

UM

**ARRANQUE DE MOTORES TRIFÁSICOS POR  
RESISTENCIA ROTÓRICA**

**Criterios de diseño del reóstato**

**Jorge N. L. Sacchi – Fernando Sánchez**

*Cátedra: "Cálculo y Diseño de Máquinas y Equipos  
Eléctricos" - 2017*

# Arranque de motores trifásicos por resistencia rotórica

Ing. Jorge Sacchi<sup>1</sup>    Ing. Fernando Sanchez<sup>2</sup>

## Consideraciones de diseño del reóstato de arranque

En el motor de jaula de ardilla, el par máximo se alcanza aproximadamente al 80% de la velocidad nominal.

En un motor de rotor bobinado se puede desplazar el par máximo a velocidades bajas, intercalando un reóstato en serie con el rotor. Utilizando varias etapas de resistencias, se puede conseguir un arranque suave con un par elevado durante todo el periodo de arranque, también la intensidad se mantiene moderada durante el periodo de arranque.

El motor de rotor bobinado es más caro. Se utiliza cuando hace falta arrancar suavemente con una carga elevada.

Para el cálculo del reóstato de arranque en primer lugar es importante establecer en que parte del diagrama circular se quiere situar el punto de arranque con el reóstato incluido. Si el motor deberá desarrollar el máximo par, se elegirá el punto de par máximo  $T_{max}$  como se observa en la Figura 1; si en cambio es suficiente un par menor, será preferible elegir un punto comprendido entre  $P_0$  y  $T_{max}$  de manera de reducir convenientemente la corriente de arranque.

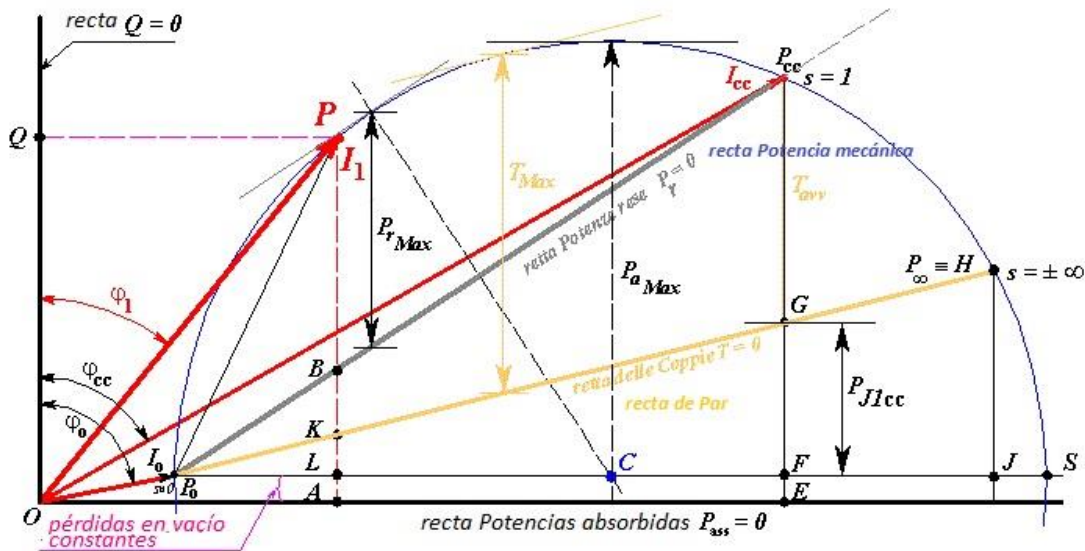


Figura 1

Frecuentemente se elige el punto P, corriente de arranque igual a la corriente de plena carga, y llamando con  $s$  el resbalamiento correspondiente al punto elegido, se tiene:

$$\frac{R_2 + R}{R_2} = \frac{1}{s} \quad (1)$$

Donde  $R_2$  es la resistencia del rotor (sin el reóstato) y  $R$  la resistencia del reóstato, se obtiene:

$$R = R_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) = R_2 \left( \frac{100}{s\%} - 1 \right) \quad (2)$$

<sup>1</sup> Docente Investigador Facultad de Ingeniería - Universidad de Morón

<sup>2</sup> Docente JTP Facultad de Ingeniería - Universidad de Morón

Para determinar el par máximo en función del resbalamiento, con tensión y frecuencia de red constantes, se logra mediante la derivada primera  $dT_s/ds$  de la expresión del par que depende de la resistencia, la reactancia de dispersión del rotor y de la tensión en función del resbalamiento, y se iguala a cero, obteniéndose así el resbalamiento para par máximo que resulta:

$$s_{\max} = \frac{R_2 + R}{X_2}$$

es decir, la resistencia total de una fase del rotor coincide con la reactancia de dispersión  $X_2$  del rotor.

Cuando se quiere limitar la corriente de arranque a valores bastante bajos, del orden de la corriente de plena carga, el efecto de la resistencia prevalece respecto al de la reactancia y se puede admitir:

$$R + R_2 = -\frac{V_2}{I_{2s}}$$

Siendo  $I_{2s}$  la corriente rotórica para el punto de arranque elegido. Adoptando el punto de arranque en P, que corresponde un par igual al nominal, una corriente rotórica nominal y un resbalamiento  $s$  nominal, conocido el valor de la resistencia del rotor reemplazando en (2) se puede determinar el valor de la resistencia del reóstato.

Alimentado el motor con la tensión nominal, la exclusión del reóstato se debe realizar durante el arranque en modo gradual. Con resistencias metálicas la exclusión gradual con reóstatos a cursor, daría origen, con las fuertes corriente en juego, a dificultades constructivas, y por lo tanto se acepta subdividir la resistencia en un número de secciones suficientemente grande, que progresivamente se excluyen.

Como se explica a continuación, se puede determinar cómo subdividir la resistencia de cada fase, para conforme el motor va ganando velocidad, disminuirse progresivamente la resistencia externa hasta llegar a cortocircuitar los devanados, instante en que el motor funciona en condiciones nominales.

En la Figura 2 se muestran las curvas teóricas de par y de intensidad respecto de la velocidad, donde se han adoptado tres etapas de resistencia. Con una resistencia variable por escalones de amplitud finita es sólo posible mantener la desviación del par dentro de límites prefijados, como se observa en la figura.

Con un ejemplo de cálculo que se explica en detalle más adelante, se podrá observar que incidencia tiene el punto adoptado para el arranque en lo anteriormente señalado.

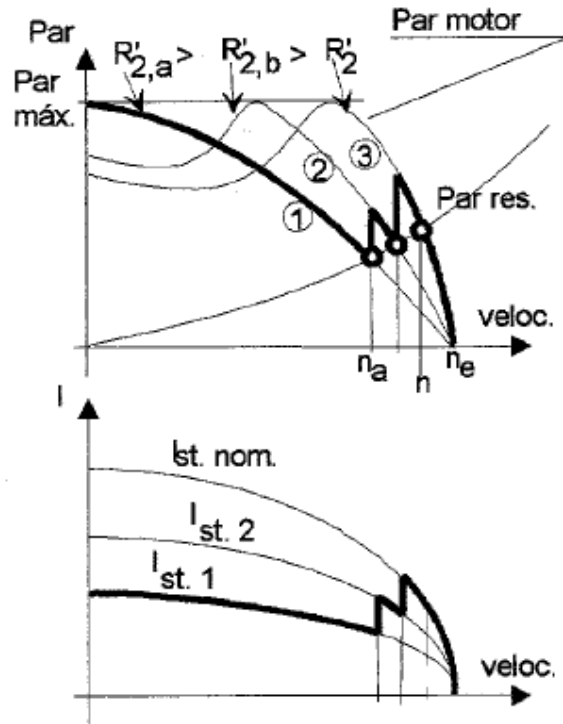


Figura 2 – Arranque mediante resistencias rotóricas con tres etapas

En la Figura 3 a se muestra un oscilograma de la intensidad absorbida por el motor en el instante del arranque. Según se observa existe un pico de intensidad, aunque limitado debido al aumento provocado en la resistencia rotórica. La evolución de la intensidad durante el proceso completo de arranque se representa en el oscilograma de la Figura 3 b. Los aumentos bruscos de intensidad se deben a disminuciones bruscas de resistencia.

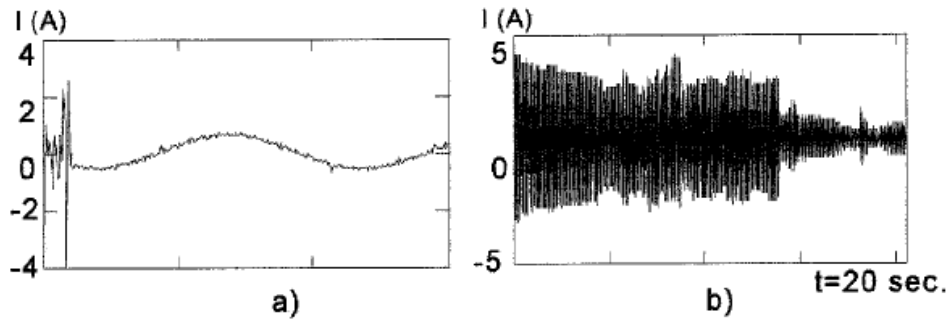


Figura 3

Es conveniente subdividir la resistencia de cada fase en un número de partes tanto mayor cuanto mayor es la potencia del motor, en la práctica se tiene comúnmente:

Potencia en kW	Número de secciones
hasta 10	3 a 4
10 a 25	5
25 a 50	6
50 a 100	7
100 a 200	8 a 9
más de 200	10 a 15

Para la subdivisión de la resistencia se pueden adoptar los valores propuestos a continuación:

**TABLA – Resistencia de cada sección en % de la total**

Nº de secciones	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12	r13	r14	r15
3	54	27	19												
4	45	30	15	10											
5	37	28	18	10	7										
6	32	25	19	13	6	5									
7	28	23	18	14	9	5	3								
8	25	21	17	14	10	7	4	2							
9	22	19	16	14	11	8	5,5	2,5	2						
10	20	18	15	13	11	9	6,5	4	2	1,5					
15	13,2	12,3	11,4	10,5	9,5	8,5	7,6	6,6	5,7	4,7	3,8	2,8	1,9	0,95	0,66

Las resistencias metálicas se pueden disponer tanto en aire como en aceite, considerando el más elevado coeficiente de transmisión del calor que se tiene en el aceite y su elevada capacidad térmica, se pueden adoptar valores de densidad de corriente mayores y por lo tanto reducir las dimensiones del dispositivo, teniendo en cuenta el tiempo limitado de funcionamiento.

En ambos casos, pero particularmente para reóstatos en aceite, tiene gran influencia para su dimensionamiento el tiempo de arranque y la eventual repetición de la maniobra en breves intervalos. Con los normales reóstatos en aceite no se puede considerar la transmisión del calor a través de la cuba que lo contiene, debido al breve tiempo de arranque y por lo tanto se deberá calcular el volumen de aceite de modo que su capacidad térmica sea suficiente para limitar la sobrelevación de la temperatura admitida. Para los arranques repetidos se puede tener en cuenta en cambio la disipación del calor durante el estado de reposo y por lo tanto utilizar los criterios de dimensionamiento empleados para transformadores.

### Ejemplo de cálculo

Se adoptó para el desarrollo de este ejemplo de cálculo un motor asíncrono trifásico de rotor bobinado de 15 kW, 400V, 50 Hz de 4 polos,  $\cos \varphi = 0.85$ , rendimiento 90 % de servicio continuo que fue calculado con el programa “Motoca” para obtener todos los parámetros característicos del mismo.

Para el siguiente estudio se utilizó el programa “Octave” (programa libre para realizar cálculos numéricos) que permite resolver el circuito equivalente para determinar y graficar el par desarrollado y la corriente durante el arranque.

Para esa potencia del motor se adoptó para el reóstato de arranque, de acuerdo con las tablas anteriormente mencionadas un número de 3 secciones, siendo la resistencia de cada sección en por ciento de la total  $r_1 = 54 \%$ ,  $r_2 = 27 \%$  y  $r_3 = 19 \%$ .

El estudio consiste en considerar dos condiciones particulares, es decir para el primer caso el arranque se realiza para el punto de funcionamiento del motor, es decir para el resbalamiento  $s$  correspondiente a este punto. Para el segundo caso se adopta el punto correspondiente al par máximo con su correspondiente resbalamiento, ver Figura 1.

En ambos casos el valor de la resistencia total  $R$  del reóstato a utilizar se determina utilizando la expresión (2), obviamente conocido el valor  $R_2$  de la resistencia rotórica y el valor del resbalamiento correspondiente a cada caso analizado.

Para el primer caso se adopta para el arranque el punto de funcionamiento del motor para la condición nominal con un resbalamiento  $s = 4.4 \%$ , siendo  $R_2 = 0.224 \Omega$  la resistencia del rotor (sin el reóstato) la resistencia del reóstato  $R$  resulta  $5.93 \Omega$ .

Para el segundo caso se adopta para el arranque el punto de funcionamiento del motor para la condición de par máximo con un resbalamiento  $s = 20\%$  como en el caso anterior  $R_2 = 0.224 \Omega$  en consecuencia la resistencia del reóstato  $R$  resulta  $1.09 \Omega$ .

El programa “**Octave**” permite realizar los cálculos y el gráfico de la característica par - velocidad del motor con su resistencia rotórica original como con la resistencia calculada para cada etapa.

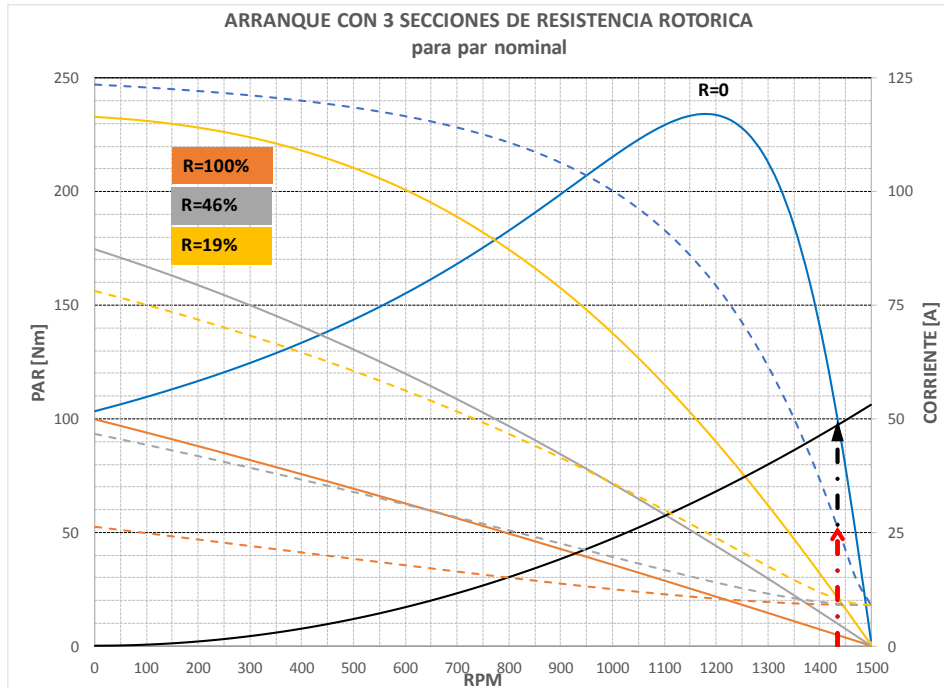


Figura 4 – Primer caso arranque para  $s = 4.4\%$  (par nominal)

La Figura 4 muestra para este caso la evolución del par y corriente para el arranque mediante resistencias rotóricas con tres etapas, pudiéndose observar que al quitar la última etapa se produce un fuerte salto de par hasta alcanzar la condición nominal de funcionamiento.

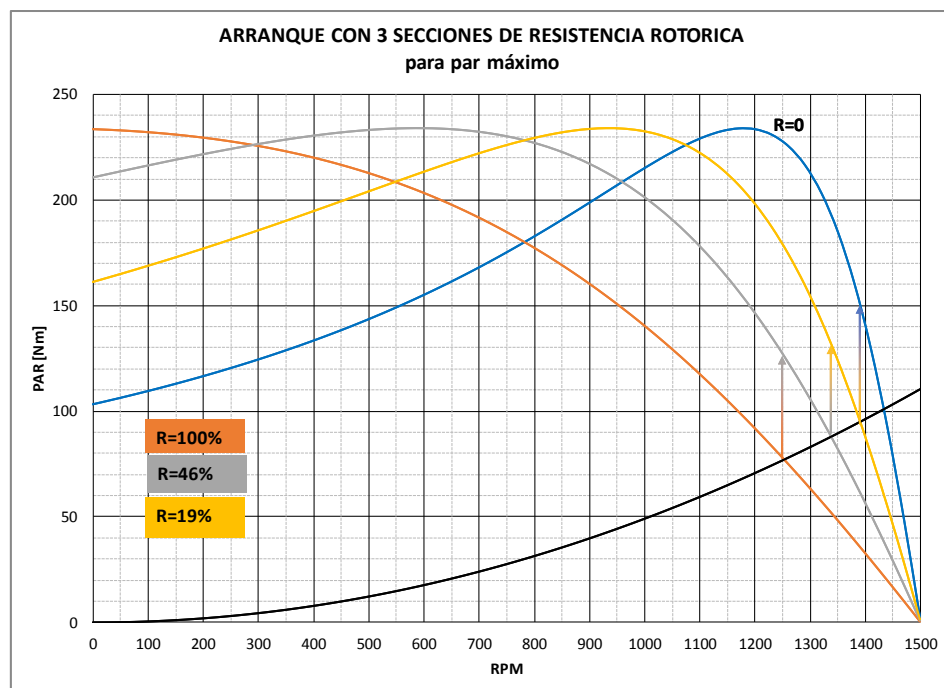


Figura 5 – Segundo caso arranque para  $s = 20\%$  (par máximo)

La Figura 5 permite observar que para el arranque con par máximo estos saltos de par son tan bruscos y que el arranque se realiza para resbalamientos más bajos, es decir próximos a la condición nominal de funcionamiento del motor con una velocidad de 1440 vpm.

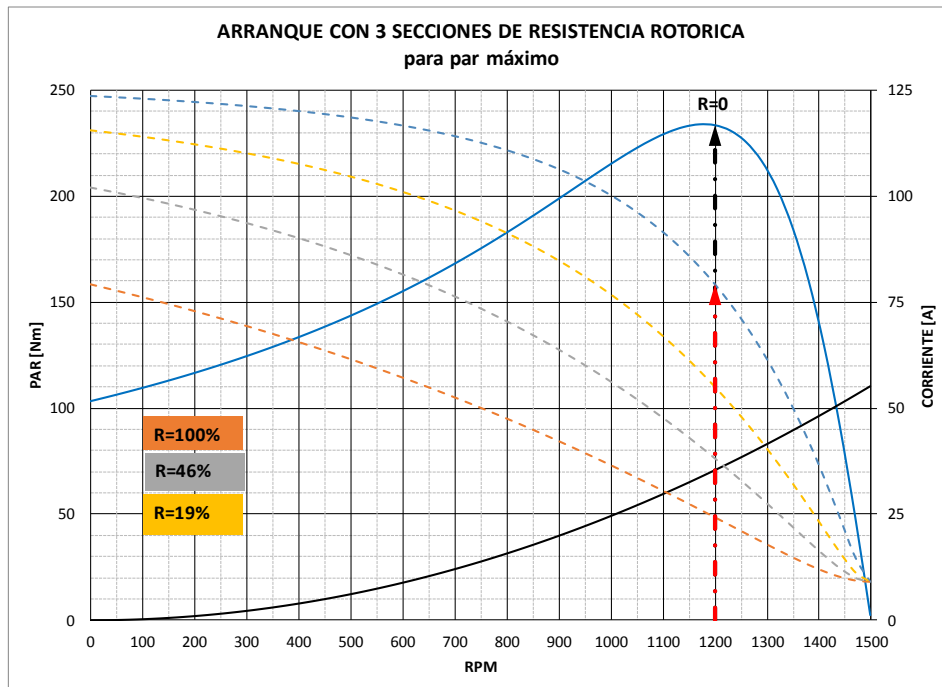


Figura 6 - Corrientes segundo caso arranque para  $s = 20\%$  (par máximo)

La Figura 6 muestra la evolución de corriente para este mismo caso, permite observar que para el arranque se tiene un pico de corriente de 3.2 del valor nominal que puede provocar caídas de tensión inadmisibles o calentamientos peligrosos.

### Conclusiones

Queda a criterio de quien diseña el tipo de arranque estudiar y adoptar la condición de arranque que mejor se adapte en función del momento de inercia total del sistema, tiempo de arranque, para reducir las sollicitaciones mecánicas y calentamientos peligrosos, en particular si se somete a arranque frecuentes. Un aumento del deslizamiento del motor y por tanto un calentamiento indeseable del mismo que puede reducir su vida útil.

### Bibliografía

- [1] COSTRUZIONE DELLE MACCHINE ELETTRICHE - Giovanni Smeda - Casa Editrice R. PATRON - Bologna Italia.
- [2] MAQUINAS ELECTRICAS - Quinta Edición - Stephen J. Chapman - Mac Graw Hill.