



*UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**



**DOCUMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA  
DE LABORATORIO:  
ALTERNADORES SÍNCRONOS  
AISLADOS**

**Miguel Angel Rodríguez Pozueta**

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

*This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.*



*Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.*

*Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor:*  
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

## PRÁCTICA DE LABORATORIO: ALTERNADORES SÍNCRONOS AISLADOS

*Miguel Angel Rodríguez Pozueta*

### 1.- CIRCUITO A MONTAR

En esta práctica se utilizará un grupo de máquinas acopladas al mismo eje. Una es la máquina síncrona (de 4 polos salientes) a estudiar y la otra es una máquina de corriente continua shunt, que actúa como motor cuando la máquina síncrona funciona como generador y como freno si la máquina síncrona funciona como motor. Además, también se acoplará al grupo una tacodinamo o un encoder para medir la velocidad de giro. Los circuitos eléctricos de las máquinas síncrona y de corriente continua se muestran en las figuras de las páginas finales de este texto.

El inductor de la máquina síncrona está alimentado con corriente continua mediante una fuente de tensión variable, la cual, junto con un reóstato  $R_{rege}$  conectado en serie, permite regular su corriente de excitación.

El inducido, conectado en triángulo, se puede conectar a la red mediante el interruptor I1 o a una carga mediante el interruptor I2. No se deben cerrar los dos interruptores simultáneamente.

Existe una serie de aparatos de medida en el inducido de la máquina síncrona que permiten realizar varias medidas y ensayos: un *amperímetro* (para medir la corriente de línea en el inducido), un *fasímetro* (para medir su factor de potencia), un *voltímetro* (para medir la tensión de línea en el inducido) y dos *vatímetros monofásicos* (para medir las potencias activa y reactiva).

El fasímetro utilizado es monofásico y tal como se conecta permite medir el factor de potencia de un sistema trifásico equilibrado.

Uno de los vatímetros monofásicos (el recorrido por la corriente de la fase S) está conectado de tal manera que mide la potencia reactiva si la carga es equilibrada. Mediante este aparato la potencia reactiva de la carga se calcula así:

$$Q = \sqrt{3} K_W Q_E$$

donde  $Q_E$  es la lectura realizada sobre el vatímetro, medida en divisiones de su escala, y  $K_W$  es su constante de medida (medida en W/división).

El otro vatímetro monofásico está conectado de tal manera que mide la potencia activa cuando la carga es equilibrada. Mediante este aparato la potencia activa de la carga se calcula así:

$$P = 3 K_W P_E$$

donde  $P_E$  es la lectura realizada sobre el vatímetro, medida en divisiones de su escala, y  $K_W$  es su constante de medida (medida en W/división).

Otros aparatos de medida conectados al inducido de la máquina síncrona y a la red permiten realizar la maniobra de *sincronización* de la máquina para acoplarla a la red. Estos aparatos son *voltímetros* y *frecuencímetros* de la máquina y de la red, *voltímetro de cero* (que mide la diferencia entre tensiones homólogas de la máquina y de la red) y *sincronoscopios*.

## **2.- DESIGNACIÓN DE BORNES**

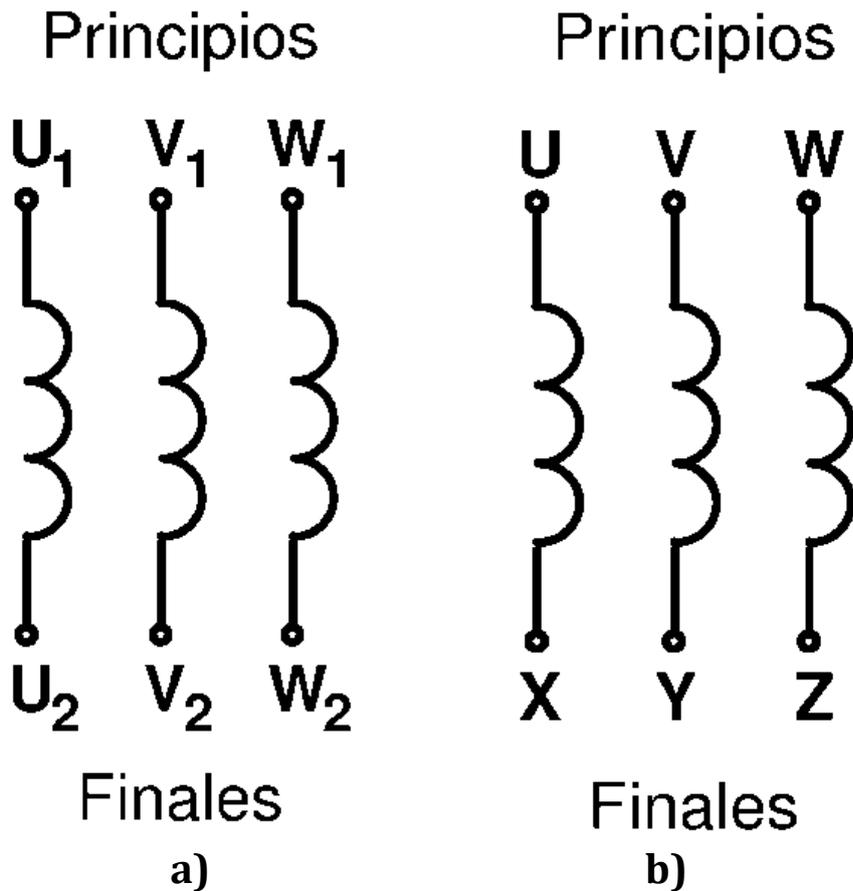
La norma UNE EN 60034-8 ha introducido una serie de modificaciones en el marcado de los bornes de los devanados de las máquinas eléctricas rotativas.

Según esta norma, cada devanado, fase de devanado o circuito auxiliar se identifica con una o dos letras y sus bornes se designan por esta letra más un subíndice numérico. Los bornes extremos se identifican con el subíndice 1 en el principio del devanado y con el subíndice 2 en el final.

Así, en el devanado inducido de una máquina síncrona trifásica (usualmente ubicado en el estator) las tres fases se denominan con las letras **U, V y W**. Por lo tanto, los bornes del devanado serán **U<sub>1</sub>, V<sub>1</sub> y W<sub>1</sub>** en los principios de las fases y **U<sub>2</sub>, V<sub>2</sub> y W<sub>2</sub>** en los finales (Fig. 1a y tabla I). Antiguamente se utilizaban las letras **U, V y W** para los principios y **X, Y y Z** para los finales (Fig. 1b y tabla I).

*Tabla I: Denominación de los extremos de las fases de un devanado trifásico*

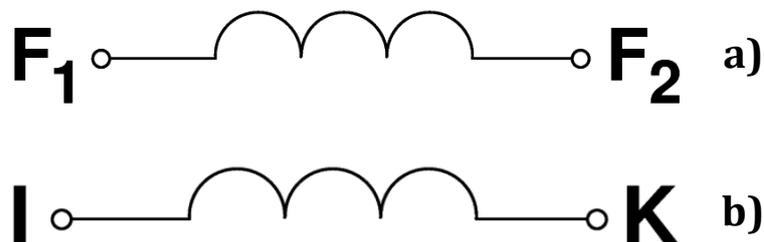
<b>NORMATIVA ACTUAL</b>			<b>NORMATIVA ANTERIOR</b>		
<b>Fases</b>	<b>Principios</b>	<b>Finales</b>	<b>Fases</b>	<b>Principios</b>	<b>Finales</b>
<b>L<sub>1</sub></b>	<b>U<sub>1</sub></b>	<b>U<sub>2</sub></b>	<b>R</b>	<b>U</b>	<b>X</b>
<b>L<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>S</b>	<b>V</b>	<b>Y</b>
<b>L<sub>3</sub></b>	<b>W<sub>1</sub></b>	<b>W<sub>2</sub></b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>Z</b>



*Fig. 1: Denominación de los bornes de un devanado inducido trifásico: a) denominación actual (UNE EN 60034-8); b) denominación antigua*

Por otra parte, los extremos del devanado inductor de una máquina síncrona (alimentado con corriente continua y usualmente ubicado en el rotor) se designan **F<sub>1</sub>** y **F<sub>2</sub>** (Fig. 2a). Antiguamente se utilizaban las letras **I** y **K** (Fig. 2b) para designar los extremos de este devanado.

En los circuitos representados en las figuras del final de este texto se ha utilizado la designación antigua. El lector puede adaptar estas figuras a la designación actual teniendo en cuenta las Figs. 1 y 2 y la Tabla I.



*Fig. 2: Devanado inductor de una máquina síncrona:  
a) denominación actual (UNE EN 60034-8); b) denominación antigua*

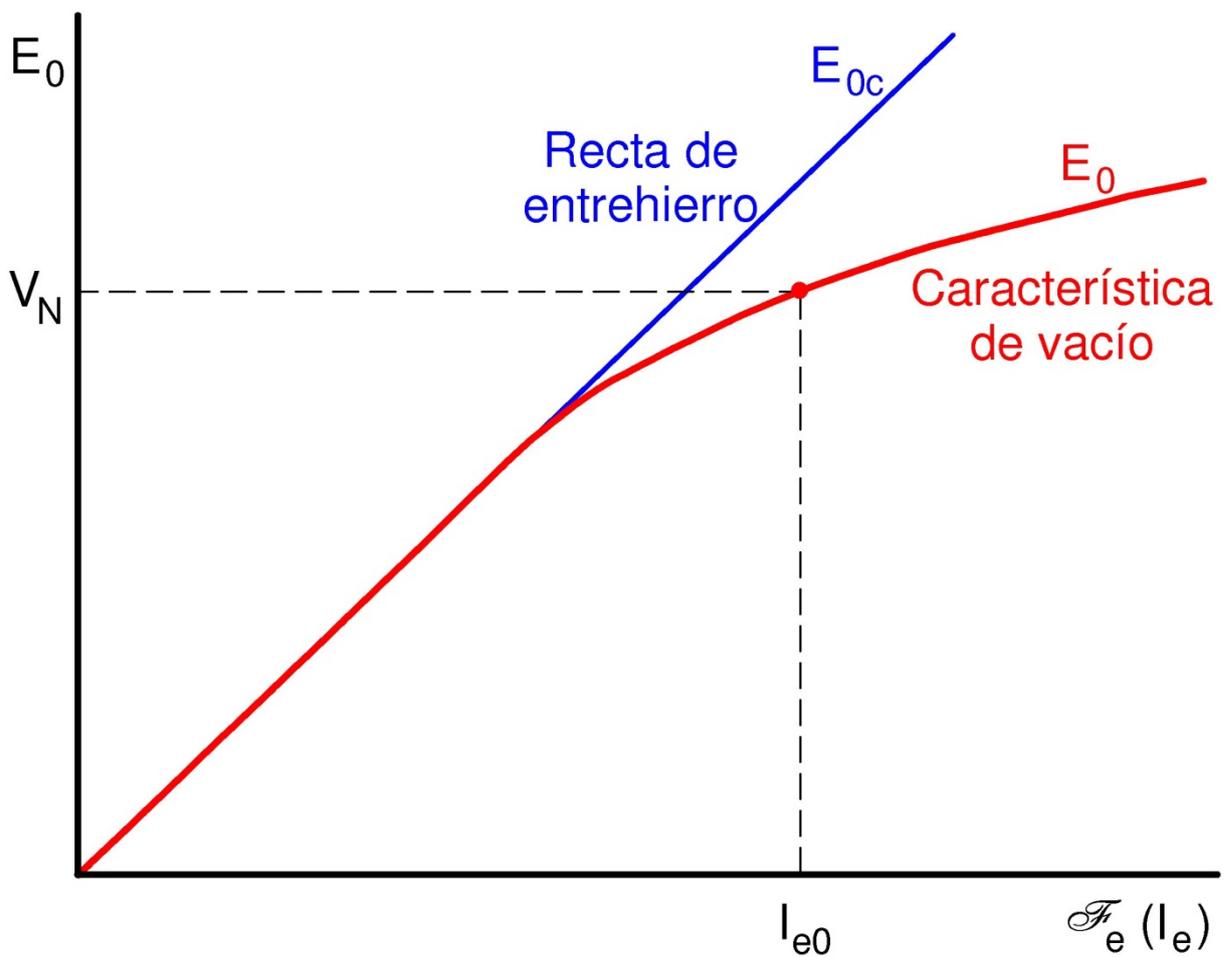
### 3.- MEDIDAS Y ENSAYOS

Se empezará midiendo la resistencia de cada una de las tres fases del devanado inducido de la máquina síncrona utilizando un polímetro o un puente de Wheatstone. Las medidas se realizan en frío, por lo que las resistencias durante el funcionamiento de la máquina se calcularán afectando de un coeficiente de temperatura  $K_{\theta}$  a los valores medidos. El valor que se usará como resistencia del inducido será la media de la resistencia de sus tres fases.

A continuación, se pondrá en marcha el motor de corriente continua y se dejará a la máquina síncrona actuando como alternador aislado (sin conectar en paralelo con ningún otro ni con la red). Esto permitirá observar los efectos de variar la corriente de excitación y de la velocidad en esta forma de funcionamiento de la máquina síncrona.

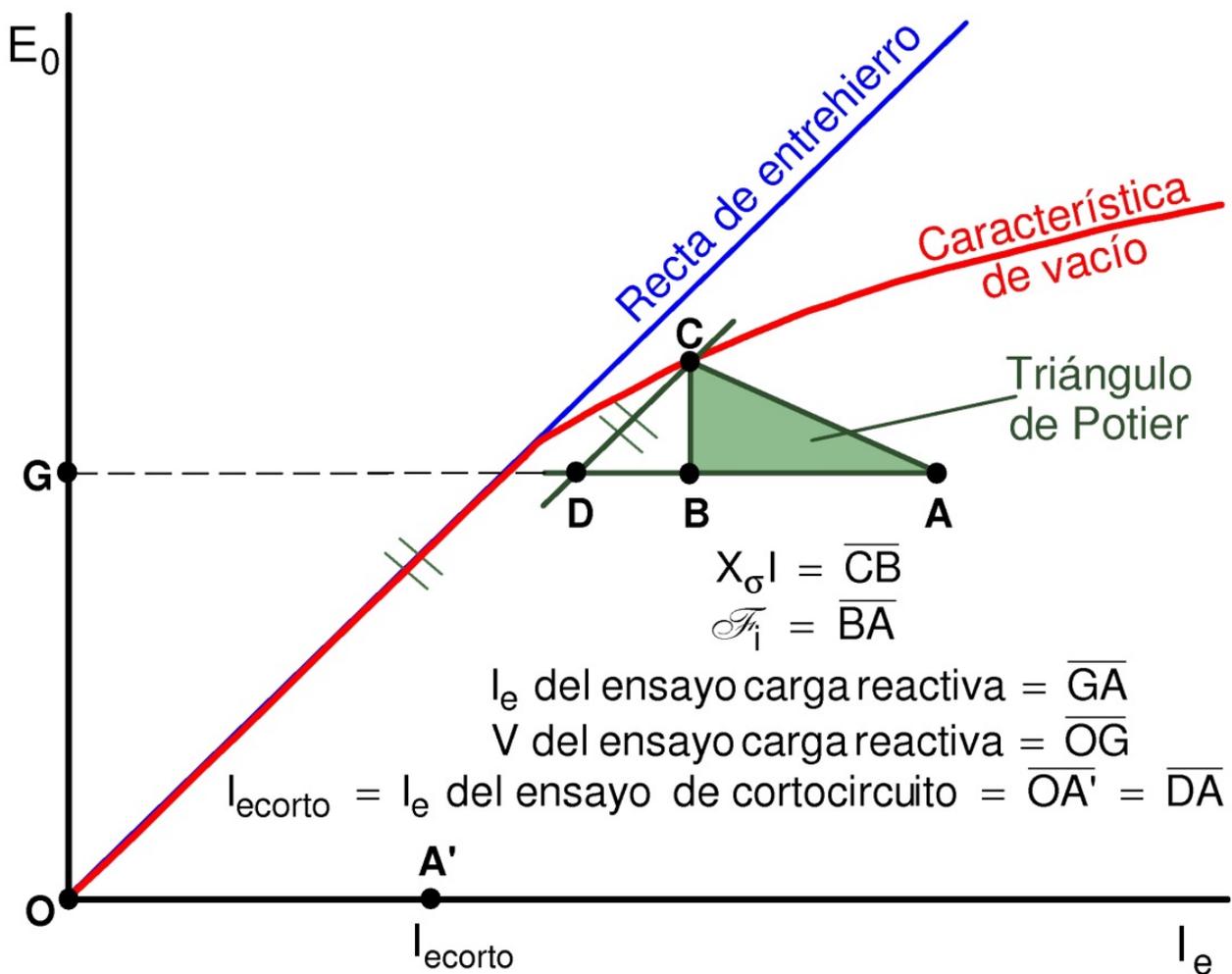
Se continuará realizando los *ensayos de vacío, de cortocircuito y de carga reactiva* (o de *factor de potencia nulo*) de la máquina síncrona. El ensayo de vacío se realizará dos veces; una aumentando la excitación desde cero y otra bajando la excitación desde su valor máximo hasta cero. La curva de vacío que se utilizará será la media entre las dos obtenidas para eliminar el efecto de la histéresis magnética. Los ensayos de cortocircuito y de carga reactiva se realizarán a la intensidad asignada.

Seguidamente a esta máquina síncrona funcionando como alternador aislado a través del interruptor I2 se le conectarán cargas de tipo resistivo, inductivo y capacitivo para observar el efecto de la *reacción de inducido*.

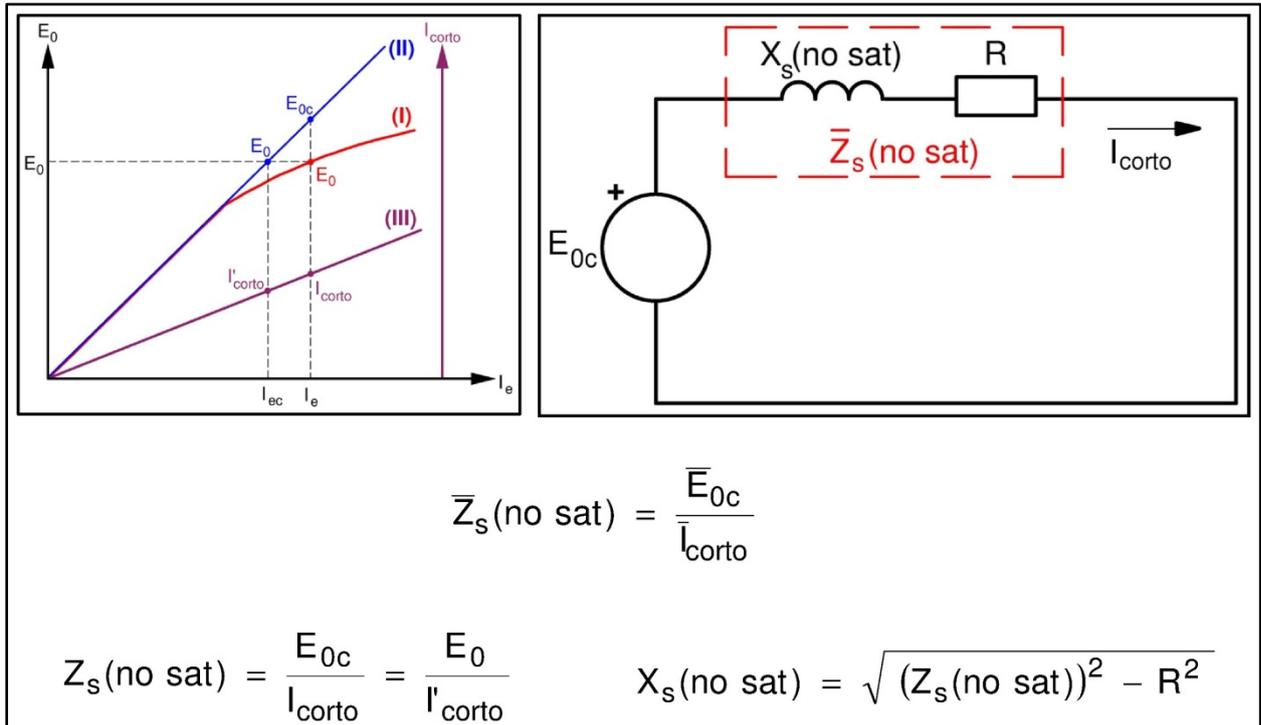


*Fig. 3: Característica de vacío y recta de entrehierro*

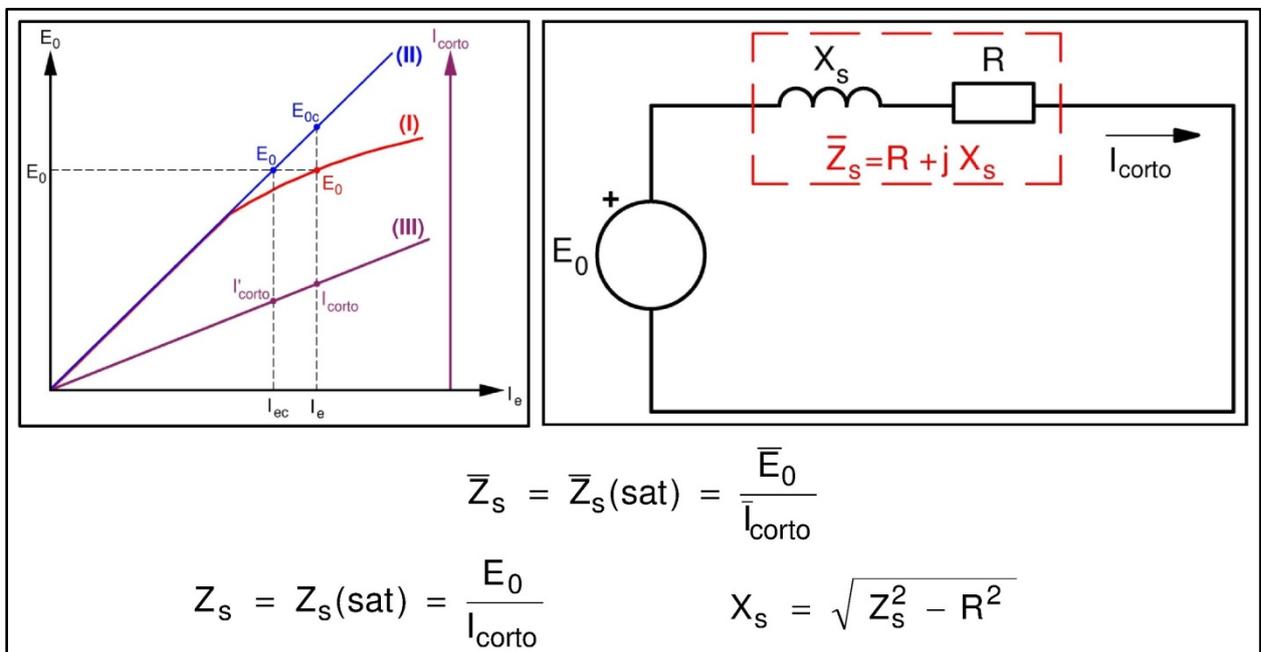
Con los resultados de los ensayos anteriores se puede representar la *característica de vacío* junto con la *recta de entrehierro* (Fig. 3), dibujar el *triángulo de Potier* (ver la Fig. 4) para una intensidad de inducido igual a la asignada -lo que permite determinar la *reactancia de dispersión*  $X_{\sigma}$  (realmente lo que se obtiene es la *reactancia de Potier*  $X_P$  que tiene un valor casi igual a  $X_{\sigma}$ ) y la f.m.m. longitudinal  $\mathcal{F}_d$ , obtener la corriente de excitación  $I_{e0}$  -que proporciona la tensión asignada en vacío- y calcular la *reactancia síncrona longitudinal*  $X_d$  (*no saturada* y *saturada*) (ver las Figs. 5 y 6) para un valor de  $I_e$  igual a  $I_{e0}$ . En estos cálculos se trabajará con valores de tensión e intensidad de fase, por lo que hay que tener presente la forma de conexión de la máquina. En el cálculo de la reactancia síncrona longitudinal se tendrá en cuenta la resistencia del inducido medida al principio de la práctica.



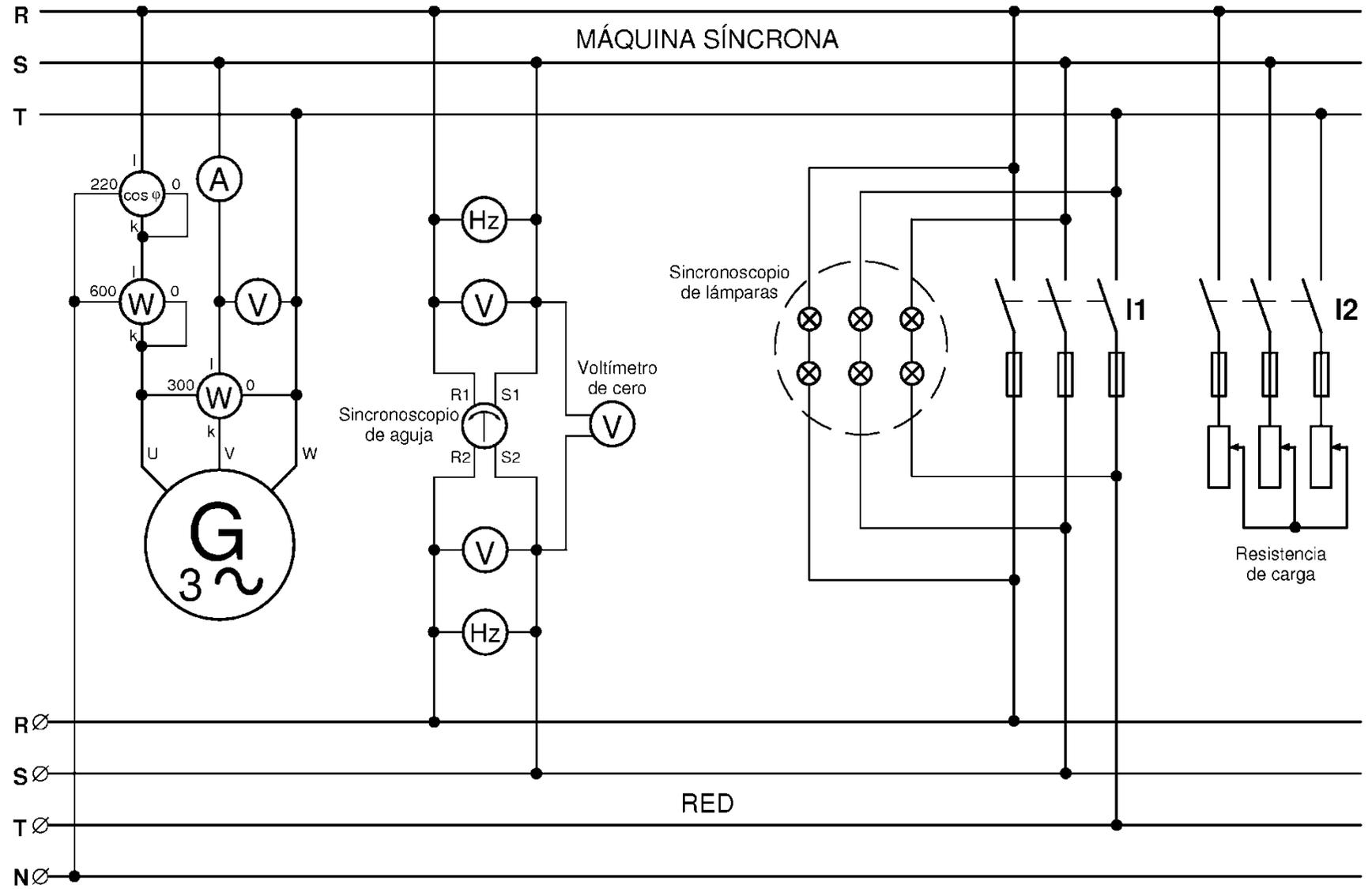
*Fig. 4: Obtención del triángulo de Potier*



*Fig. 5: Obtención de la reactancia síncrona no saturada en un máquina de rotor cilíndrico (Para una máquina de polos salientes este método sirve para calcular  $X_d(\text{no sat})$ )*



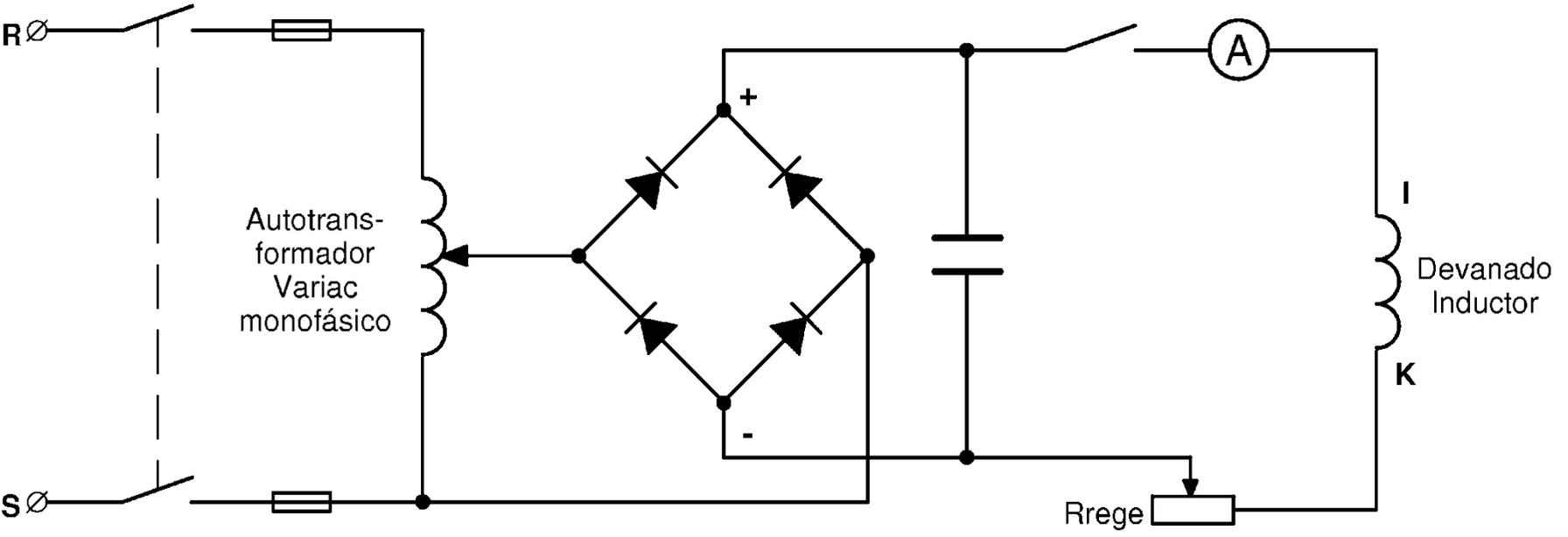
*Fig. 6: Obtención de la reactancia síncrona saturada en un máquina de rotor cilíndrico (Para una máquina de polos salientes este método sirve para calcular  $X_d$ )*



M.A.R. Pozueta

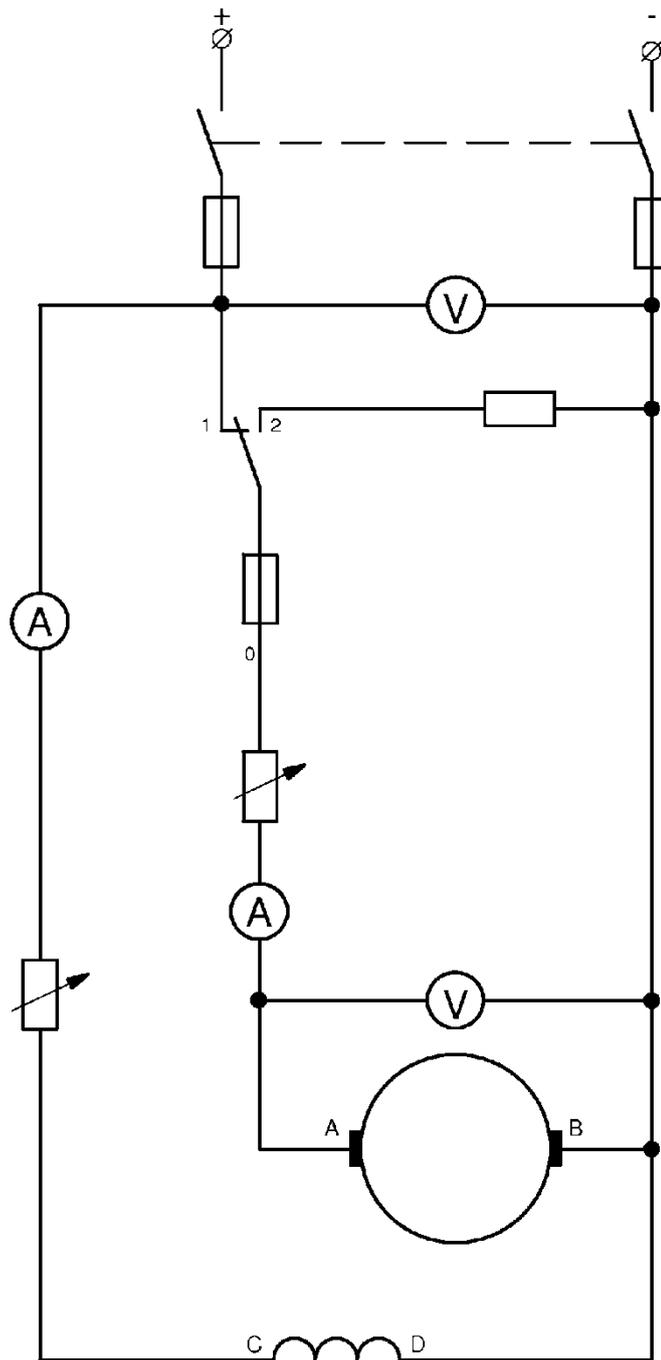
-8-

<b>UNIVERSIDAD DE CANTABRIA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA</b> <b>ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA</b>	<b>ENSAYO DE UNA MÁQ. SÍNCRONA.</b> <b>CIRCUITO CON LAS CONEXIONES</b> <b>DEL ESTATOR</b>	Dibujado por Miguel Angel Rodriguez Pozueta 27 de Diciembre de 2007
---	---	---



Rrege = Reostato de regulación del inductor

<b>UNIVERSIDAD DE CANTABRIA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA</b> <b>ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA</b>	<b>ENSAYO DE UNA MÁQ. SÍNCRONA.</b> <b>CIRCUITO CON LAS CONEXIONES</b> <b>DEL ROTOR</b>	Dibujado por Miguel Angel Rodríguez Pozueta 20 de Diciembre de 2011
---	---	---



Posiciones del conmutador:  
 1: Motor  
 2: Freno

<b>UNIVERSIDAD DE CANTABRIA</b> <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA</b> <b>ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA</b>	<b>CIRCUITO DE LA MAQ. SHUNT</b> <b>ACTUANDO COMO MOTOR O FRENO</b>	Dibujado por Miguel Angel Rodríguez Pozueta 27 de Diciembre de 2007
---	--	---

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**

**Práctica de Laboratorio: MÁQUINAS SÍNCRONAS**

Nombre del alumno \_\_\_\_\_

Asignatura \_\_\_\_\_

Fecha de realización de la práctica \_\_\_\_\_ Grupo de prácticas: \_\_\_\_\_

\*\*\*\*\*

**Datos de la placa de características de la máquina síncrona**

<b>Referencia</b>		<b>Frecuencia asignada f (Hz)</b>	
<b>Tensión asignada V<sub>NL</sub> (V)</b>		<b>Intensidad asignada I<sub>NL</sub> (A)</b>	
<b>Velocidad asignada n<sub>1</sub> = n<sub>N</sub> (rpm)</b>		<b>Intensidad de excitación asignada I<sub>eN</sub> (mA)</b>	

**Características de los aparatos de medida empleados:**

Tipo de aparato	Magnitud que mide	Referen- cia	Sistema indi- cador	Clase de precisión	Alcances	Nº de divisiones de la escala	Ctes. de medida

(Recuerde que la magnitudes en **negrita** se obtienen durante el ensayo y las sin **negrita** se obtienen por cálculo a partir de los resultados de las medidas)

**Resistencia del inducido**

**Coficiente de corrección por temperatura =  $K_{\theta}$  = \_\_\_\_\_**

**$R_R =$  \_\_\_\_\_  $\Omega$**

**$R_S =$  \_\_\_\_\_  $\Omega$**

**$R_T =$  \_\_\_\_\_  $\Omega$**

$$R = K_{\theta} \frac{R_R + R_S + R_T}{3} = \text{_____ } \Omega$$

**Ensayo de vacío**

**Tipo de conexión: \_\_\_\_\_**

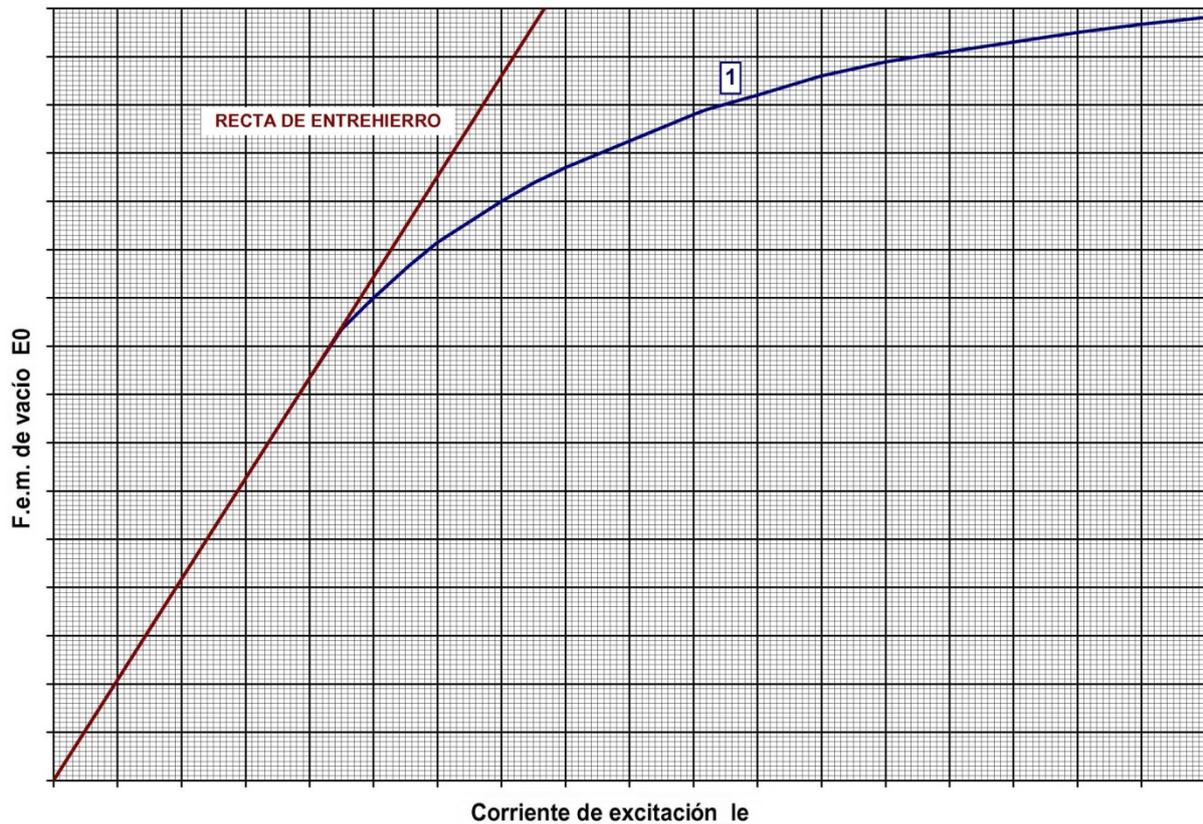
**Velocidad = \_\_\_\_\_ rpm**

**$V_{NL} =$  \_\_\_\_\_ V**

$$E_{0L} = \frac{E_{0L\uparrow} + E_{0L\downarrow}}{2}$$

( $E_0$  se obtiene de  $E_{0L}$  teniendo en cuenta la forma de conexión del inducido durante el ensayo)

<b><math>I_e</math> (mA)</b>	<b><math>E_{0L\uparrow}</math> (V)</b>	<b><math>E_{0L\downarrow}</math> (V)</b>	<b><math>E_0</math> (V)</b>



*Ejemplo de característica de vacío (1) y de recta de entrehierro de un alternador síncrono*

### Ensayo de cortocircuito

Tipo de conexión: \_\_\_\_\_

Velocidad = \_\_\_\_\_ rpm

$I_e =$  \_\_\_\_\_ mA

$I_{cortoL} =$  \_\_\_\_\_ A

$I_{corto} =$  \_\_\_\_\_ A

### Ensayo de carga reactiva o de factor de potencia nulo

Tipo de conexión: \_\_\_\_\_

Velocidad = \_\_\_\_\_ rpm

$I_e =$  \_\_\_\_\_ mA

$I_L =$  \_\_\_\_\_ A

$V_L =$  \_\_\_\_\_ V

$I =$  \_\_\_\_\_ A

$V =$  \_\_\_\_\_ V

## Reacción de inducido

Velocidad = \_\_\_\_\_ rpm

$I_e =$  \_\_\_\_\_ mA

	Vacío	Carga resistiva	Carga inductiva	Carga capacitiva
$I_L$ (A)	0			
$V_L$ (V)				

## Triángulo de Potier

Para  $I =$  \_\_\_\_\_ A se obtiene que:

$$\mathcal{F}_d = \text{_____ mA}$$

$$X_\sigma I = \text{_____ V}$$

$$X_\sigma = \text{_____ Ohms}$$

( $\mathcal{F}_d$  es la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) del inducido según el eje longitudinal (eje d) cuando la corriente según el eje d en cada fase del inducido tiene un valor eficaz igual a I).

## Reactancias síncronas longitudinales

Para  $I_{e0} =$  \_\_\_\_\_ mA se tiene que:

$$E_{0c} = \text{_____ V}$$

$$E_0 = \text{_____ V}$$

$$I_{\text{corto}} = \text{_____ A}$$

(Relación entre las intensidades de cortocircuito ( $I_{\text{corto}}$  e  $I'_{\text{corto}}$ ) correspondientes a dos valores distintos de la corriente de excitación  $I_e$  ( $I_e$  e  $I'_e$ ):  $I'_{\text{corto}} = I_{\text{corto}} \frac{I'_e}{I_e}$ )

$$Z_d(\text{no sat}) = \frac{E_{0c}}{I_{\text{corto}}} = \text{_____ } \Omega$$

$$Z_d(\text{sat}) = \frac{E_0}{I_{\text{corto}}} = \text{_____ } \Omega$$

$$X_d(\text{no sat}) = \sqrt{Z_d^2(\text{no sat}) - R^2} = \text{_____ } \Omega$$

$$X_d(\text{sat}) = \sqrt{Z_d^2(\text{sat}) - R^2} = \text{_____ } \Omega$$

**Observaciones:**