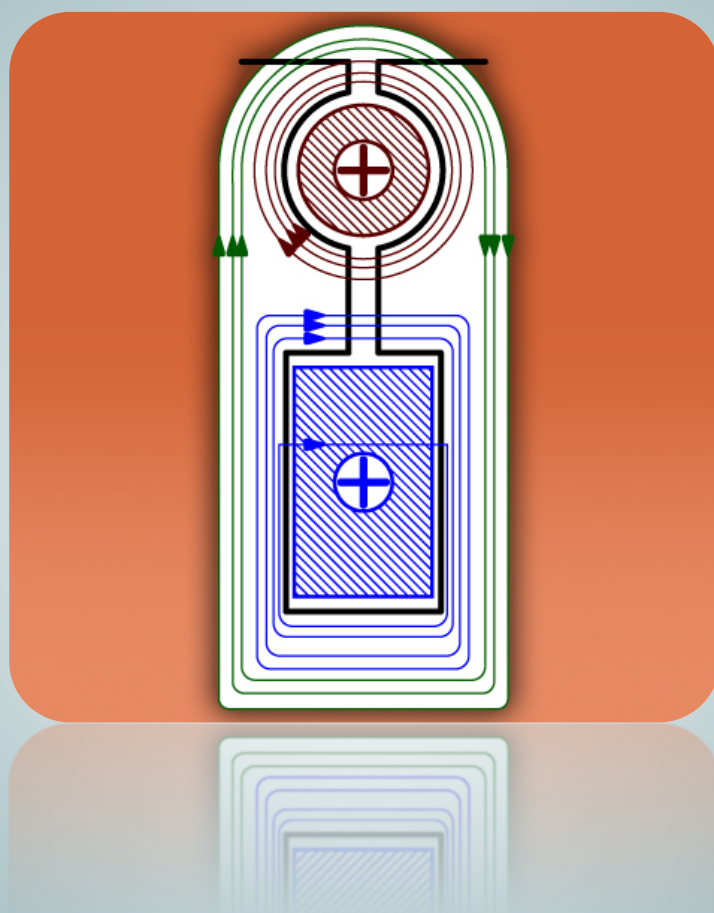


Máquinas Eléctricas II

Documentación de la práctica de laboratorio «Máquinas Síncronas»



Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

© 2018, 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: MÁQUINAS SÍNCRONAS

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*.

En este circuito se utilizarán dos sincronoscopios: uno de lámparas y otro de aguja, lo cual permitirá mostrar el funcionamiento de estos dos tipos de sincronoscopio.

2.- DESIGNACIÓN DE BORNES

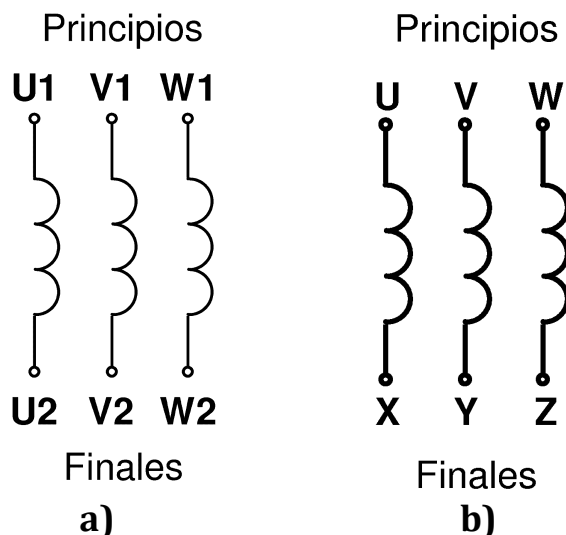
La norma UNE EN 60034-8 ha introducido una serie de modificaciones en el marcado de los bornes de los devanados de las máquinas eléctricas rotativas.

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 **U1, V1 y W1** en los principios de las fases y **U2, V2 y W2** 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

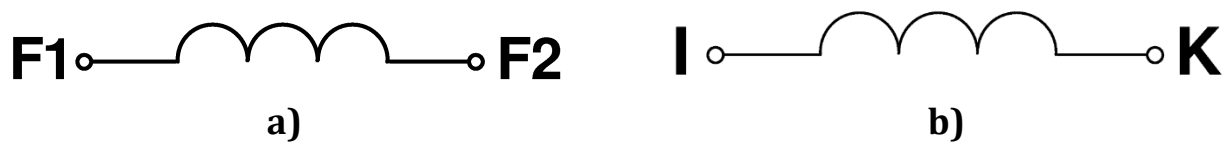
NORMATIVA ACTUAL			NORMATIVA ANTERIOR		
Fases	Principios	Finales	Fases	Principios	Finales
L1	U1	U2	R	U	X
L2	V1	V2	S	V	Y
L3	W1	W2	T	W	Z



*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 **F1 y F2** (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_θ 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 y de cortocircuito 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. El ensayo de cortocircuito se realizará a la intensidad asignada.

Con los resultados de los ensayos anteriores se puede dibujar la *característica de vacío* junto con la *recta de entrehierro* y calcular la *reactancia síncrona longitudinal* X_d (*no saturada* y *saturada* para un valor de I_e igual a I_{e0} ; es decir, la corriente de excitación que en vacío genera en el inducido la tensión asignada). 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.

Seguidamente se cerrará el interruptor I2 de forma que la máquina síncrona alimente una carga resistiva o inductiva y se obtendrá la característica exterior para factores de potencia unidad e inductivo. Después, a esta máquina síncrona funcionando como alternador aislado se le conectarán, a través del interruptor I2, cargas de tipo resistivo, inductivo y capacitivo para observar el efecto de la reacción de inducido.

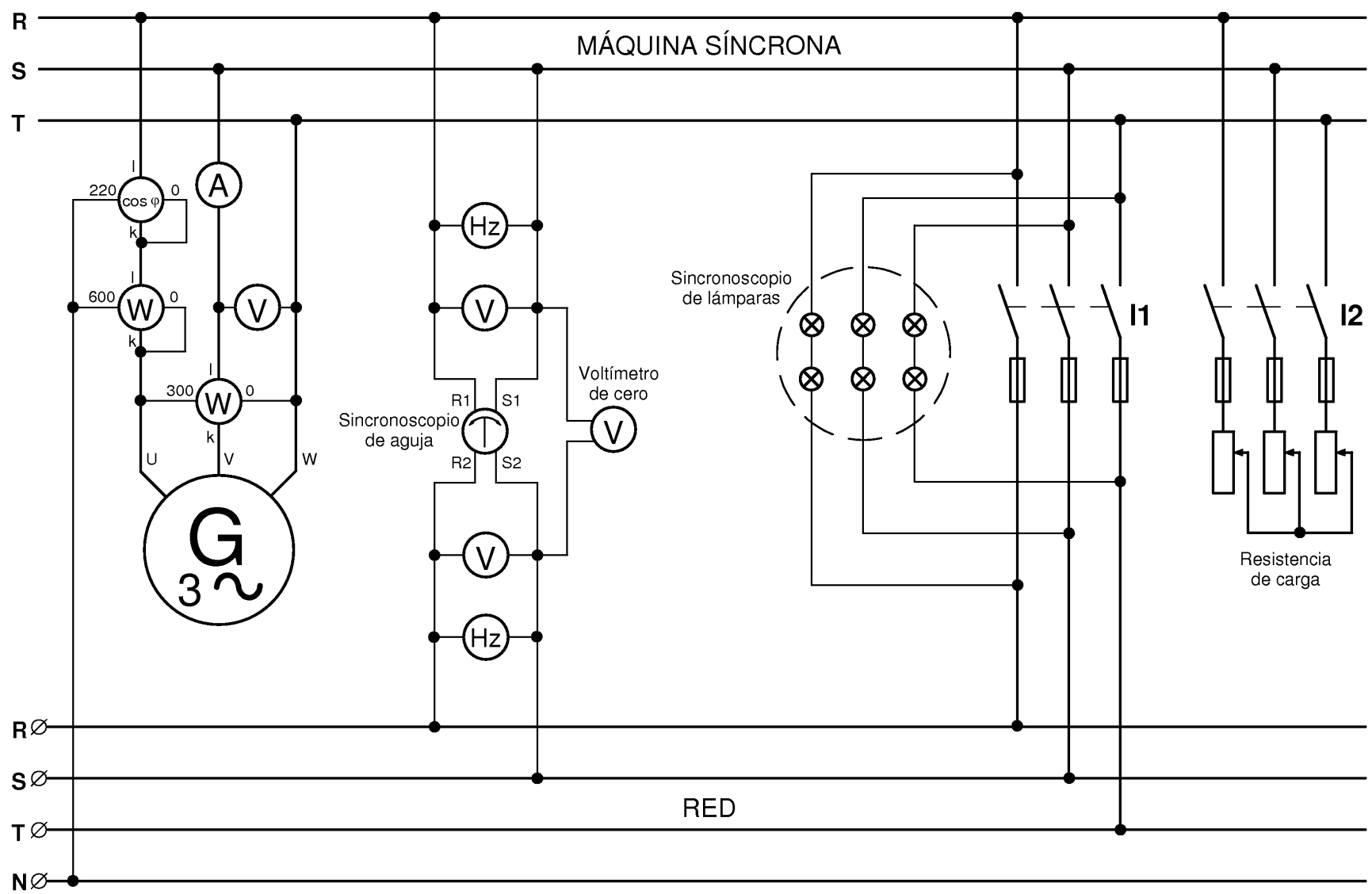
A continuación, se realizará la maniobra de sincronización y acoplamiento de la máquina a la red y se observará el comportamiento del alternador síncrono en estas condiciones y los efectos sobre la potencia reactiva y el factor de potencia al variar la corriente de excitación I_e .

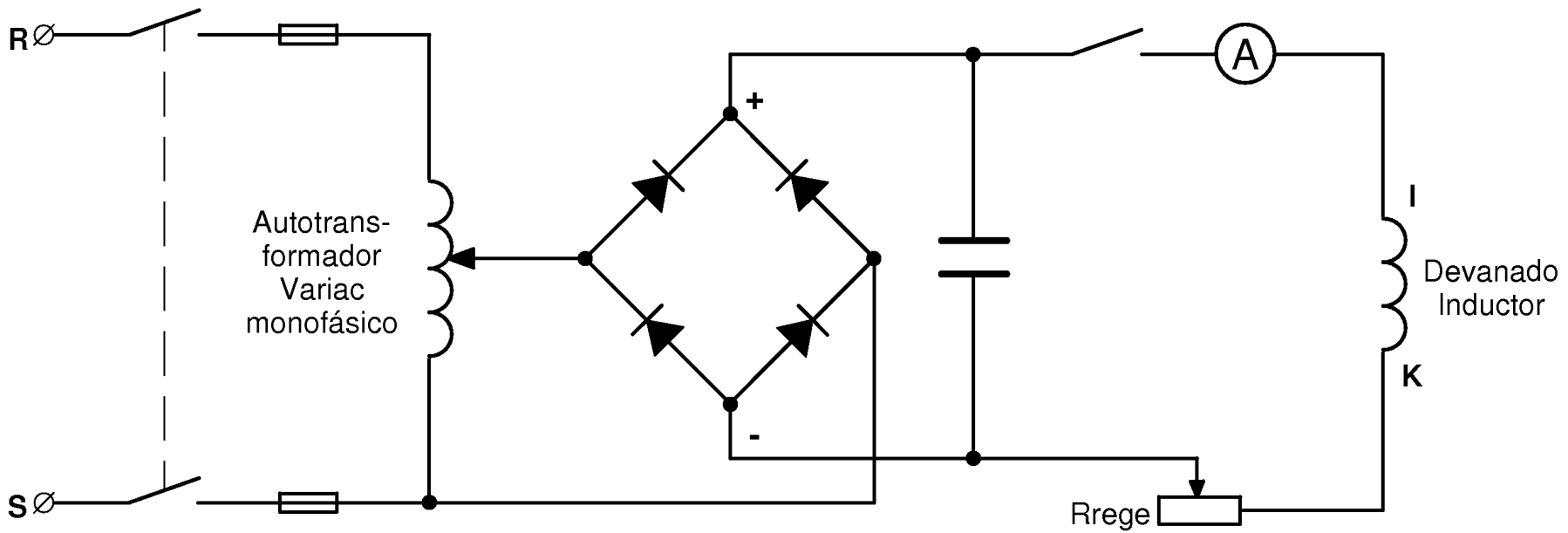
Seguidamente se desconectará el motor de corriente continua para que la máquina síncrona empiece a funcionar como motor y se obtendrá la curva de Mordey correspondiente al funcionamiento de esta máquina como motor en vacío.

Después, mediante una *lámpara estroboscópica* se mostrará la interpretación mecánica del ángulo de par cuando la máquina síncrona está conectada a una red de potencia infinita. Se mostrará el ángulo de par actuando la máquina como generador y como motor. Para ello se conectará la máquina de continua como motor y como freno, respectivamente.

4.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] AVTGIS, COUGHLIN y LOOMOS. *Manual de laboratorio para circuitos eléctricos*. Marcombo. Barcelona. 1976.
- [2] CHAPMAN. *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 2005.
- [3] CORRALES MARTIN. *Cálculo Industrial de máquinas eléctricas (2 tomos)*. Marcombo. Barcelona. 1982.
- [4] DPTO. TÉCNICO DISTESA. *Manuales Distesa: Máquinas II*. DISTESA. Madrid. 1976.
- [5] EQUIPO EPS ZARAGOZA. *Tecnología de Electricidad 4 instalaciones y líneas*. EDEBE. Barcelona. 1981.
- [6] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. *Prácticas de Electrotecnia*. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [7] FRAILE MORA. *Máquinas eléctricas (7ª edición)*. Ibergarceta Publicaciones, S.L. Madrid. 2015.
- [8] GURRUTXAGA. *El fenómeno electromagnético Tomo IV. Las máquinas eléctricas I y II*. Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander 1985.
- [9] PALACIOS BREGEL. *Prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas*. Paraninfo. Madrid. 1977.
- [10] SALAZAR. *Ingeniería eléctrica experimental*. Ed. Marcombo. Barcelona. 1973.
- [11] SANZ FEITO. *Máquinas eléctricas*. Pearson Educación. Madrid. 2002.
- [12] SUÁREZ CREO, J. M. Y MIRANDA BLANCO, B. N. 2006. *Máquinas eléctricas. Funcionamiento en régimen permanente*. Santiago de Compostela. Tórculo Edicions, S. L.





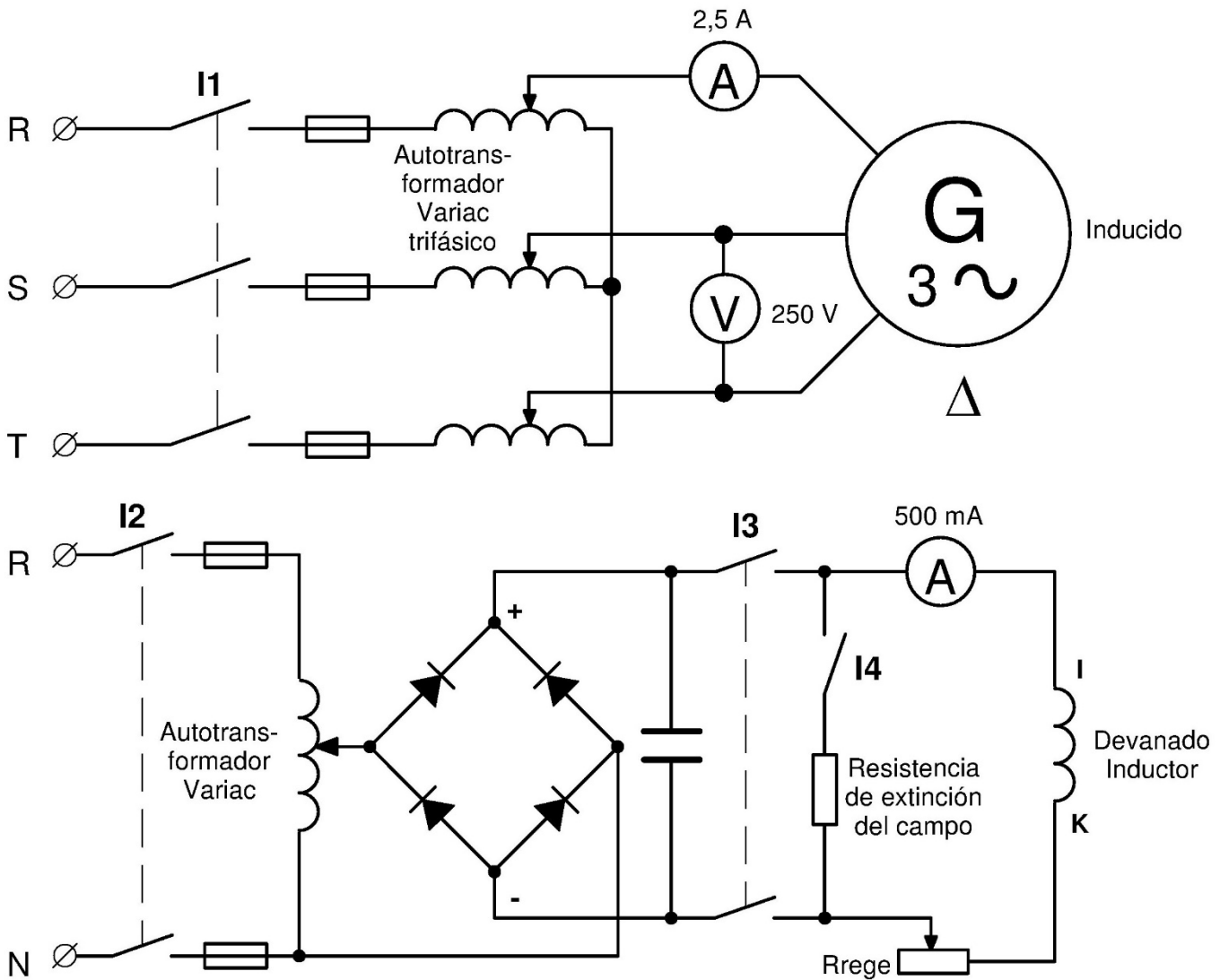
Rrege = Reostato de regulación del inductor

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

ENSAYO DE UNA MÁQ. SÍNCRONA.
CIRCUITO CON LAS CONEXIONES
DEL ROTOR

Dibujado por
Miguel Angel Rodríguez Pozueta
20 de Diciembre de 2011

1: Motor
2: Freno
0: Inducido desconectado



Arranque de un motor síncrono como asíncrono mediante autotransformador

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

Referencia		Frecuencia asignada f (Hz)	
Tensión asignada V_{NL} (V)		Intensidad asignada I_{NL} (A)	
Velocidad asignada $n_1 = n_N$ (rpm)		Intensidad de excitación asignada I_{eN} (mA)	

Características de los aparatos de medida empleados:

Tipo de aparato	Magnitud que mide	Referencia	Sistema indicador	Clase de precisión	Alcances	Nº de divisiones de la escala	Ctes. de medida

(Recuerde que las 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

Coeficiente de corrección por temperatura = K_{θ} = _____

R_U = _____ Ω R_V = _____ Ω R_W = _____ Ω

$$R = K_{\theta} \frac{R_U + R_V + R_W}{3} = \text{_____ } \Omega$$

Ensayo de vacío

Tipo de conexión: _____

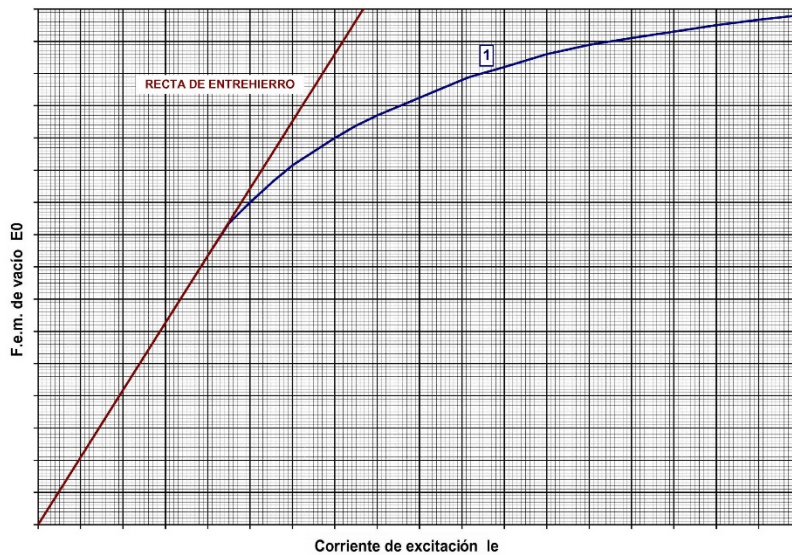
Velocidad = _____ rpm

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)

I_e (mA)	$E_{0L} \uparrow$ (V)	$E_{0L} \downarrow$ (V)	E_0 (V)



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

Reactancias síncronas longitudinales

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

$E_{0c} =$ _____ V

$E_0 =$ _____ V

$I_{corto} =$ _____ A

(Relación entre las intensidades de cortocircuito (I_{corto} e I'_{corto}) correspondientes a dos valores distintos

de la corriente de excitación I_e (I_e e I'_e): $I'_{corto} = I_{corto} \frac{I'_e}{I_e}$)

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

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

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

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

Reacción de inducido

Velocidad = _____ rpm

I_e = _____ mA

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

Característica exterior

Velocidad = _____ rpm

I_e = _____ mA

I_L (A)									
V_L (V)									F.d.p. resistivo
V_L (V)									F.d.p. inductivo

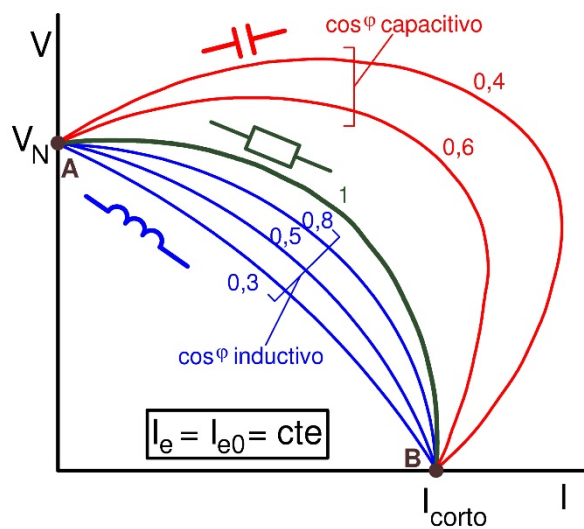
Curva de Mordey

Velocidad = _____ rpm

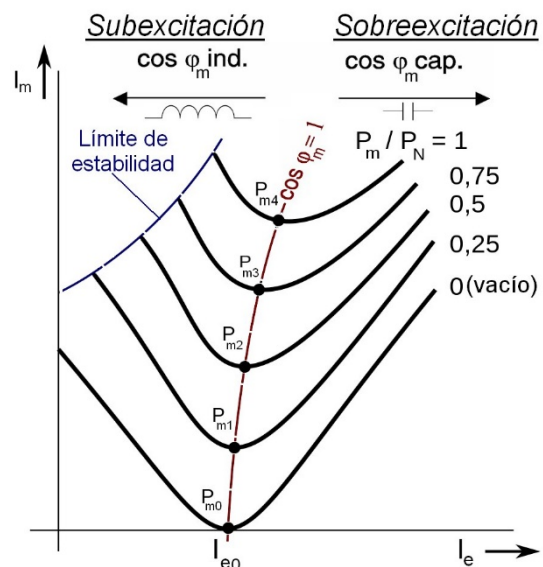
V_L = _____ V

P = _____ W

I_e (mA)								
I_L (A)								



Características exteriores de un alternador



Fuente. Wikimedia Commons; Autor: Wdwd
Figura modificada del original

Curvas de Mordey de un motor síncrono

Observaciones: