no es más que el fenómeno de inducción de Faraday. Mientras no circule corriente por los conductores, no aparecerán fuerzas sobre ellos que, como dice la Ley de Lenz, se opondrán al movimiento de giro que tenían. Estas fuerzas, que se aplican a los conductores que se encuentran en la superficie (o casi) del rotor, o inducido, proporcionan un par de frenado que hay que vencer si se quiere mantener la velocidad de giro constante. Es decir, en el caso del generador se busca la tensión inducida y, cuando circula corriente por el inducido, se desarrolla un par electromagnético en sentido contrario del movimiento.

En el caso del motor, se busca la producción de un par mecánico que haga girar el rotor. Para ello, se hace circular corriente continua por las espiras y bobinas del inducido, que están inmersas en el campo magnético principal generado por el inductor. Mientras no haya giro libre del rotor, habrá par en el eje, pero no tensiones inducidas; éstas solamente aparecen cuando se produce el giro del rotor. Por ello, en un motor se proporciona un par en el eje y la reacción se produce en forma de tensión inducida en el rotor, siempre opuesta a la aplicada para que circulen las corrientes por el inducido.

Las expresiones del par electromagnético (no el útil) y la tensión inducida se conocen de los apuntes y ya se han trabajado en clase; son las siguientes:

$$T_{mg} = \frac{PZ}{2\pi 2c} \phi_p I_i = \frac{pZ}{2\pi c} \phi_p I_i = K_T I_i \phi_p$$

$$E_i = \frac{PZ}{2\pi 2c} \omega \phi_p = K_T \omega \phi_p = K_E n \phi_p$$

Para comprender mejor el comportamiento de estas máquinas, se van a realizar varios ensayos como generador y como motor. Estos ensayos se explican a continuación.



## **3 ENSAYOS REALIZADOS EN LA PRÁCTICA**

### **3.1 MEDIDA DE RESISTENCIAS**

Se procederá a medir las resistencias del devanado de inducido, del de inductor serie y del de inductor shunt (o paralelo).

Para ello, sin más complicación, se utilizará el polímetro en su función óhmica. De esta forma conoceremos las resistencias de los tres devanados de la máquina del laboratorio:  $R_i$ ,  $R_e$  y  $R_{sh}$ .

### **3.2 ENSAYO DE ROZAMIENTO**

Mediante este ensayo se calculan las pérdidas que se producen en la máquina por motivos puramente mecánicos.

Es el mismo ensayo que se realizó en la segunda práctica de Sistemas Eléctricos sobre la Máquina de Inducción y puede utilizarse la misma gráfica obtenida en dicha práctica.

### **3.3 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO COMO GENERADOR**

Mediante estos ensayos se pretende ver la característica de funcionamiento de la máquina como generadora de corriente continua.

Para ello, se arrastrará mediante el motor de CA asíncrono que se encuentra acoplado al eje de la máquina y se alimentará, cuando sea necesario, el inductor con una corriente continua.

Las dos curvas características más importantes de una máquina de CC actuando como generador son:

- Característica de Vacío:  $E_i = f(I_e)$

Al ser el flujo por polo ( $\phi_p$ ) proporcional a la corriente de inductor ( $I_e$ ), el valor de la tensión inducida ( $E_i$ ) será también proporcional, como hemos visto, a esa corriente y a la velocidad de giro del rotor, según la expresión:

$$E_i = K_E n \phi_p$$

- El ensayo se realiza a diferentes velocidades pero siempre sin alimentar carga eléctrica alguna.
- La corriente de inductor se variará entre 0 y la  $I_{eN}$ .

- Aparecerá siempre una curva de subida y otra de bajada para la característica. Esto es debido al fenómeno de la histéresis del material ferromagnético.
  - La corriente de inductor se modificará mediante un reóstato en serie con el bobinado de inductor.
  - Por último, se apreciará una pequeña tensión inducida aunque la corriente del inductor sea nula. Es debida al magnetismo remanente en los polos.
- Característica de Salida o Regulación:  $V=f(I)$ 

Mediante esta curva característica se trata de ver cómo varía la tensión proporcionada por el generador en función de la carga eléctrica alimentada (o la corriente de salida del generador). Es, en realidad, la regulación del generador; es decir, la caída de tensión producida en su funcionamiento.

    - El ensayo se realiza a velocidad y corriente de inductor fijas.

En concreto, en esta práctica se van a realizar tres ensayos actuando la máquina como generador. Dichos ensayos son los descritos a continuación.

### 3.3.1 GENERADOR EN VACÍO Y SIN EXCITACIÓN

Se trata de ver cómo, al variar la velocidad de arrastre del motor de inducción o asíncrono y, por lo tanto, la velocidad de giro del rotor del motor de CC, se genera una tensión en la máquina CC.

Para ello, basta con arrastrar el generador CC con el motor de inducción (o asíncrono) para tres valores de velocidades de giro diferentes y medir la tensión que se genera en la máquina de continua. Se representará la relación que expresa la tensión generada en función de la velocidad de giro.

### 3.3.2 GENERADOR EN VACÍO CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

En este caso, vamos a comprobar la variación que experimenta la tensión suministrada por el generador cuando varía la tensión aplicada al bobinado inductor mediante una fuente de alimentación externa.

Al igual que en el ensayo anterior, se realizará para tres valores de tensión diferentes y manteniendo constante la velocidad de giro del conjunto. Los valores de tensión a aplicar serán de 5, 15 y 25 voltios, y se deberá medir con un polímetro el valor de la tensión

generada para cada caso, representando posteriormente la curva que muestra la relación entre ambas magnitudes.

### 3.3.3 GENERADOR CON CARGA Y EXCITACIÓN EN PARALELO

En este último ensayo como generador se trata de ver la relación existente entre la tensión suministrada por el generador y la carga eléctrica que se encuentre conectada a la salida del generador.

Este ensayo se realizará con la máquina con excitación en paralelo o derivación y manteniendo constante la velocidad de giro del conjunto. Se variará únicamente el valor del reóstato que se encuentre conectado, midiendo en cada caso los valores de la tensión generada por la máquina y la intensidad que circula por la carga (mediante un voltímetro y un amperímetro). Posteriormente se representará la curva que muestra la relación entre ambas magnitudes.

## **3.4 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO COMO MOTOR**

El par electromagnético de un motor de CC viene dado por la expresión que ya se conoce:

$$T_{mg} = \frac{PZ}{2\pi 2c} \phi_p I_i = \frac{pZ}{2\pi c} \phi_p I_i = K_T I_i \phi_p$$

Para comprobar que el par anterior es función de la corriente de inducido y del flujo por polo, se va a estudiar la variación de dicho par en conexión derivación y serie.

### 3.4.1 ESTUDIO DEL PAR MOTOR CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Con el esquema del motor en excitación independiente se va a realizar el siguiente ensayo:

#### **3.4.1.1 Par Motor Proporcional a la Corriente de Inducido cuando el Flujo por Polo es Constante**

Para demostrar esto se va a realizar el siguiente ensayo: Se aplica al motor una tensión de 30 voltios con las dos fuentes de alimentación, conectándolas una al inductor y la otra al inducido.

La máquina comenzará a girar a un determinado número de revoluciones por minuto que serán algo menores que la velocidad nominal (1500 rpm), ya que la tensión aplicada ha sido también un poco más baja. Una vez hecho esto no se volverá a tocar la

alimentación (esto supone que los distintos ensayos se van realizar a intensidad de excitación  $I_e$  constante).

Posteriormente, con el motor en vacío se va aplicando al motor un par resistente (utilizando el freno), con lo que la velocidad a la que girará la máquina irá cambiando en función del par externo que le apliquemos. Se miden entonces la corriente en el inducido, la tensión y la velocidad  $n$ . Esto se debe realizar para 3 casos distintos. Bastará con actuar sobre el freno hasta conseguir disminuciones de 15 rpm en la velocidad de la máquina para cada caso. Con los datos obtenidos de los aparatos de medida se pueden calcular las siguientes magnitudes:

- Par útil:  $T_u$
- Potencia útil:  $P_u = T_u n$
- Potencia Eléctrica Absorbida:  $P_E = V I$
- Rendimiento:  $\eta = P_u/P_E$

Una vez obtenidos estos valores se procederá a la representación de  $I_i$  y  $T_m$  en una gráfica, dando lugar a una recta.

### 3.4.2 ESTUDIO DEL PAR MOTOR CON EXCITACIÓN EN SERIE

Se trata de comprobar el gran par de arranque de este tipo de máquinas y cómo afecta la excitación de la máquina a la velocidad de giro.

Se alimentará la máquina con una corriente de excitación de unos 5 A y se medirán los valores de velocidad e intensidad en el inducido. Posteriormente se tomarán otros dos casos distintos disminuyendo la corriente de excitación, y se volverán a tomar las medidas correspondientes. **Es muy importante tener en cuenta que para la realización de este ensayo los valores a aplicar para la corriente  $I_e$  deben estar comprendidos entre 5 y 3 A.**

En este ensayo hay que tener mucho cuidado en no disminuir en exceso el par de frenado, pues la velocidad podría ser muy elevada y dañar la máquina. Por ello, se recomienda aplicar tensiones pequeñas y tener siempre carga en el freno, además de asegurar siempre un valor conveniente para la excitación de la máquina.

## **3.5 ESTUDIO DE LA VELOCIDAD**

La velocidad de giro de un motor de Corriente Continua tiene por expresión:

$$n = \frac{V - R_i I_i}{K_E \phi_p}$$

### 3.5.1 INFLUENCIA DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

Puesto que  $E_i = V - R_i I_i$ , si mantenemos el flujo constante la velocidad dependerá linealmente de  $E_i$ , ya que:

$$n = \frac{E_i}{K_E \phi_p}$$

Para comprobar este tipo de funcionamiento, se alimentará el motor en conexión independiente y se dejará que gire en vacío. Manteniendo constante la tensión de excitación, se procederá a variar la tensión de inducido para tres casos distintos y se medirán los valores de la intensidad de inducido  $I_i$  y velocidad  $n$  en cada caso. Las parejas de valores de tensión y velocidad deben formar una recta.

Para determinar el valor de la corriente de inducido en cada caso en el ensayo, será necesario colocar un amperímetro, ya que la fuente de alimentación no es muy precisa en esta prueba para determinar la magnitud de la corriente.

### 3.5.2 INFLUENCIA DEL FLUJO POR POLO

Según la expresión anterior, se puede modificar la velocidad de giro,  $n$ , modificando el flujo por polo, que depende de los amperios-vuelta del circuito inductor ( $N_e I_e$ , siendo  $N_e$  el número de espiras del bobinado de inductor).

En el ensayo, variaremos  $I_e$  mediante la modificación de la tensión de excitación aplicada. Para ello, se alimenta la máquina con excitación independiente a 30 V y se va disminuyendo la tensión de excitación tomando para cada caso los valores de corrientes, velocidad de giro y tensiones.

Al disminuir la tensión de excitación,  $I_e$  también disminuye, disminuyendo a su vez el flujo  $\phi_p$ . De la expresión anterior se deduce que, si el flujo es menor, el motor girará más rápido. Si la carga del motor permanece constante, cada disminución de  $I_e$  (es decir, de  $\phi_p$ ) originará un aumento de  $n$ .

Para observar esto, se tomarán 3 valores de  $I_e$ , y se medirán los valores de  $I_i$ ,  $n$  y la tensión aplicada.

Téngase en cuenta que al realizar este ensayo es posible que al modificar la velocidad de trabajo del motor se desajuste el freno, por

lo que deberá revisarse para que en todo momento se mantenga el valor del par resistente (conviene empezar con excitación nominal y no bajar a valores de  $I_e$  que provoquen embalamiento excesivo del motor).

**¡¡MUY IMPORTANTE!!**

**En este ensayo no se debe disminuir la tensión de excitación por debajo de los 15 V, ya que se produce un embalamiento excesivo de la máquina.**

## 4 ESQUEMAS EXPERIMENTALES

### 4.1 MEDIDA DE RESISTENCIAS

$R_e (\Omega)$	$R_{sh} (\Omega)$	$R_i (\Omega)$

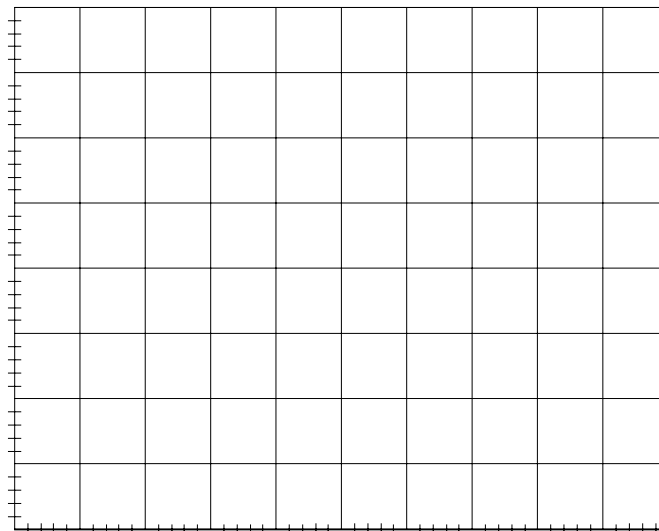
### 4.2 ENSAYO DE ROZAMIENTO

Este ensayo no hace falta repetirlo puesto que se realizó en la práctica 2.

### 4.3 COMPORTAMIENTO COMO GENERADOR

#### 4.3.1 GENERADOR EN VACÍO Y SIN EXCITACIÓN

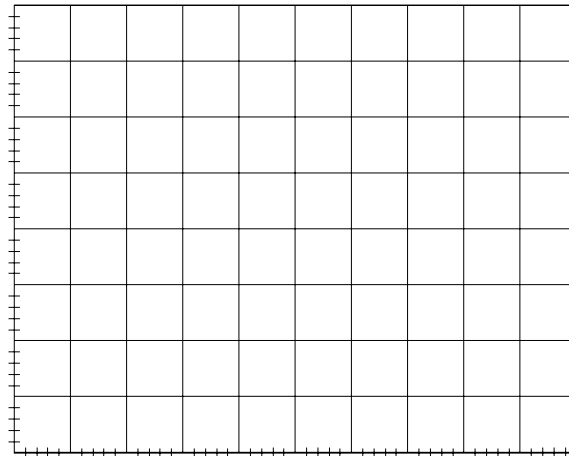
$E_i (V)$	$n (rpm)$



Representación de la tensión generada en función de "n"

4.3.2 GENERADOR EN VACÍO CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

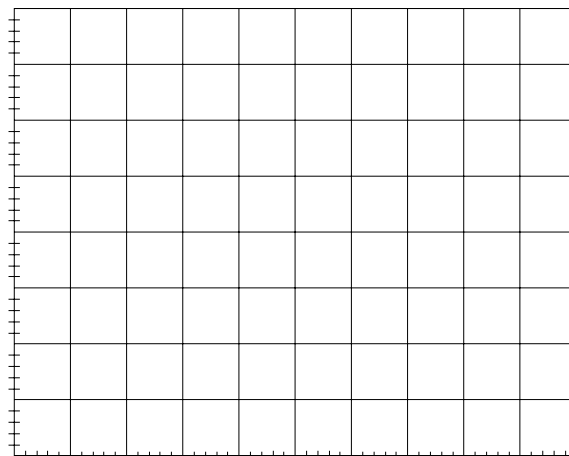
<b><math>E_i</math> (V)</b>	<b><math>V_e</math> (V)</b>



Representación de la tensión generada en función de  $V_e$

4.3.3 GENERADOR CON CARGA Y EXCITACIÓN EN PARALELO

<b><math>V_i</math> (V)</b>	<b><math>I_i</math> (A)</b>



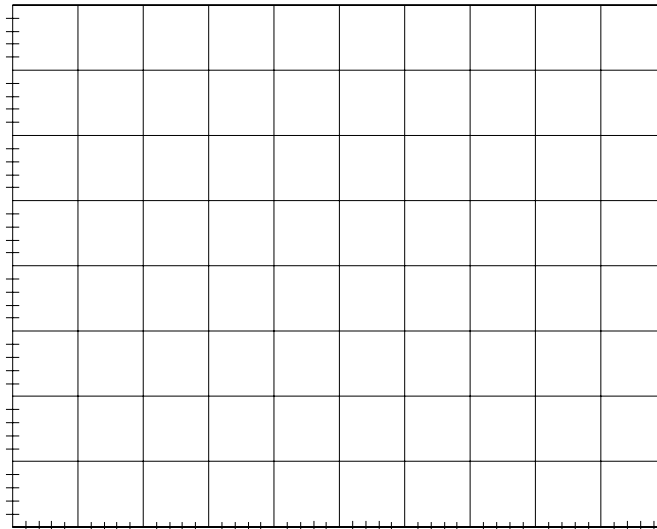
Representación de la tensión generada en función de  $I_i$

### 4.4 COMPORTAMIENTO COMO MOTOR

#### 4.4.1 ESTUDIO DEL PAR MOTOR CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

MEDIDAS EXPERIMENTALES					
$V_e$ (V)	$V_i$ (V)	$I_e$ (A)	$E_i$ (V)	$I_i$ (A)	n (rpm)

CÁLCULOS			
$T_u$ (Nm)	$P_u$ (W)	$P_{mg}$ (W)	$\eta$

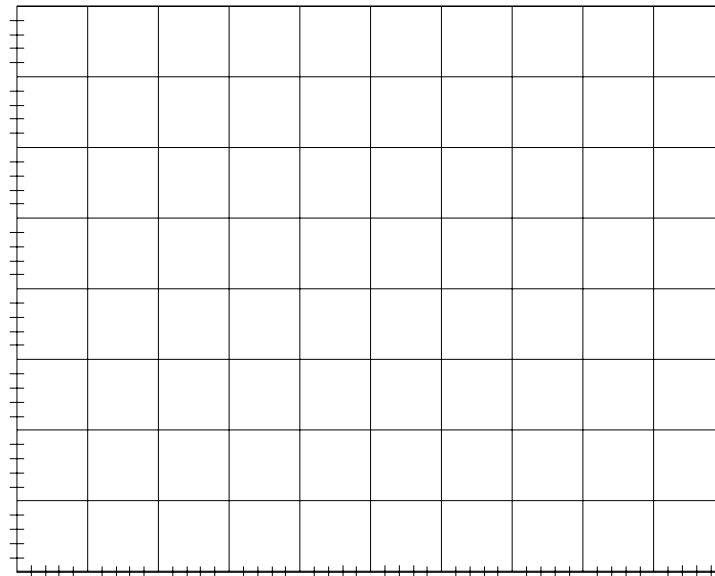


Representación del par en función de  $I_a$

4.4.2 ESTUDIO DEL PAR MOTOR CON EXCITACIÓN EN SERIE

<b>MEDIDAS EXPERIMENTALES</b>					
<b><math>V_e</math> (V)</b>	<b><math>V_i</math> (V)</b>	<b><math>I_e</math> (A)</b>	<b><math>E_i</math> (V)</b>	<b><math>I_i</math> (A)</b>	<b>n (rpm)</b>

<b>CÁLCULOS</b>			
<b><math>T_u</math> (Nm)</b>	<b><math>P_u</math> (W)</b>	<b><math>P_{mg}</math> (W)</b>	<b><math>\eta</math></b>



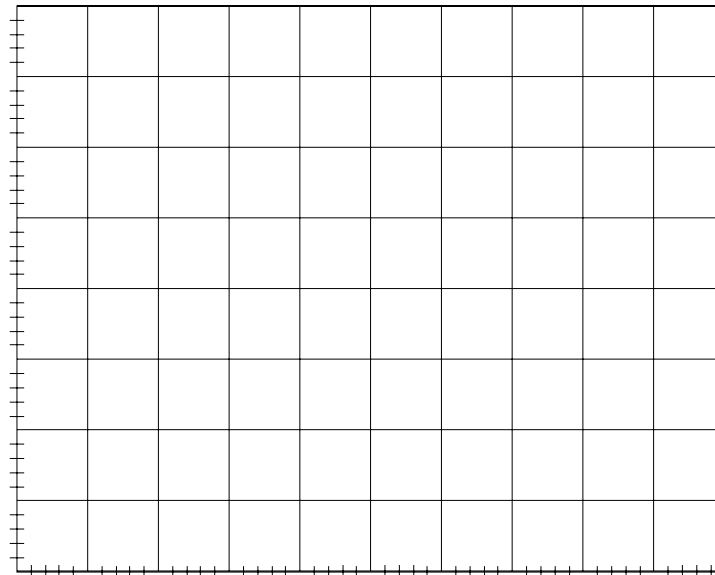
Representación del par (T) en función de  $I_e$

### 4.5 ESTUDIO DE LA VELOCIDAD

#### 4.5.1 INFLUENCIA DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

MEDIDAS EXPERIMENTALES					
$V_e$ (V)	$V_i$ (V)	$I_e$ (A)	$E_i$ (V)	$I_i$ (A)	n (rpm)

CÁLCULOS			
$T_u$ (Nm)	$P_u$ (W)	$P_{mg}$ (W)	$\eta$

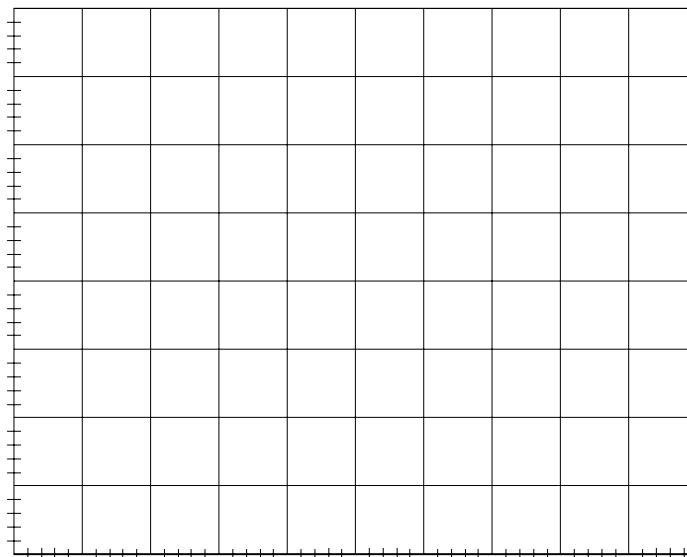


Velocidad n (rpm) en función de  $V_i$

4.5.2 INFLUENCIA DEL FLUJO POR POLO

<b>MEDIDAS EXPERIMENTALES</b>					
<b><math>V_e</math> (V)</b>	<b><math>V_i</math> (V)</b>	<b><math>I_e</math> (A)</b>	<b><math>E_i</math> (V)</b>	<b><math>I_i</math> (A)</b>	<b>n (rpm)</b>

<b>CÁLCULOS</b>			
<b><math>T_u</math> (Nm)</b>	<b><math>P_u</math> (W)</b>	<b><math>P_{mg}</math> (W)</b>	<b><math>\eta</math></b>



Velocidad n(rpm) en función de  $I_e$

## **5 MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO**

Para realizar los montajes descritos es suficiente con los siguientes elementos:

- **1** Motor de Corriente Continua
- **1** Motor Asíncrono de arrastre del motor de CC
- **2** Polímetros (1 Amperímetro y 1 Voltímetro)
- **1** Reóstato
- **2** Fuentes de Alimentación

## **6 PAUTAS DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

Para realizar la práctica y poder evaluar los conocimientos adquiridos en su desarrollo, es preciso tener en cuenta lo siguiente:

- La práctica consiste en realizar los montajes descritos en los apartados previos anotando las indicaciones de los diferentes aparatos de medida en las casillas de las tablas que aparecen en el apartado 4 de este guión. Las casillas sombreadas en color gris que aparecen en las tablas de este guión corresponden a los cálculos que hay que realizar con los datos obtenidos experimentalmente, que se colocarán en las casillas en blanco. Asimismo, deberán representarse gráficamente las curvas que se piden en los recuadros dispuestos en el mismo apartado
- La forma de realizar cada ensayo, los resultados experimentales obtenidos y cómo se llevan a cabo los cálculos serán la base de las preguntas del examen de laboratorio.
- No hay que entregar memoria de la práctica.