

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**  
**FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES**  
**DTO. DE ELECTRÓNICA**

Cátedra:

# **Máquinas e Instalaciones**

## **Eléctricas**

Trabajo Práctico N°3:

Ensayo Indirecto de una Máquina  
Asincrónica Trifásica  
Diagrama Circular

**Curso 2007**

Coordinador: Ing. Jorge A. Matricali

**TRABAJO PRÁCTICO N° 3.**

**“ENSAYO INDIRECTO DE UNA MÁQUINA ASINCRÓNICA TRIFÁSICA. DIAGRAMA CIRCULAR”**

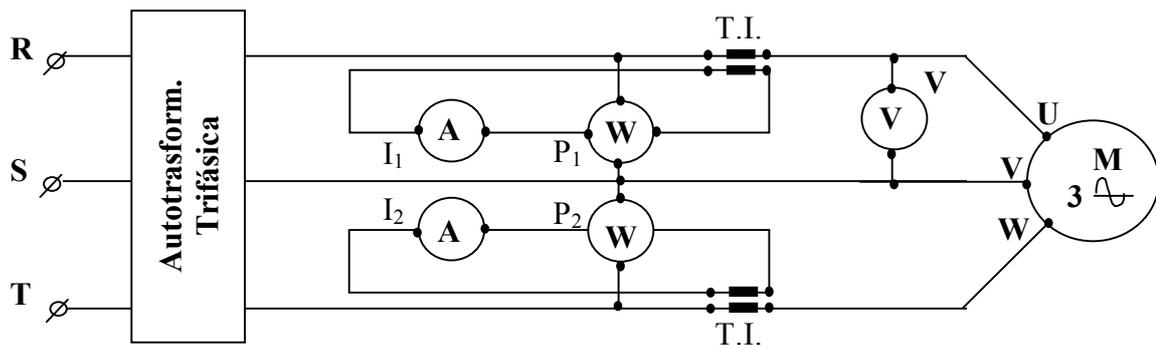
**1) Objeto de la práctica:**

Mediante los ensayos de vacío y de rotor bloqueado se determinan los parámetros del círculo eléctrico equivalente, a partir del cual se traza el diagrama circular aproximado que nos permite analizar el comportamiento de las máquinas de inducción para sus tres estados de funcionamiento.

**2) Datos de la máquina asincrónica a ensayar.**

**3) Datos del aparataje eléctrico e instrumentos de medición usados.**

**4) Circuito del ensayo:**



**5) Medición de las resistencias de los bobinados:**

Se miden las resistencias de los bobinados estáticos, en forma independiente cada fase con un Puente de Wheastone, y a temperatura ambiente. Luego, de acuerdo con las Normas Iram se refiere a 75° c. Finalmente el valor de las resistencias se obtiene como un promedio de los valores de las tres fases, el que debe incrementarse entre un 5% y un

8% para tener el valor de la resistencia óhmica efectiva en corriente alterna, (efecto pelicular).

$$\begin{aligned} \text{Temp. amb. : } & \text{ }^{\circ}\text{C.} & R_1 &= \frac{R_{u-x} + R_{v-y} + R_{w-z}}{3} = \Omega \\ R_{u-x} & : \Omega & R_{1_{75^{\circ}\text{C}}} &= R_1 \cdot (1 + \alpha \Delta t) = \Omega \\ R_{v-y} & : \Omega & R_{1_{ca}} &= (1,05 \dots 1,40) \cdot R_{1_{75^{\circ}\text{C}}} = \Omega \end{aligned}$$

En el caso de la máquina de rotor bobinado (anillos rozantes) debe realizarse idéntico proceso, obteniéndose  $R_2$ .

## 6) Ensayo en vacío:

Debido a que este ensayo se realiza sin carga en el eje del motor la velocidad de giro será aproximada la velocidad sincrónica, es decir  $s \cong 0$ , lo que implica que la resistencia total de la rama secundarias del c.e.e.  $R'_2/s \cong \infty$ , por lo tanto solo circulará la corriente de la excitación. Al ser esta  $I_0$  de valor reducido nos permite despreciar las caídas en el circuito primario de c.e.e. y, consecuentemente el ensayo en vacío deviene en la posibilidad de la obtención de los parámetros de la rama de excitación, esto es,  $\dot{G}_0, \dot{B}_0$  e  $\dot{Y}_0$ .

### 6.1) Operatoria:

Se arranca la máquina y se la lleva a velocidad de funcionamiento, la que deberemos mantener constante durante todo el ensayo controlándola con tecomómetro o luz estroboscópica. Se medirán los valores de corriente y potencia para tensiones variables desde 125% de la  $U_n$  hasta aproximadamente el 20 ó 25% de  $U_n$  (el límite lo indica la disminución de la velocidad y el aumento de  $P_0$  e  $I_0$ , Fig. 1).

### 6.2) Determinación del alcance de los instrumentos de medición:

Sabemos que:

$$I_0 \cong 0,4 \cdot I_n \rightarrow \text{alcance del } \textcircled{A}$$

$$\cos \varphi_0 \cong 0,2 \dots 0,3$$

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 \rightarrow \text{alcance del } \textcircled{W}$$

### 6.3) Método gráfico de separación de las pérdidas:

Como las pérdidas mecánicas son función de la velocidad de giro, realizaremos el apoyo hasta el mínimo valor de tensión donde dicha velocidad se mantiene aprox. constante. En la fig. 1 representamos  $I_0$  y  $P_0$  en función de  $U_n$ ; allí extrapolando desde el menor valor de  $U$  hasta el eje de abscisas se obtiene el valor de las pérdidas mecánicas (rozamiento y ventilación). Podría hacerse un gráfico similar representando  $I_0$  y  $P_0$  en función de  $U_n^2$ , con los que tendríamos una recta y se facilita la extrapolación. Además, si se desea, es posible separar las pérdidas en el cobre primario como se ve en la figura 1.

Sabemos que:

$$P_0 = P_{mec.} + P_{fe} + P_{cu_0} = P_{mec} + m \cdot G_0 \cdot U_f^2 + m \cdot I_0^2 \cdot R_1 =$$

siendo:

$$P_0 = P_1 + P_2 \qquad I_0 = (I_1 + I_2)/2 \quad , \quad U_f = U/\sqrt{3}$$

Obtenemos:

$$G_0 = \frac{P_{fe}}{m \cdot U_f^2} \quad , \quad Y_0 = \frac{I_0}{U_f} \quad , \quad B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2}$$

$$\text{Finalmente pueden calcularse: } S_0 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_0 \quad , \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{S_0}$$

### 6.4.) Cuadro de Valores:

	MEDIDOS												CALCULADOS:										
	U			I <sub>1</sub>			I <sub>2</sub>			I <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>			P <sub>2</sub>			P <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	cos φ <sub>0</sub>	G <sub>0</sub>	B <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	
	α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	[A]	α	k	[W]	α	k	[W]	[W]	[VA]		[S]	[S]	[S]	
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							

## 7) Ensayo con Rotor Bloqueado:

Ahora se impide mecánicamente el giro del rotor, y se lo alimenta con tensión reducida hasta que circule aprox. la corriente nominal simulando así las condiciones de cortocircuito del motor. Debido a que ahora el resbalamiento es  $s = 1$ , la resistencia equivalente a la carga mecánica en el eje  $R_c = R_2 \cdot (1/s - 1)$  se hace cero, permitiendo que la mayor corriente circule por las ramas primaria y secundaria, pues estos parámetros son muy inferiores a los de la rama de excitación; además sumado esto a la tensión reducida del ensayo pueden despreciarse las magnitudes  $I_o$  y  $P_o$ , y nos facilita el trazado del diag. circular.

### 7.1) Circuito del ensayo:

Idéntico al del punto 4) adosándole una traba mecánica al rotor.

### 7.2) Operatoria:

Con el rotor trabado se alimenta a la máquina con tensión reducida, partiendo del 25% hasta el 125% de la corriente nominal del motor. Para cada valor de tensión se obtienen dos lecturas de corriente, pues la reluctancia en el entrehierro varía si los dientes estáticos enfrentan dientes o ranuras rotóricas; entonces desplazamos levemente el rotor un pequeño arco de circunferencia hasta obtener máxima y mínima corriente, tomando finalmente como válido su valor promedio.

### 7.3) Alcance de los instrumentos de medición:

Sabemos que:

$$U_{cc} \cong (0,05 \dots 0,25) \cdot U_n \rightarrow \text{alcance del V}$$

$$\cos \varphi_{cc} \cong 0,5$$

$$I_{cc} = I_n, \quad P_{cc} = \sqrt{3} \cdot U_{cc} \cdot I_n \cdot \cos \varphi_{cc} \rightarrow \text{alcance del W}$$

### 7.4) Parámetros obtenidos:

$$\text{Para los cálculos usaremos, } I_{cc} = \frac{I_1 + I_2}{2}, \quad P_{cc} = P_1 + P_2$$

lo que nos permite calcular,  $Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}}$  ,  $R_{cc} = \frac{P_{cc}}{m \cdot I_{cc}^2}$

pero, a fin de trabajar con mayor exactitud, tomaremos en cuenta las pérdidas en el hierro, aunque la tensión ahora sea reducida; entonces,

$$P_{fe} = m \cdot G_o \cdot U_{cc}^2, \text{ con lo cual; } R'_{cc} = \frac{P_{cc} - P_{fe}}{3 I_{cc}^2}$$

(Este valor de  $G_o$  corresponde al del cuadro

6.4. para la tensión reducida  $U_{cc}$  para  $I_{cc}=I_n$ ).  $X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$

Ya que en el ensayo en vacío se obtenía el valor  $R_1$ , ahora tendremos  $R'_2=R_{cc}-R_1$ , que representa el valor de la resistencia óhmica secundaria referida al primario (estator). Al igual que en el caso de los transformadores,  $R_2=R'_2(1/a^2)$  donde  $a$ : relación de transformación entre rotor y estator . Esto tiene interés en el caso de motores de rotor bobinado.

Los valores de resistencia provenientes de 6.3.- y de 7.4.- deben cotejarse con los medidos en el punto 5).

### **7.5) Cálculo y referencia de magnitudes a la tensión nominal:**

Como el ensayo se ha realizado a tensión reducida, para tener los valores de funcionamiento en régimen normal de la máquina debemos referirlos, a, la tensión nominal  $U_n$ . Aquí se nos presentan dos casos diferentes en función de las formas de ranuras y dientes rotóricos y estatórico a saber;

#### **I) Ranuras rotóricas con forma abierta o semicerrada:**

En este caso los flujos de dispersión en régimen de corto circuito saturan muy débilmente los dientes rotóricos y estatóricos, por lo cuál los parámetros  $X_{cc}$  y  $Z_{cc}$  varían dentro de límites estrechos. Entonces la representación de  $I_{cc}=f(U_{cc})$  será una recta con centro en el origen de coordenadas. Esto ocurre con las máquinas de rotor bobinado y con las de gran reactancia (máquina de corrientes de Foucault o ranura profunda), y la forma de referir magnitudes es lineal;

$$I_{cc_n} = I_{cc} \cdot \left( \frac{U_n}{U_{cc}} \right) \quad , \quad P_{cc_n} = P_{cc} \cdot \left( \frac{U_n}{U_{cc}} \right)^2 \quad , \quad \text{y la culpa o par, } C_{cc_n} = C_{cc} \cdot \left( \frac{U_n}{U_{cc}} \right)^2$$

## II) Ranuras estáticas semicerradas y ranuras rotóricas cerradas:

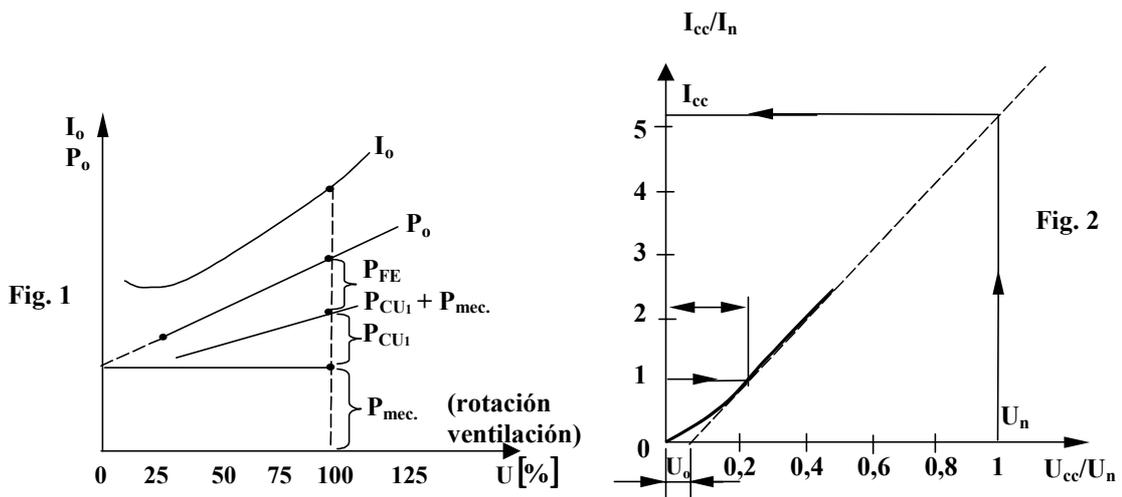
Ahora el puente que recubre la ranura se satura rápidamente y con bajas corrientes, así que al incrementarse ésta la zona de saturación se extiende abarcando la cabeza del diente y hasta el diente mismo.

Por ello la  $X_{cc}$  (y por ende la  $Z_{cc}$ ) varía notablemente con la  $U_{cc}$ , adquiriendo forma hiperbólica, lo que produce una variación de  $I_{cc} = f(U_{cc})$ , y, como se observa en la fig. 2, que deja de ser lineal. Esto ocurre en las máquinas tipo jaula de ardilla.

La divergencia de la curva de  $I_{cc}$  con respecto a una recta sucede para  $I_{cc} < I_n$ , mientras que para  $I_{cc} > I_n$  la curva es prácticamente una recta. Entonces se procede de la siguiente manera: del ensayo con rotor bloqueado se obtienen valores de  $I_{cc} = f(U_{cc})$  entre los límites  $I_{cc} \cong I_n$  e  $I_{cc} \cong 2,5 I_n$ , sección ésta que puede considerarse recta; entonces extrapolando para  $U_{cc} = U_n$  obtenemos  $I_{cc_n}$ . Lo mismo se consigue mediante cálculo; para lo cual se prolonga la sección rectilínea de la curva  $I_{cc} = f(U_{cc})$  hasta cortar el eje de abscisas, obteniendo  $U_0$ , y así,

$$I_{cc_n} = I_{cc} \cdot \left( \frac{U_n - U_0}{U_{cc} - U_0} \right) \quad , \quad P_{cc_n} = P_{cc} \cdot \left( \frac{U_n - U_0}{U_{cc} - U_0} \right)^2 \quad , \quad C_{cc_n} = C_{cc} \cdot \left( \frac{U_n - U_0}{U_{cc} - U_0} \right)^2$$

Finalmente para ambos casos también se calculan:



Gratificar  $P_o$  en función de  $U^2$  así linealiza

$$S_{cc} = \sqrt{3} \cdot U_{cc} \cdot I_{cc} \quad , \quad \cos\phi_{cc} = \frac{P_{cc}}{S_{cc}}$$

### 7.6) Cuadro de valores:

	MEDIDOS												CALCULADOS:										
	U			I <sub>1</sub>			I <sub>2</sub>			I <sub>cc</sub>	P <sub>1</sub>			P <sub>2</sub>			P <sub>cc</sub>	S <sub>cc</sub>	cos φ <sub>cc</sub>	Z <sub>cc</sub>	R' <sub>cc</sub>	X <sub>cc</sub>	R' <sub>2</sub>
	α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[A]	[A]	α	k	[W]	α	k	[W]	[W]	[VA]		[Ω]	[Ω]	[Ω]	
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							

### 8) Ensayo de relación de espiras:(Para rotor bobinado)

Cuando se trataba de transformadores de relación la espiras entre primario y secundario era casi igual a la de las tensiones en vacío, pues la caída ( $I_o Z_1$ ) era despreciable, y podía

escribir;  $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{E_1}{V_2}$ , lo cual ya no es posible en la máquina de inducción debido

al considerable valor de  $I_o$  por la presencia del entrehierro. Si disponemos de una máquina de rotor bobinado podemos medir la tensión secundaria; esto nos permitirá calcular con suficiente aproximación la relación de espiras, alimentando alternativamente estator y rotor.

Sea,  $r_1 = \frac{U_1}{E_2} = \frac{|E_1 + I_o \cdot Z_1|}{E_2}$ , relación entre la tensión aplicada al primario, y la que se

obtiene en los anillos rozantes con circuito rotórico abierto.

Y también,  $r_2 = \frac{U_2}{E_1} = \frac{|E_2 + I_o \cdot Z_2|}{E_1}$ , relación entre la tensión aplicada al secundario, y

la que se obtiene en bornes estático cuando éste se encuentra abierto.

Entonces, operamos de la siguiente manera;

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{|E_1 + I_{o1}Z_1|}{E_2} \frac{E_1}{|E_2 + I_{o2}Z_2|} = \left| 1 + \frac{I_{o1}Z_1}{E_1} \right| \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{1}{\left| 1 + \frac{I_{o2}Z_2}{E_2} \right|} \cdot \frac{E_1}{E_2} = \left[ \frac{E_1}{E_2} \right]^2$$

simplificación que se hizo posible gracias a que las impedancias en “por unidad” primaria y secundaria son aproximadas iguales.

Finalmente tenemos que:

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}$$

debemos notar que esta relación  $\underline{a}$  es una relación de espiras “efectivas”, porque en el caso de un motor (o generador), la cantidad de espiras reales debe afectarse, en una expresión general, por los números de fases primarias y secundarias, y también factores de arrollamiento de ambos devanados,  $a = \frac{m_1 \cdot K_{arr1} \cdot N_1}{m_2 \cdot K_{arr2} \cdot N_2}$ . Por últimos decimos que esta

relación  $\underline{a}$  obtenida nos es de utilidad al usar la máquina asíncrona como regulador de Inducción.

## 9) Diagrama circular:

Con los parámetros resultantes de este trabajo práctico conformamos el circuito eléctrico equivalente (**c.e.e.**), y a partir de éste trazamos e diagrama circular aproximado (también conocido como Heyland u Osanna debido a sus creadores), con el cual se estudia el comportamiento de la máquina asíncrona para sus tres estados de funcionamiento – motor, generador y freno electromagnético- y se obtiene un panorama general de la máquina en cuestión, tanto cuantitativamente.

Se construirá de acuerdo con la referencia bibliográfica, Moeller-Kubler-Werr, págs. 398 a 405; se adjunta en Apéndice A.

### 9.1) Diagrama circular exacto:

En máquinas de inducción de potencia fraccionaria y hasta unos pocos Kw., la circunferencia construida a partir c.e.e. aproximado difiere en forma relativamente considerable de la real, debido esto fundamentalmente a la no consideración de la caída

$(I_0.Z_1)$ , que ya expresamos era de importancia en las máquinas asincrónicas, haciéndose mucho más relevante en las de potencia reducida.

Una forma sencilla de trazar este diagrama exacto se indica en la bibliografía (Hindmarsh).

### 9.2) Gráficas a partir del diálogo circular:

Para varios puntos de la circunferencia de Heyland se pide graficar las siguientes curvas en dos hojas milimetradas;

$$\left. \begin{array}{l} \text{Pmecánica} \\ \text{Peléctrica} \\ \text{Cupla porcentual, } C/C_n \\ \text{Corriente porcentual, } I/I_n \end{array} \right\} = f(n, s)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Corriente porcentual, } I/I_n \\ \text{Velocidad porcentual, } n/n_s \\ \text{Factor de potencia, } \cos \varphi \\ \text{Rendimiento, } \eta \end{array} \right\} = f(C/C_n)$$

En ambos casos el alumno consignará conclusiones con respecto a las gráficas; forma de las curvas, inter-relación de magnitudes, signo para diferentes estados de funcionamiento, etc...

### 9.3) Relaciones complementarias a partir del diagrama circular:

Por último comparamos los valores correspondientes a nuestra máquina con las siguientes relaciones para máquinas estándar, que nos permiten clasificar a la máquina de ensayo.

I)  $\frac{I_o}{I_n} = 0,2 \text{ a } 0,6$  (en general de 0,25 a 0,50). Esto nos permite evaluar el  $\cos \phi$  de la máquina debido a su dependencia con respecto a  $I_o$ .

II)  $\frac{I_{cc_n}}{I_n} = 4 \text{ a } 7$  (en general de 4,5 a 6). Indica el golpe de corriente para el arranque con plena tensión. Esta relación en máquinas de doble jaula profunda es de 2,5 a 4 aproximadamente.

III)  $\frac{C_{cc_n}}{C_n} = 1 \text{ a } 1,5$ ; valores éstos para máquinas con rotor en cortocircuito.

IV)  $\frac{C_{m\acute{a}x.}}{C_n} = \begin{cases} 1,6 \text{ a } 1,8; & \text{para máquinas de pequeña y mediana potencia.} \\ 1,8 \text{ a } 2,5; & \text{para máquinas de mediana y gran potencia.} \\ 2,8 \text{ a } 3, & \text{y aún más; para máquinas especiales.} \end{cases}$

Esta última relación expresa la Capacidad de Sobrecarga momentánea del motor, también llamado Momento de Vuelco o Límite de Estabilidad.

En este punto también el alumno deberá asentar las conclusiones resultantes respecto de la máquina de bajo ensayo.

#### 9.4) Gráfica de corriente y Cupla:

Se representará una gráfica extra en hoja milimetrada con  $I=f(n)$  y  $C=f(n)$ , la cual se confrontará con la obtenida en el trabajo Práctico de Graficador. Si de la comparación surgieran diferencias deben ser explicadas.

#### 9.5) Cálculo de Rendimiento:

Los valores del rendimiento obtenidos del dialogo circular no son lo suficientemente precisos como se requiere, para evaluar correctamente una máquina. Por ello se lo calcula mediante la expresión general siguiente:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Sigma P_{p\acute{e}rdidas}}$$

donde:

$$\Sigma P \text{ pérd.} = P \text{ mec.} + P_{cu_1} + P_{cu_2} + P_{fe.} + P_{adicionales}$$

$$P_{adic.} \cong 0,1.(P_{mec.} + P_{cu_1} + P_{cu_2} + P_{fe.})$$

## Bibliografía consultada:

- ✓ Kostenko Piotrovski: "Máquinas Eléctricas", Tomo II.
- ✓ Moeller, Kubler y Werr: "Electrotécnia aplicada a las máquinas eléctricas".
- ✓ Hindmarsh: "Máquinas Eléctricas y sus aplicaciones".
- ✓ Gray: "Máquinas eléctricas"
- ✓ Sobrevila: "Conversión industrial de la Energía Eléctrica", Tomo II.

## TRABAJO PRACTICO N° 3 ANEXO

### CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA CIRCULAR

Es recomendable realizar el diagrama circular en una escala amplia, de modo de cometer pequeños errores en la lectura de los parámetros característicos.

Se dibuja el vector tensión en una escala de tensiones y preferentemente vertical.

Se establece una escala de corrientes.

A partir de  $U_1$  se traza  $I_0$  con el ángulo  $\varphi_0$  (punto A) y también  $I_{CC}$  con el ángulo  $\varphi_{CC}$  (punto B). Estos parámetros se hallan como indica la guía de T.P.

Se traza una recta que una A con B, que se denomina recta de potencia mecánica cero ( $P_{mec}=0$ ). Se traza una horizontal desde el punto A. Se traza la recta AFD, desde A con un ángulo tal que:

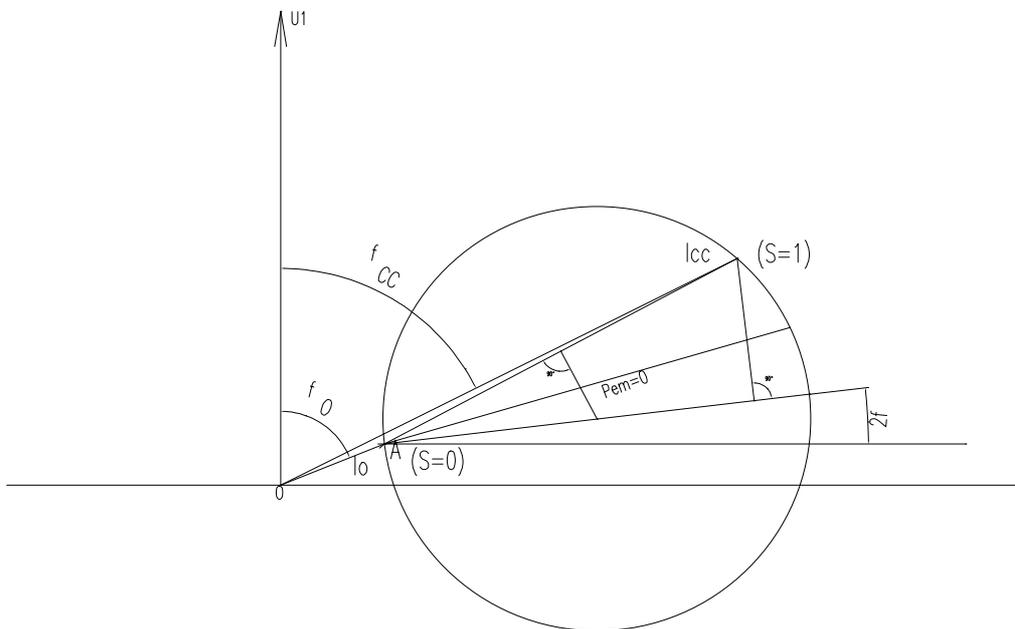
$$2 \cdot \varphi = \arctg \frac{2 \cdot I_0 \cdot R_1}{U_1} \quad \text{siendo } U_1 \text{ la tensión de fase.}$$

Desde el punto medio de AB se traza una recta normal AF. En el punto F queda marcado el centro de la circunferencia del diagrama circular. El radio es la distancia FA.

Se traza el punto C de tal forma que:

$$\frac{BD}{CD} = \frac{R_{CC}}{R_1}$$

Se traza una recta AC hasta que corte la circunferencia en el punto E, que es el punto de  $S = \pm\infty$ . La recta AE se denomina recta de potencia electromecánica cero.



### ESCALA DE POTENCIA

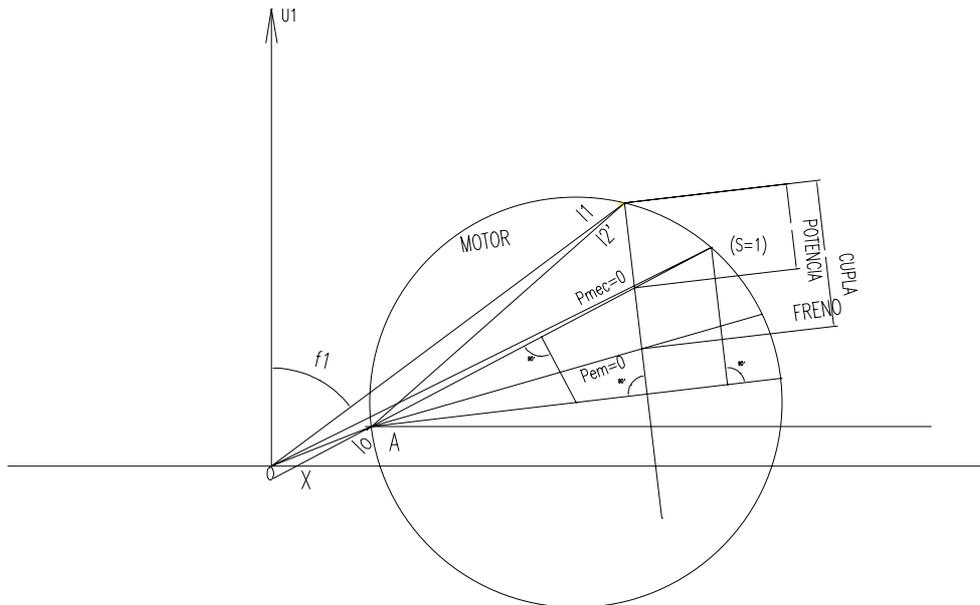
Se halla :  $ESC.P = U_{NOM} \cdot ESC.I \cdot \sqrt{3}$  , siendo  $U_{NOM}$  la tensión de línea.

Para leer potencia para cualquier estado determinado, se ubica un punto genérico G de funcionamiento sobre la circunferencia. La recta AG mide  $I_2'$  en la escala de corrientes y OG mide  $I_1$ . Se traza la recta GLMN a partir de G y perpendicular a AFD. Se mide la distancia GL hasta la recta de potencia mecánica igual a cero y se multiplica por la escala de potencia.

### ESCALA DE CUPLA

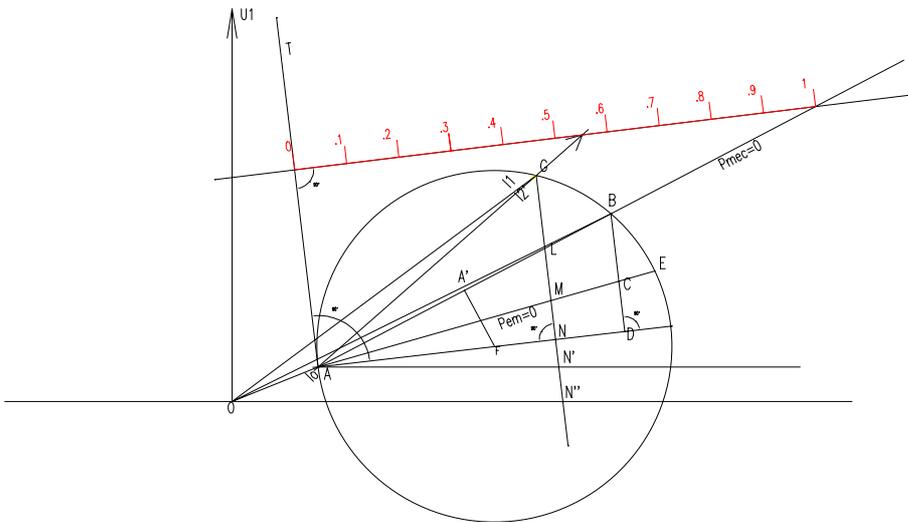
Se halla: 
$$ESC.C = \frac{ESC.P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}}$$

Se mide la distancia GM (hasta la recta de potencia electromecánica cero), se multiplica por la escala de cupla y se halla el valor de cupla para el punto determinado de funcionamiento.



### **ESCALA DE DESLIZAMIENTO**

A partir de A se traza una perpendicular a la recta AFD, siendo la recta trazada tangente a la circunferencia (recta AT). Se traza una recta paralela a AFD y que sea fácilmente divisible en 10 partes entre la recta AT y la recta de  $P_{mec}=0$ . Siendo la escala de deslizamiento. Para un punto de funcionamiento genérico G se traza una recta AG desde A hasta cortar la escala de deslizamiento, donde se mide el valor de S.



## **ESCALA DE RENDIMIENTO**

La escala se traza de igual forma como la escala de S, variando las posiciones de 0 y 1. Para leer el valor, se traza la prolongación de la recta de  $P_{mec}=0$  hasta cortar la horizontal que pasa por O. Este se llama punto X. Se traza una recta desde X pasando por G hasta cortar la escala de rendimiento, donde se lee el valor.

Para el caso de funcionamiento como generador, se traza una paralela a la recta  $P_{mec}=0$ , que sea fácil de dividir en 10 veces, entre la horizontal al punto O y la recta AT.

Para leer el valor se traza una recta desde el punto de funcionamiento genérico del generador, que pasa por X hasta cortar a la escala de rendimientos, donde se lee el valor.

