MOTORES CON ROTOR BOBINADO

Ing. Huber Murillo M.
Especialista en máquinas eléctricas
UNAC

1 .- Constitución mecánica.- Los motores de rotor bobinado están constituídos por dos paquetes magnéticos (estatórico y rotórico) de hierro al silicio debidamente ranurados, los mismos que son acompañados de las siguientes partes :

- 01 carcaza estator.
- 01 tapa del ventilador
- 01 ventilador
- Sistema porta escobillas
- Escudos L.A. y L.O.A.
- 02 rodamientos.
- Juego de escobillas
- Prensa estopas
- 01 eje rotor.
- 03 anillos rozantes
- Caja de conexiones
- Banco de resistencias

2.- Constitución eléctrica.- Los arrollamientos convenientemente instalados en las ranuras de los paquetes magnéticos estató-rico y rotórico deben ser aislados debido a que por ellos debe circular la corriente en cada uno de sus circuitos. Para este fín se utilizan los materiales aislantes y conductores aislados que estan clasificados por la norma IEC 34-1 item 15. Los materiales aislantes presentan una resistividad bastante elevada (varios megohmios) debido a las corrientes de fuga que circulan en forma transversal y superficial tal como:

- El mylar (130°C), nomex (180°C) y nomex-mylar-nomex (155°C).
- Estos materiales se utilizan como aislamientos de ranura, medio canal, tejas y separadores de cabezas de bobinas siendo sus espesores: 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 y 0.35 mm, etc.
- Los tubos aislantes (spaguettys) y cintas de amarre.
- Barniz segmentante de impregnación.
- Materiales conductores aislados.
- Alambres esmaltados (doble esmalte clase H (180°C), fabricado bajo las normas ASTM-B3 y NEMA 1000 MW SECCION 30-C.
- Cables de conexión con normas VDE 0472, con sección comercial de: 150 a 0.5 mm².

Los motores de éste tipo presentan un circuito estatórico igual al motor tipo jaula de ardilla, solo que éstos motores se fabrican con las siguientes restricciones :

Si R2' es baja → I2 ² R2' bajo → Eficiencia alta → T bajo → Iarr. alto.

Si R2' es alta → I2 ² R2' alto → Eficiencia baja → T alto → Iarr. bajo.

CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES CON ROTOR BOBINADO						
OPCION	R2'	I2² R2'	EF	T	Iarran.	FP
I	BAJA	BAJA	ALTA	BAJO	ALTA	BAJO
II	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIO	ALTA	MEDIO
IIII	**ALTA**	ALTA	BAJA	**ALTO**	**BAJA**	**ALTO**

Los motores tipo jaula de ardilla nos ofrecen solo una opción.
Los motores con rotor bobinado nos permite escoger cualquiera de las tres opciones, en la operación de éstos motores, usualmente utilizamos las tres opciones combinadas.

Los motores eléctricos estan destinados a tranasformar la energía eléctrica en energía mecánica.
De acuerdo a las características del torque en relación a la velocidad y corriente en el arranque, los motores asíncronos de inducción trifásicos (rotor bobinado) son clasificados en la categoría D, las mismas que son definidas por las normas IEC 34-12.

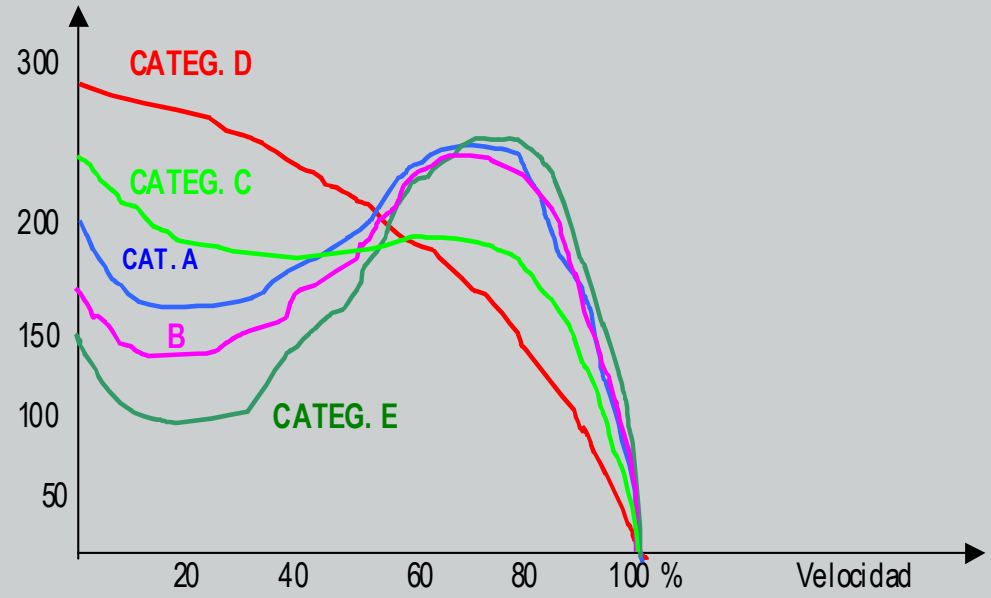


Fig.(2.12).- Curvas de torque vs velocidad según normas NEMA

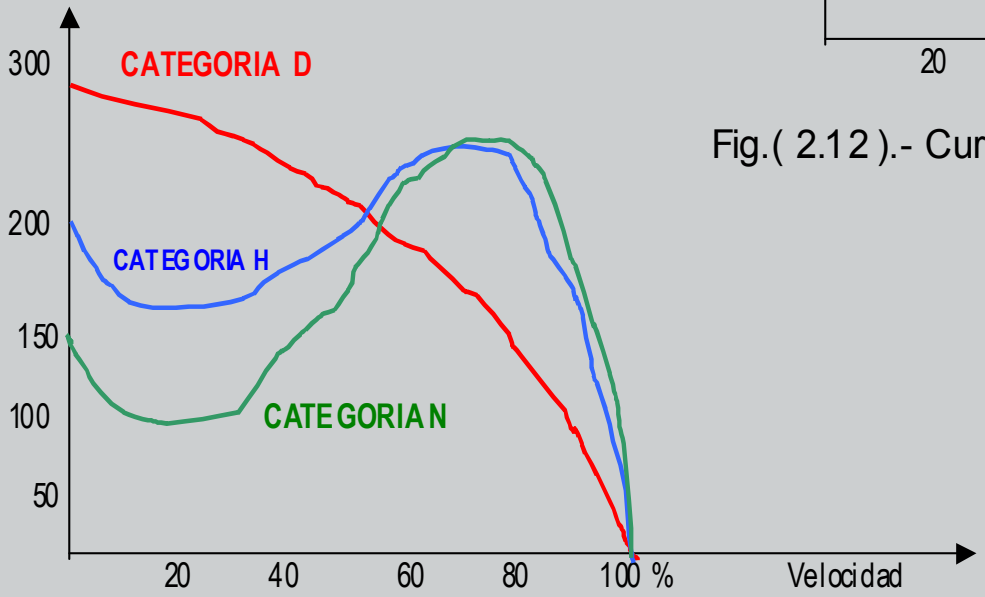


Fig.(2.11).- Curvas de torque vs velocidad según normas IEC

Categoría D.- Par de arranque alto, corriente de arranque baja, alto deslizamiento (mas de 5%), son utilizados en la industria donde las cargas presentan picos periódicos, y/o cargas donde necesitan un alto par y baja corriente de arranque. Para motores de esta categoría de 4, 6 y 8 polos de potencia nominal 150 HP o inferiores las normas NEMA MG1-12.38.3 especi-fica que la razón del par de arranque (Cp) y nominal (Cn) no debe ser inferior a 2.75. Según la tensión utilizada estos motores son producidos en las diferentes fábricas teniendo en cuenta las características de tensión, potencia y frame tal como se puede ver en la tabla siguiente.

TABLA 1.- CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES CON ROTOR BOBINADO		
TENSION (VOLTIOS)	Potencia(HP)	Frame
220, 380, 460, 575	Hasta 630	< 450
2300, 4160	125 a 2500	315 a 850
6600,13800	1000 a 30000	580 a 1600

Además están constituídos por estator y rotor bobinados cuya polaridad y bobinados son semejantes.

CARACTERISTICAS DE LAS MAQUINAS ASINCRONAS TRIFASICAS								
ROTOR	NEMA	FP	EF	S	Iarran.	Tarr.	Tmax.	R2'
1 JAULA	Clase A	Alto	Alto	Bajo	5 - 8 In	1.8 Tn	2.5 Tn	Bajo
2 JAULAS	Clase B	Medio	Bueno	Bueno	4 - 6 In	1.7 Tn	2.2 Tn	Medio
R. PROFUNDA.	Clase C	Normal	Normal	Normal	3 - 5 In	2.6 Tn	2.3 Tn	Normal
R. BOBINADO	**Clase D**	**Bajo**	**Bajo**	**Alto**	**Bajo**	**> 3 Tn**	**Alto**	**Alto**

Las velocidades síncronas de los motores de inducción son múltiplos inversos del número de polos del estator esto es :

$$RPM = 120 \cdot F / P$$

VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCION TRIFASICOS										
N° de polos del estator	2	4	6	8	10	12	16	18	20	24
RPM sincrono	3600	1800	1200	900	720	600	450	400	360	300

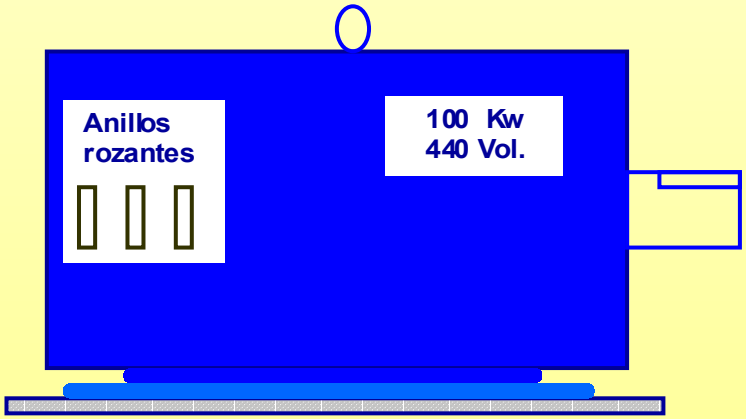
EXPERIMENTALMENTE SE HAN ENCONTRADO LAS CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS MÁQUINAS DE ALTA VELOCIDAD COMPARADAS CON LAS DE BAJA VELOCIDAD.	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Son de menor tamaño (menor peso) Tienen mayor par de arranque. Tienen mayor eficiencia. A carga nominal tienen mayor factor de potencia. Son menos costosos.	Desgaste mayor de rodajes. Cambios de grasa mas frecuentes. Mas precisión en el análisis vibracional. Utilización de rodamientos especiales.

4.- Tipos de arranque.- Los tipos de arranque que se utilizan dependen del torque de la carga pudiendo ser los siguientes:

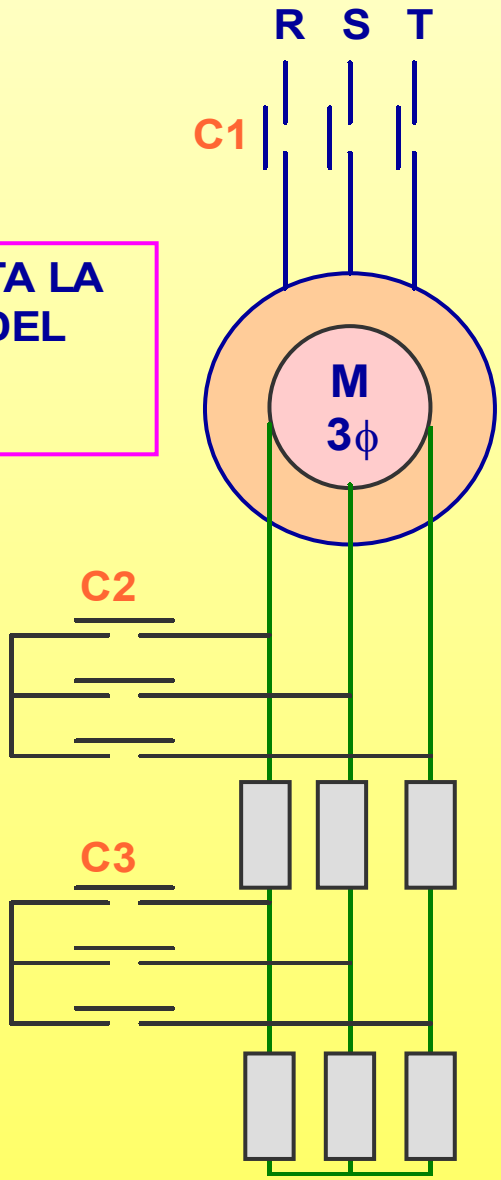
- Estator accionado por un arrancador directo siendo su conexión Y ó Δ y rotor en Y .
- Estator arrancado por estrella - triángulo siendo su conexión Δ y rotor en conexión Y.
- Estator accionado por un autotransformador su conexión Y ó Δ y rotor en conexión Y.
- Estator a plena tensión y rotor con banco de resistencias.
- Estator a tensión reducida (Y-Δ, auto, y/o arranque electrónico) y rotor con banco de resistencias.

COMPARACIÓN DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS		
DENOMINACIÓN DE LOS COMPONENTES	MOTOR CON ROTOR JAULA DE ARDILLA	**MOTOR CON ANILLOS ROZANTES**
Tipo del proyecto	Rotor tipo jaula	Rotor bobinado
Corriente de arranque	Alto	Bajo
Torque de arranque	Bajo	Alto
Cp / Cn	Bajo	Alto ³ 2.75
Torque máximo	> 160% Nominal	>160% Nominal
Rendimiento	Alto	Alto
Equipos de arranque	Según el tipo	Reóstato
Equipos de protección	Simples	Simples
Mantenimiento	Simple	Mas complejo
Costo adquisición	Bajo	Alto
Regulación velocidad	No existe	Si existe.
Instalación	Muy simple	Simple
Utilización versátil	Buena	Muy buena

MOTORES DE ANILLOS ROZANTES



SE INCREMENTA LA RESISTENCIA DEL DEVANADO ROTÓRICO



VENTAJAS:

- Alto par (motor) de arranque.
- Control simple.
- Baja corriente de arranque.

DESVENTAJAS:

- Bajo rendimiento.
- Pérdidas proporcionales al deslizamiento.
- Factor de potencia menor que 0.80.
- Existencia de un juego de anillos rozantes.
- Existencia de un juego de escobillas.
- Pequeño rango de variación de velocidad.

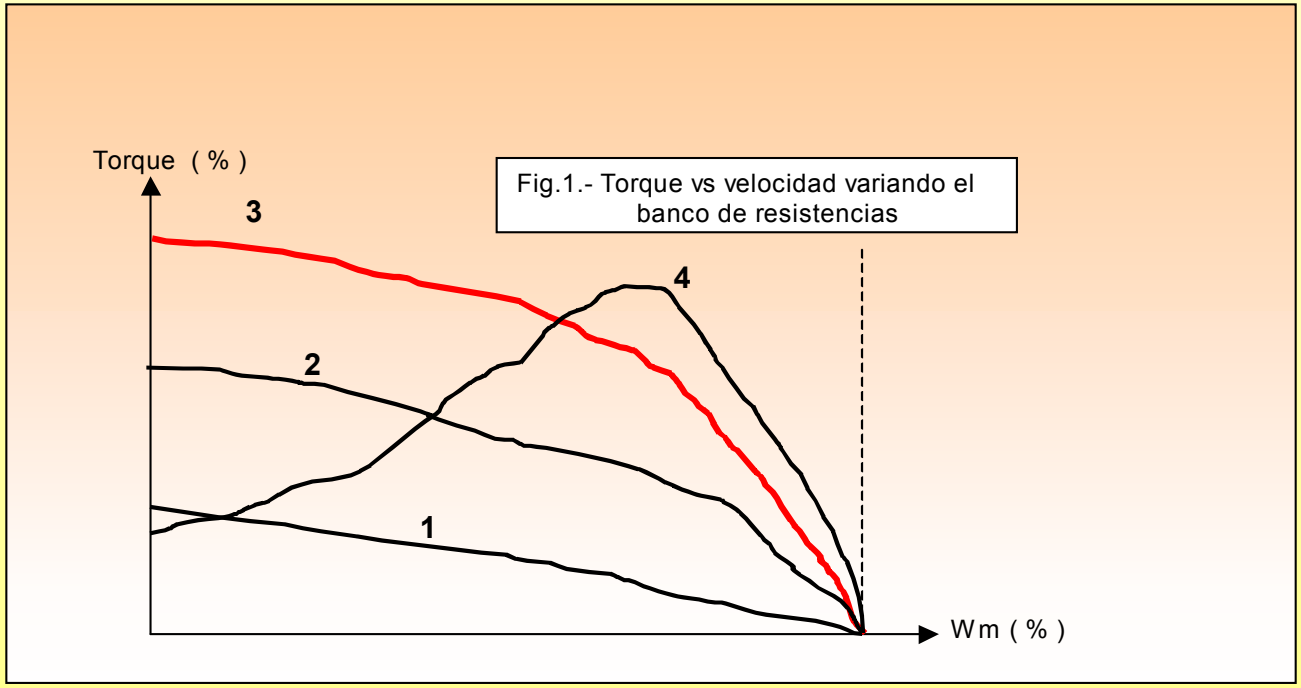
5.- Deslizamiento.- Experimentalmente se ha comprobado que la velocidad mecánica correspondiente al rotor (Wm) es en todo ins-tante menor que la velocidad síncrona (Ws), entonces:

$$s = (Ws - Wm)/s$$

Donde: P = Número de polos.
s = Deslizamiento
F = Frecuencia síncrona (estatórica) en Hz.

Wm = Velocidad mecánica del rotor en RPM.
Ws = Velocidad síncrona en RPM. (Ws = 120 . F / P)

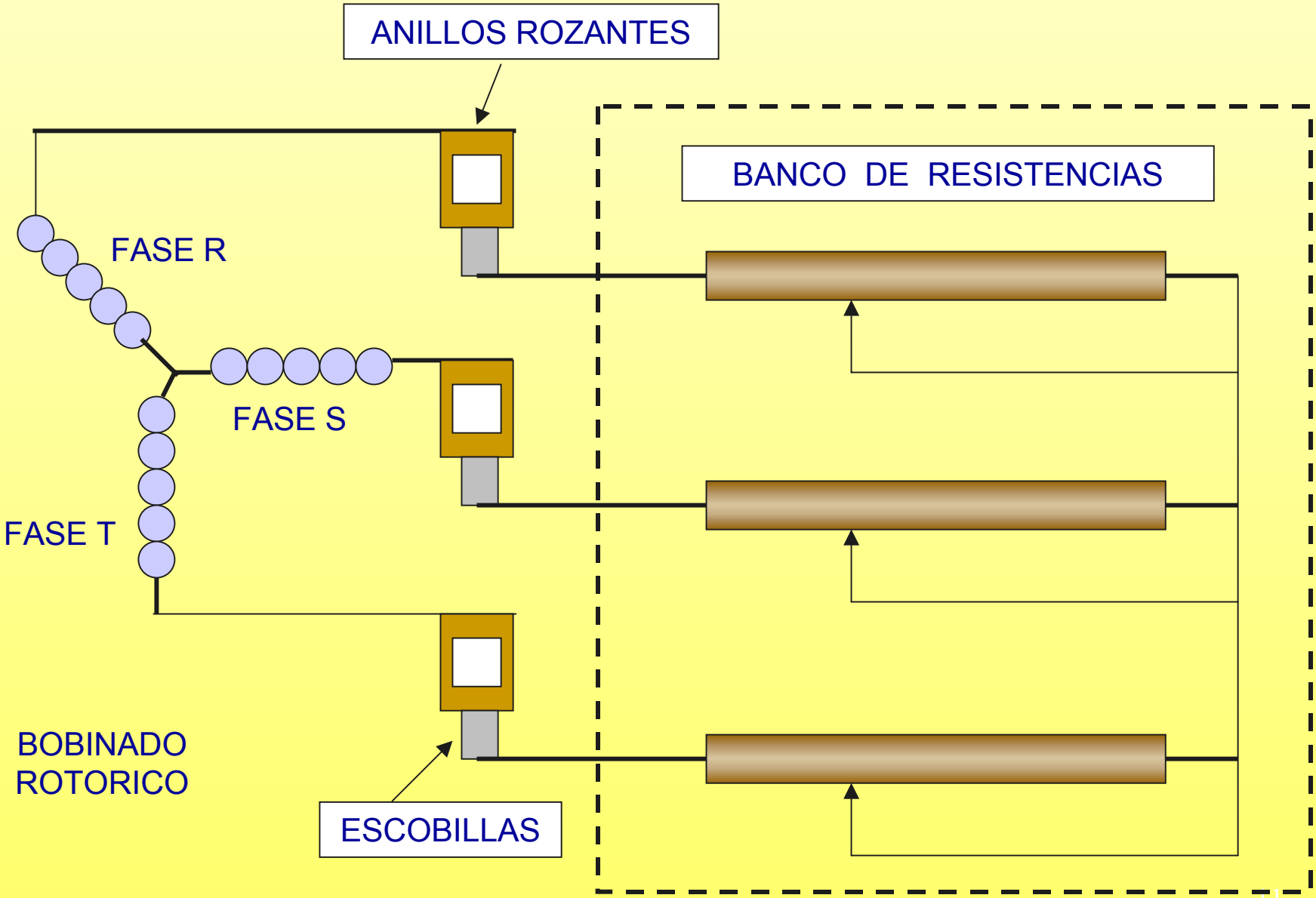
Cuando circula una corriente por el devanado estatórico se produce un campo magnético giratorio que viaja a Ws, este campo corta a los conductores del devanado rotórico, generando en ellos una f.e.m. Es cuando se producen corrientes circulantes por los arrollamientos del rotor, dichas corrientes generan a su vez otro campo giratorio que interaccionan entre sí, produciendo un torque electromagnético que pone en movimiento al rotor. Entonces definimos al deslizamiento como una característica de las máquinas rotantes asíncronas que es dada por la ecuación (1). Un incremento en las resistencias del devanado del rotor favorece al movimiento de la masa rotantante con respecto al estator, este fenómeno hace que aumente el torque de arranque.

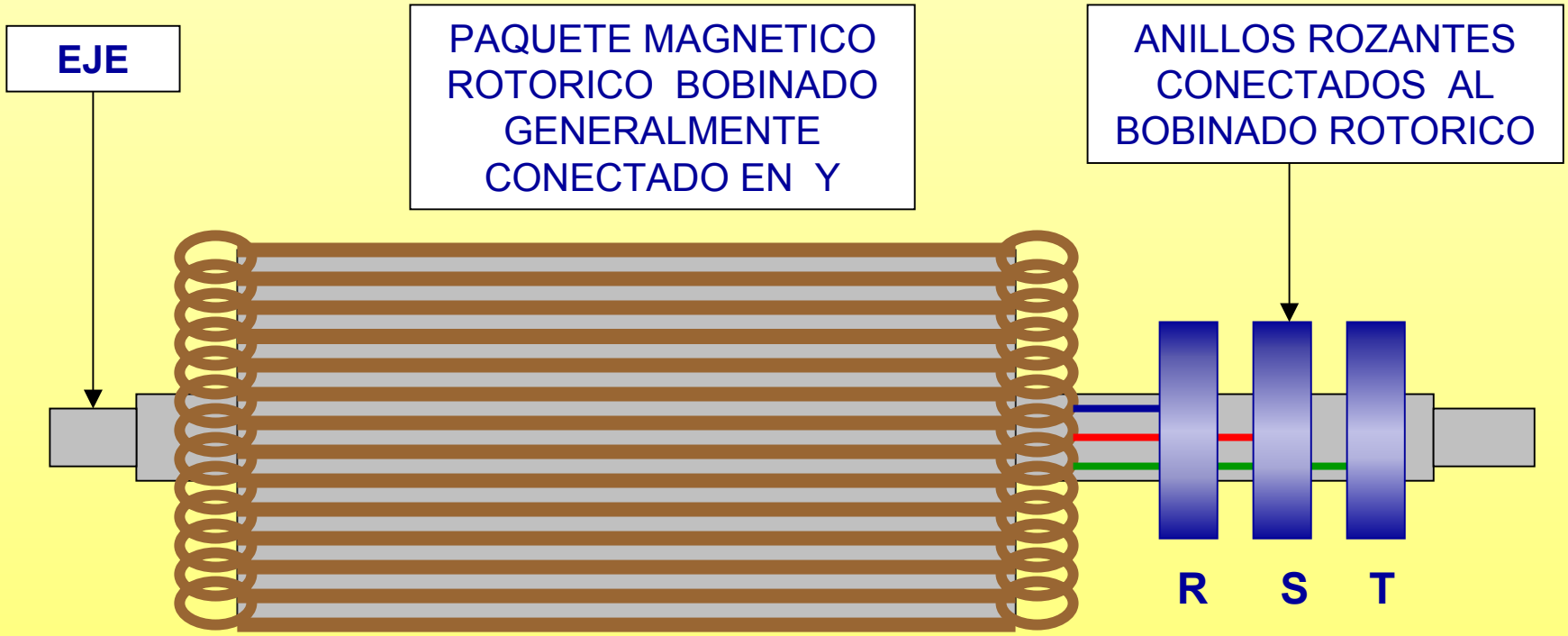


Para cada motor se diseña un banco de resistencias. Si las resistencias están por encima del valor establecido el torque se enpobrecerá y si está por debajo de su valor el torque también disminuirá como se puede observar en la figura .

Curva 1.- Resistencia rotórica externa muy pequeña.
Curva 2.- Resistencia rotórica externa pequeña.
Curva 3.- Resistencia rotórica externa ideal.
Curva 4.- Resistencia rotórica externa muy grande.
Estas curvas nos indican que el torque varía en función de los diversos valores que alcancen las resistencias del banco de resistencias que son reguladas en támden.

CONEXION DEL ROTOR BOBINADO




EJE
PAQUETE MAGNETICO ROTORICO BOBINADO GENERALMENTE CONECTADO EN Y
ANILLOS ROZANTES CONECTADOS AL BOBINADO ROTORICO
R
S
T

6.- Conexiones eléctricas del estator.- En la fabricación de los motores de rotor bobinado, los estatores, internamente pueden ser conectados en serie ó paralelo. El motor es conectado a la red de alimentación por intermedio de los bornes que se hallan en la caja de conexiones de la máquina. Si deseo utilizar dos o mas tensiones y/o emplear un sistema de arramque especial solicito el tipo de conexión externa que más se adecúa para mi sistema. Las conexiones externas mas comunes son:

TABLA N° 3.- SEIS TERMINALES ESTRELLA Y TRIÁNGULO.

ARRANQUE DIRECTO						ARRANAQUE ESTRELLA - TRIANGULO							
Voltaje	L1	L2	L3	UNIR		Voltaje	U	V	W	X	Y	Z	UNIR
Δ - 220	1,6	2,4	3,5	----		Y - Δ	1	2	3	4	5	6	---
Y - 380	1	2	3	4,5,6									

. **Estrella - triángulo.-** Tiene 06 terminales, se utiliza donde la relación de tensiones está relacionada con √3 (generalmente 220y 380 voltios) utilizándose cualquiera de las tensiones para arranque directo. Cuando se trata del arranque estrella - triángulo se utilizará la tensión correspondiente a la conexión triángulo tal como la figura 2.

. **Conexión múltiple.-** Es el resultado de la combinación de las conexiones estrella - triángulo serie y paralelo acomodada parados tensiones, y para ser realizada se necesita disponer de 12 terminales. Se utiliza para 04 tensiones que generalmente son: 220, 380, 440 y 760 Voltios. Es muy frecuente encontrar sistemas de arranque estrella trián-gulo para las tensiones 220 y 440 Voltios tal como se puede ver en la tabla N°.3.

7.- Circuito equivalente.- Los parámetros equivalentes monofásicos son muy análogos a las del transformador, luego el circuito equivalente aproximado es:

$Z_1 = R_1 + j X_1$ Impedancia del estator en Ohmios.
$Z_2 = R_2' + j X_2'$ Impedancia del rotor en Ohmios.
$Z_N = Z_{FE} + Z_M$ Impedancia del núcleo en Ohmios.

R_L = Es la carga del motor = $\{(1-S)/S\}.R_2'$
R_2' = Resistencia rotórica referido al estator en Ohmios.
X_2' = Reactancia rotórica referida al estator en Ohmios.
a = Constante de transformación.
Z_L = Impedancia de la carga en Ohmios.
Z_{SU} = Impedancia de pérdidas suplementarias en Ohmios.
a = N_1/N_2 donde N_1 y N_2 es el número de vueltas del estator y rotor.
R_1 = Resistencia estatórica en Ohmios.
X_1 = Reactancia inductiva estatórica en Ohmios.

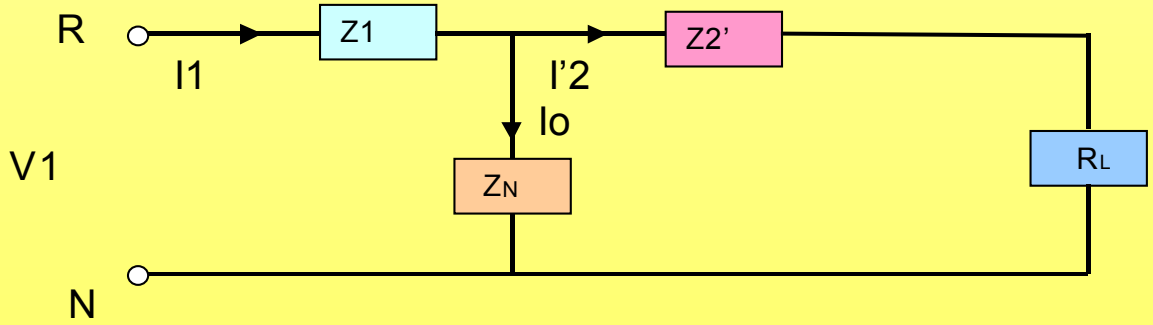


Fig..- Diagrama equivalente aproximado referido al estator

$$Z_{equiv.} = Z_1 + \frac{(Z_2 + Z_L) \cdot Z_O}{(Z_2 + Z_L + Z_O)}$$

La única forma de evaluar los parámetros del rotor (debido a la imposibilidad de poder realizar mediciones) es reflejándolos al estator y para poder cuantificar sus módulos empleamos la cons-tante de transformación tal como las ecuaciones (11) y (12).

$$R_2' = a^2 \cdot R_2$$

$$X_2' = a^2 \cdot X_2$$

Para una máquina asíncrona de rotor bobinado de mediana potencia puede aceptarse que $X_1 = X_2'$, ver tabla apéndice ensayos en AC (prueba de corto circuito).

8.- Pérdidas en la máquina.- Las pérdidas son las siguientes:

a.- Pérdidas en el núcleo.- Se presentan en el circuito magnético de la máquina como consecuencia de la utilización de la corriente alterna, con la finalidad de cuantificar esta energía absorvida por el núcleo expresaremos las ecuaciones siguientes:

Pérdidas por corrientes de Eddy (PE).- Llamada también corrientes parásitas, constituye la característica de operación de un circuito magnético excitado con C.A.

Pérdidas por histérisis (Ph).- La fuerza magnetomotriz utilizando corriente alterna presenta una curva cerrada y simétrica B vs H, y el área interna (dentro de la curva cerrada) es proporcional a la pérdida de energía (en forma de calor) por ciclo.

b.- Pérdidas en los bobinados estatórico y rotórico.- Son las pérdidas (efecto Joule) que se producen en los arrollamientos (alambre esmaltado) del estator y rotor respectivamente.

c.- Pérdidas por fricción y otros.- Está compuesto por las diversas fricciones (mal ajuste y/o acopla-mientos) producidas dentro de la máquina y también en la carga.

10.- Pruebas de rutina.- Las pruebas mínimas que deben realizarse a las máquinas rotativas para verificar su operatividad son llamadas las pruebas de rutina y para facilitar su comprensión, es que detallamos algunas de ellas, para lo cual se acompañan los modelos en la realización de estos ensayos. Para mayores detalles, sobre el 100% de los ensayos, estamos acompañando el apéndice A (ensayos en AC).

A.- Prueba en vacío.- En esta prueba es muy importante constatar que las curvas de excitación Vrst(voltios) vs If(Amperios) y Bmax (Gauss) vs H(Amper-vuelta / metro) sean iguales y para facilitar su cálculo se presentan las ecuaciones siguientes:

$$Bmax = (V_{LL} \times 10^{-8}) \; / \; 4.44 \times f \times A \times N \qquad (Gauss)$$

$$H = (N \times \sqrt{3} \, . \, If) \; / \; Lm \qquad (Amper\text{-}Vuelta/metro)$$

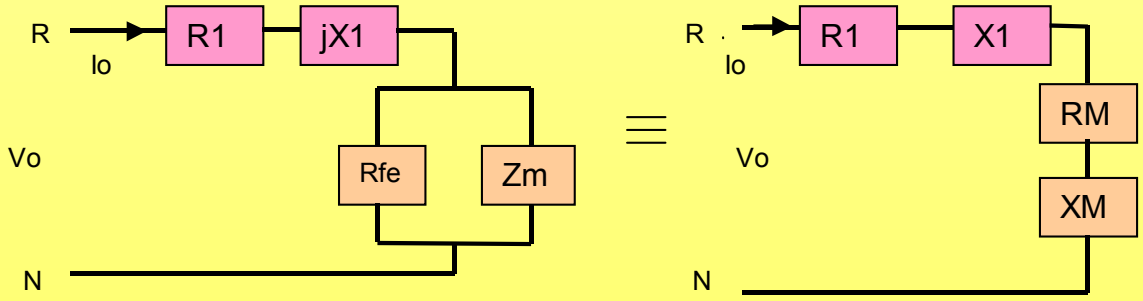


Fig..- Modelo monofásico del comportamiento del motor en vacío

Donde:

Lm = Longitud media al paquete magnético en m.
N = Número de vueltas del bobinado estatórico por fase.
A = Area transversal del paquete magnético estatórico. $A = L \times C$
L = Longitud del paquete magnético en m.
C = Altura de la corona en m.
f = Frecuencia del sistema Hz.
V_{LL} = Tensión de línea en Voltios.

Tomando como base la fig.4 y descartando la impedancia de pérdidas suplementarias ($Z_{SU} = 0$) siendo las impedancias del rotor y carga muy grandes ($Z_2 + Z_L \rightarrow \infty$), podemos plantear para esta prueba el siguiente modelo y formulación:

$$Z_O = V_O / I_O$$

$$R_O = P_O / I_O^2 = R_1 + R_M$$

$$X_O = \{ Z_O^2 - R_O^2 \}^{1/2} = X_1 + X_M$$

Donde:

Z_O = Es la impedancia por fase en vacío y en Ohmios.
V_O = Tensión de fase en Voltios.
R_O = Es la resistencia equivalente en vacío y en Ohmios.
P_O = Potencia monofásica o por fase en Vatios.
R_M = Resistencia del núcleo en Ohmios.
X_O = Reactancia equivalente en vacío y en Ohmios.
X_M = Reactancia magnetizante del núcleo en Ohmios.
I_O = Corriente de vacío en Amperios.

B.- Prueba de corto circuito (rotor bloqueado).- Las reactancias estatóricas y rotóricas para una máquina de rotor bobinado esta dado por las ecuaciones (22) y (23), mas detalles se puede encontrar en el apéndice Ensayos en AC.

$$X1 = 0.5\ Xcc \qquad (22)$$

$$X_2' = 0.5\ Xcc \qquad (23)$$

TABLA NO 4.- REACTANCIAS ESTATÓRICAS Y ROTÓRICAS

Tipo de motor	Clase NEMA A	Clase NEMA B	Clase NEMA C	Clase NEMA D	Rotor Bobinado
X_1	0.5 Xcc	0.4 Xcc	0.3 Xcc	0.5 Xcc	0.5 Xcc
X_2'	0.5 Xcc	0.6 Xcc	0.7 Xcc	0.5 Xcc	0.5 Xcc

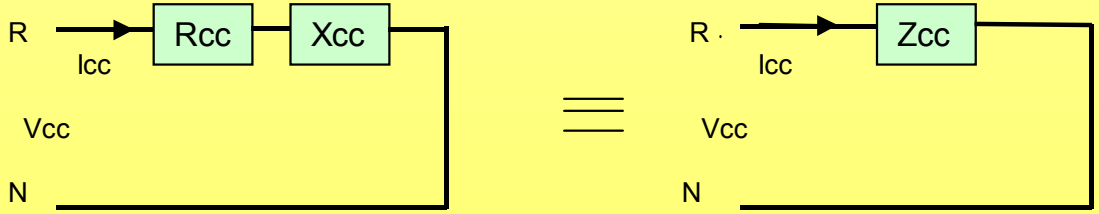


Fig.- Modelo monofásico del motor con rotor bloqueado

Con la figura anterior teniendo en cuenta que: Z_N >>>> ($Z_2 + Z_L$) y estando el rotor en corto circuito o rotor bloqueado $Z_L = 0$, entonces desarrollando el paralelo entre Z_N y Z_2 encontramos que la impedancia equivalente es » Z_2 (aceptable según la norma IEC) Esto nos permite plantear el siguiente modelo y formulación:

$$Z_{CC} = V_{CC} / I_{CC}$$

$$R_{CC} = P_{CC} / I_{CC}^2 = R_1 + R_2'$$

$$X_{CC} = \{ Z_{CC}^2 - R_{CC}^2 \}^{1/2} = X_1 + X_2'$$

Donde:

Z_{CC} = Es la impedancia corto circuito en Ohmios.
V_{CC} = Tensión de fase y de corto circuito en Voltios.
I_{CC} = Corriente de corto circuito por fase en Amperios.
R_{CC} = Es la resistencia equivalente en corto y en Ohmios.
P_{CC} = Potencia monofásica en corto circuito en Vatios.
X_{CC} = Reactancia equivalente en corto y en Ohmios.

C.- Medida de la relación de transformación.- Para realizar este ensayo es imprescindible tener los bobinados del estator y rotor completamente libres, y por tanto todos sus terminales tienen que estar bien aislados. En estas condiciones proceder como sigue:

- Aplicar a los bornes del estator la tensión de placa "Vs" en voltios (tensión nominal del estator) y medir la tensión inducida en el rotor "Vr'" en voltios.
- Aplicar a los bornes del rotor la tensión de placa "Vr" en voltios (tensión nominal del rotor) y medir la tensión inducida en el estator "Vs'" en voltios.
- La relación de transformación medida (RTM) esta dado por la siguiente ecuación:

$$RTM = \{ (Vs / Vr') . (Vr / Vs') \}^{1/2}$$

$$RTM = Vs / Vr$$

- Para que la prueba sea buena se requiere que las ecuaciones (27) y (28) sean aproximadamente iguales (caso contrario comunicarse con el especialista).

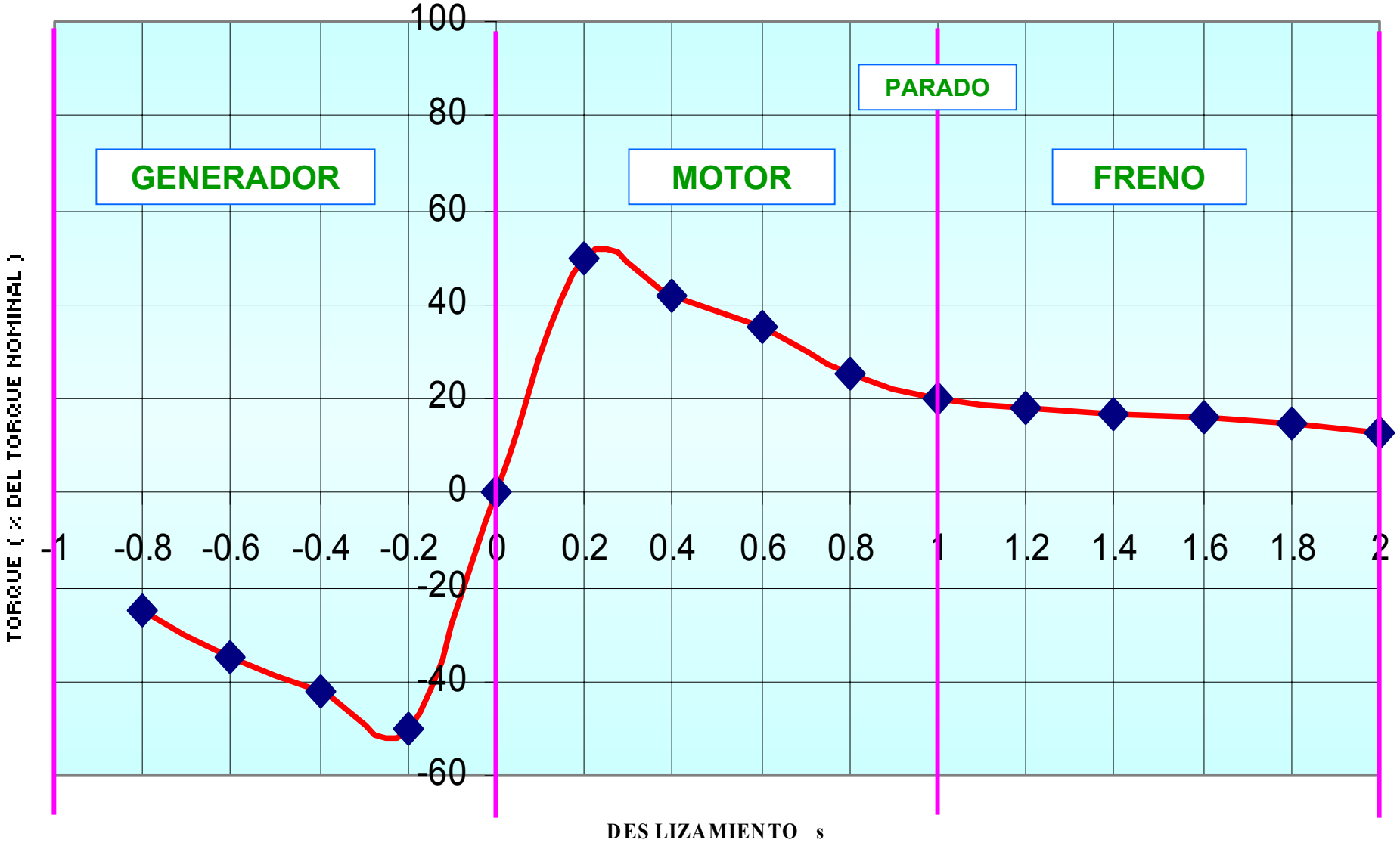
D.- Pruebas adicionales.- Teniendo en cuenta que este motor tiene tres anillos rozantes conectados hacia el banco de resistencias por medio de un juego de escobillas, es necesario realizar controles periódicos a los siguientes elementos:

- Banco de resistencias trifásico.
- Medida de la presión del sistema portaescobillas.
- Asentamiento de las escobillas y centrado.
- Selección de las escobillas.

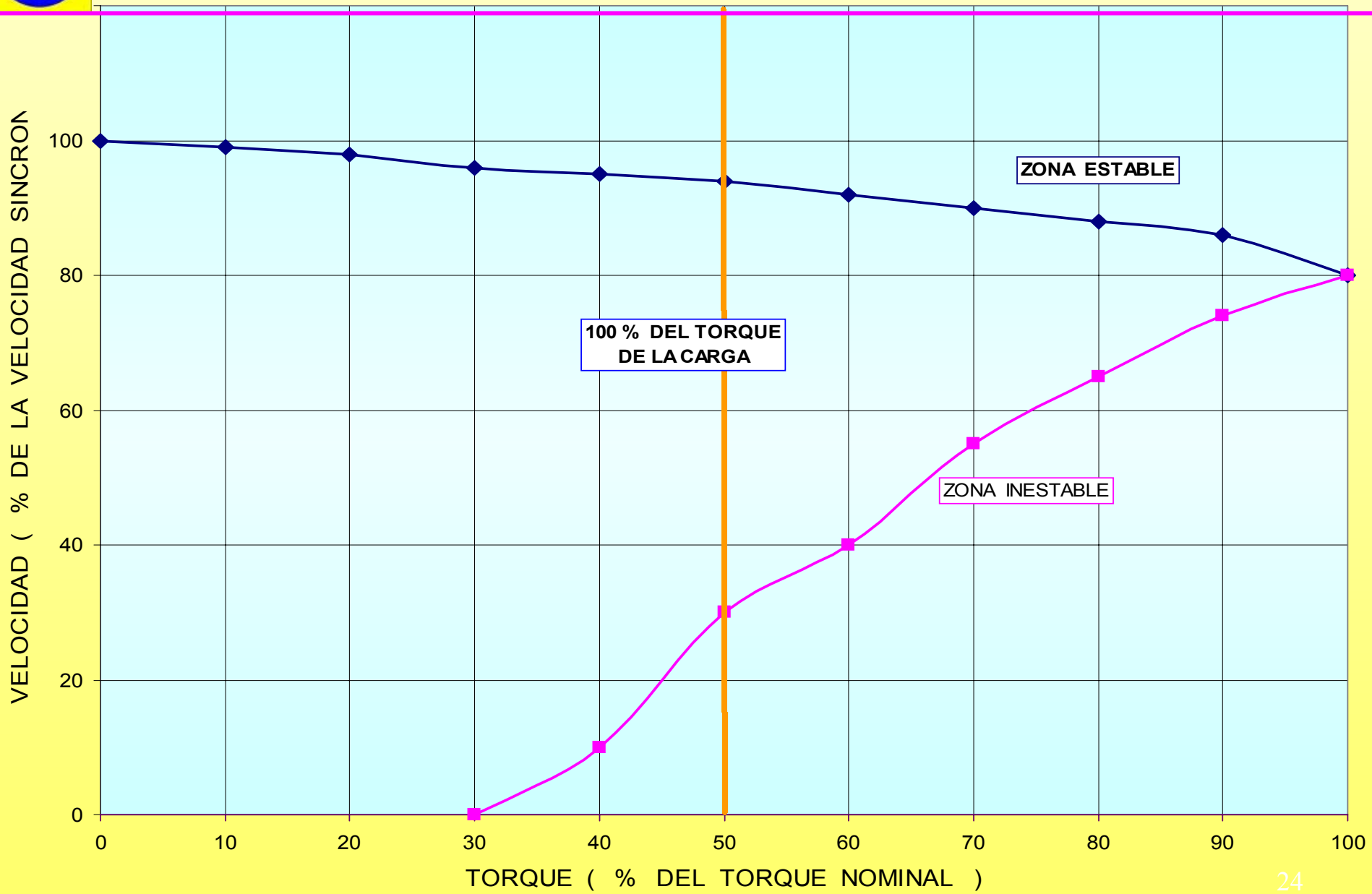
11.- Aplicaciones industriales.- Teniendo en cuenta sus características en el arranque (categoria D) el motor de rotor bobinado cubre todas las exigencias de las diversas cargas que se pueden encontrar en los procesos manufactureros industriales. Su robustez y gran versatibilidad de aplicaciones hacen que este motor sea el preferido para ser utilizado en las siguientes cargas:

- Grúas y Winches.
- Molinos de gran tamaño.
- Compresoras de aire.
- Electroventiladores centrífugos y axiales grandes.
- Fajas transportadoras de gran longitud.
- Prensas de punzonar e imprenta.
- Tornos y elevadores.
- Máquinas que requieren de un arranque gradual y velocidad ajustable.
- Instalaciones lejanas con mucha caída de tensión.

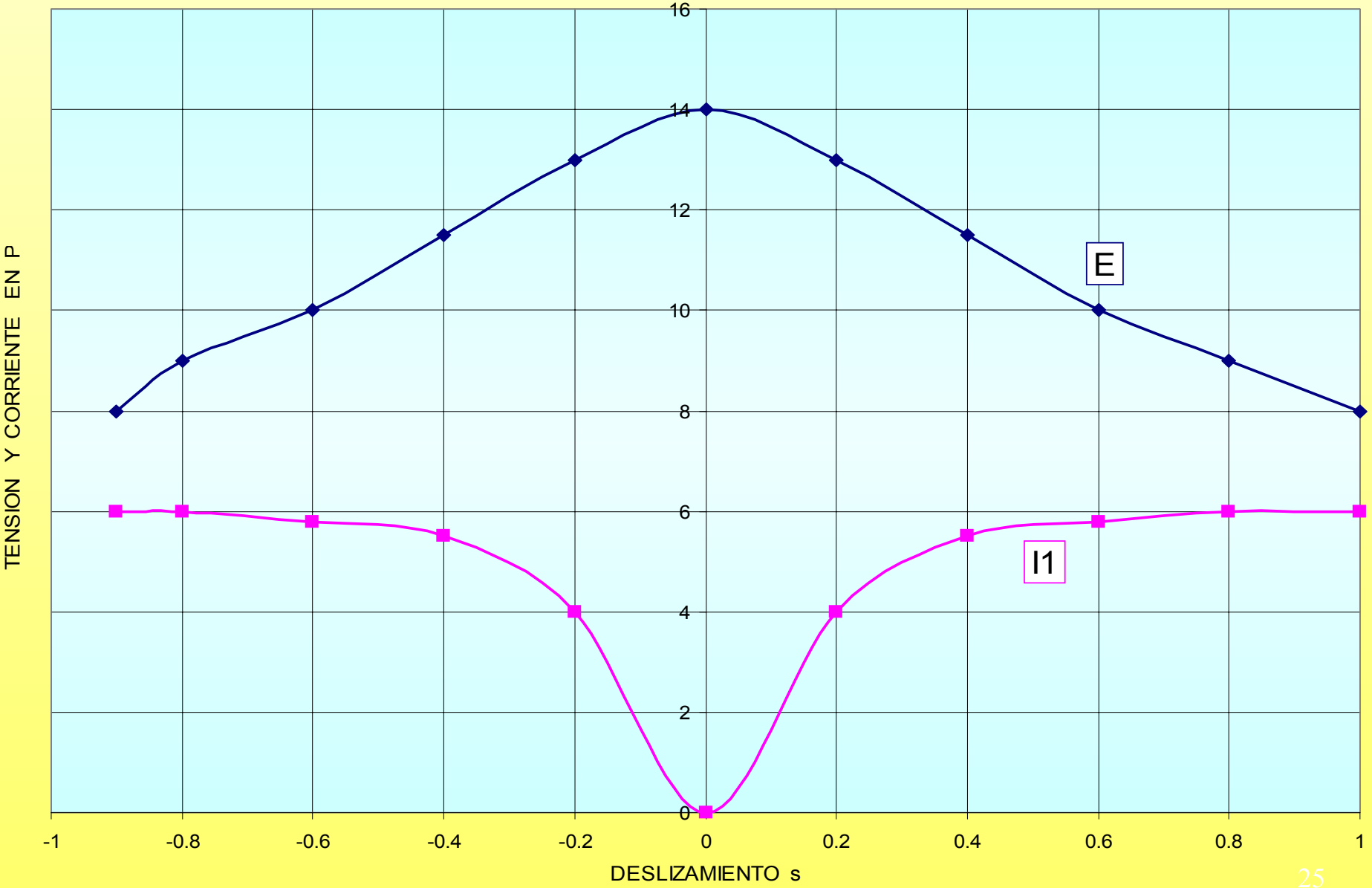
CARACTERISTICAS DEL GENERADOR - MOTOR Y FRENO



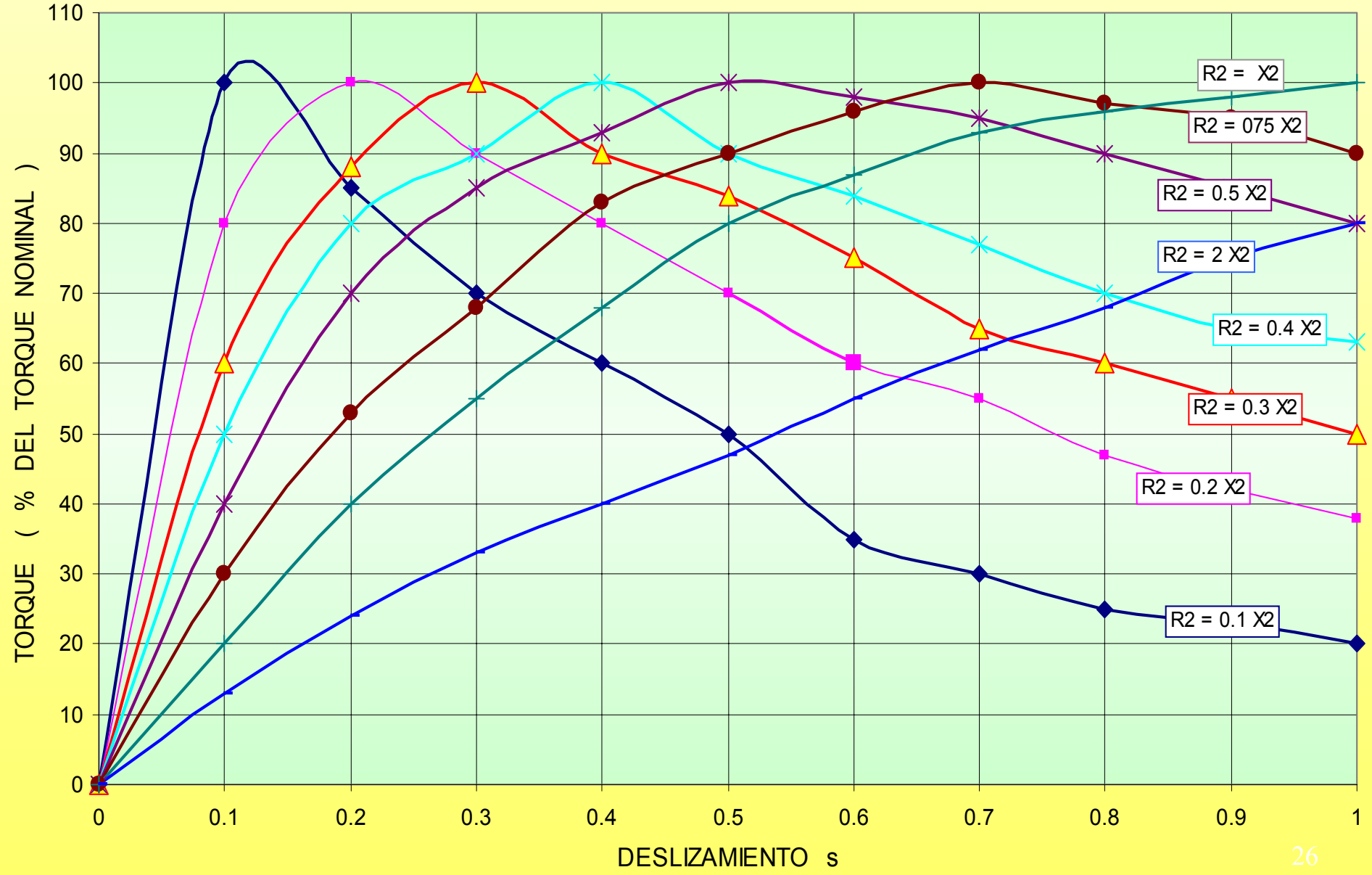
ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE LAS MAQUINAS DE INDUCCION



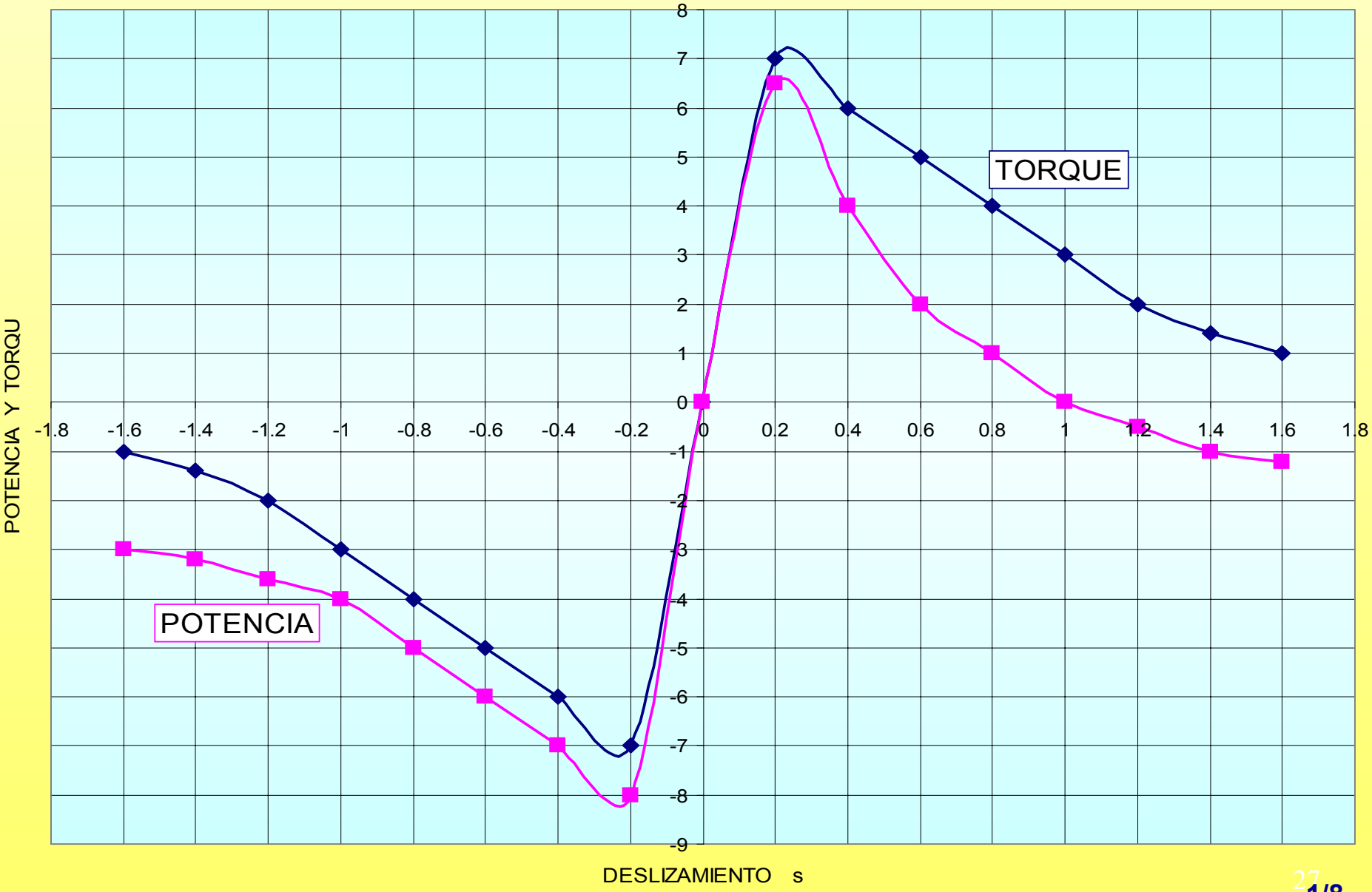
COMPORTAMIENTO DE LA TENSION Y CORRIENTE DE LOS GENERADORES Y MOTORES DE INDUCCION



CARACTERISTICAS DE ARRANQUE DE LOS MOTORES CON ROTOR BOBINADO UTILIZANDO BANCO DE RERSISTENCIAS



CARACTERISTICAS DE POTENCIA Y TORQUE VS DESLIZAMIENTO



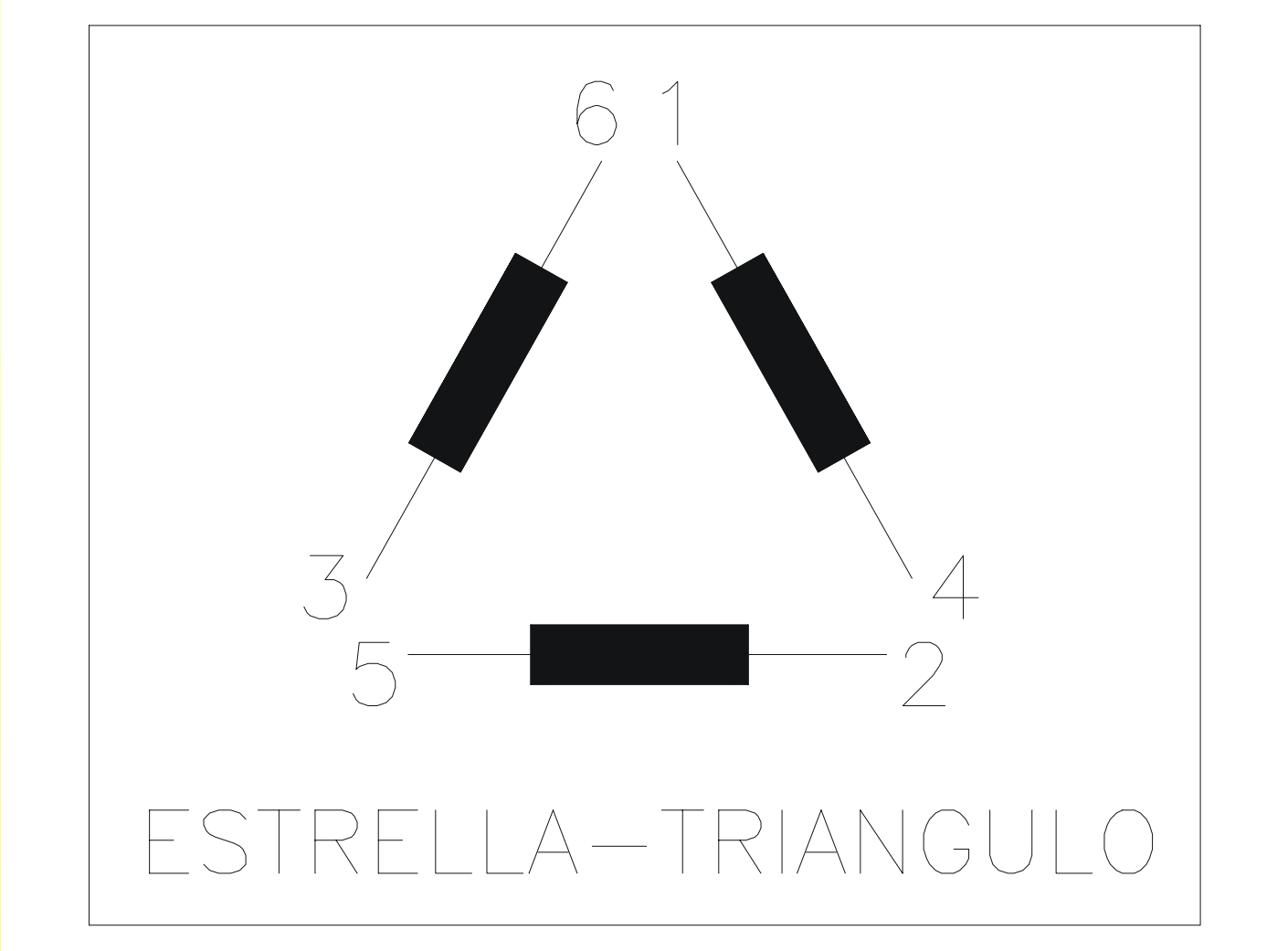
CONEXIÓN DE LOS SISTEMAS TRIFÁSICOS

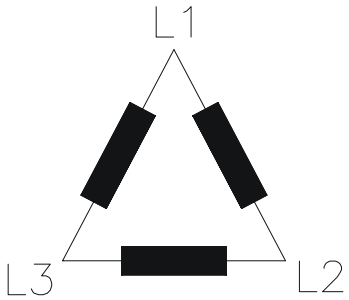
Se trata de las diferentes modalidades de conexión de circuitos trifásicos de corriente Alterna INDUSTRIALES.

Presentamos a continuación los siguientes tipos de conexión trifásica:

CONEXIÓN ESTRELLA O TRIÁNGULO

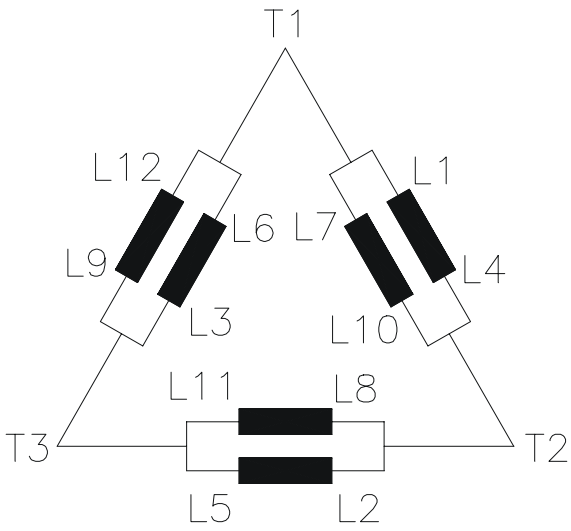
VOLTAJE	L1	L2	L3	UNIR
D-220	1,6	2,4	3,5	
Y-380	1	2	3	4,5,6


6
1
3
4
5
2
ESTRELLA-TRIANGULO



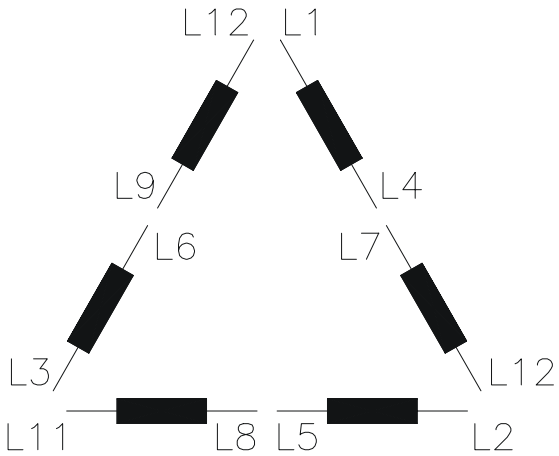
TERMINALES	VOLTIOS
L1–L2	220
L2–L3	220
L1–L3	220

CONEXIONE SERIE–TRIANGULO
03 TERMINALES



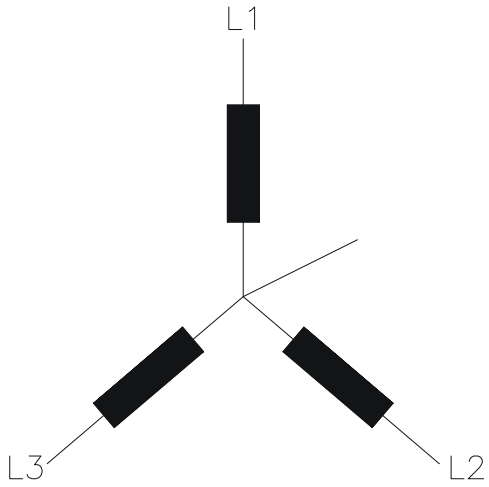
TERMINALES	VOLTIOS
T1–T2	220
T2–T3	220
T1–T3	220

CONEXIONE PARALELO–TRIANGULO
12 TERMINALES



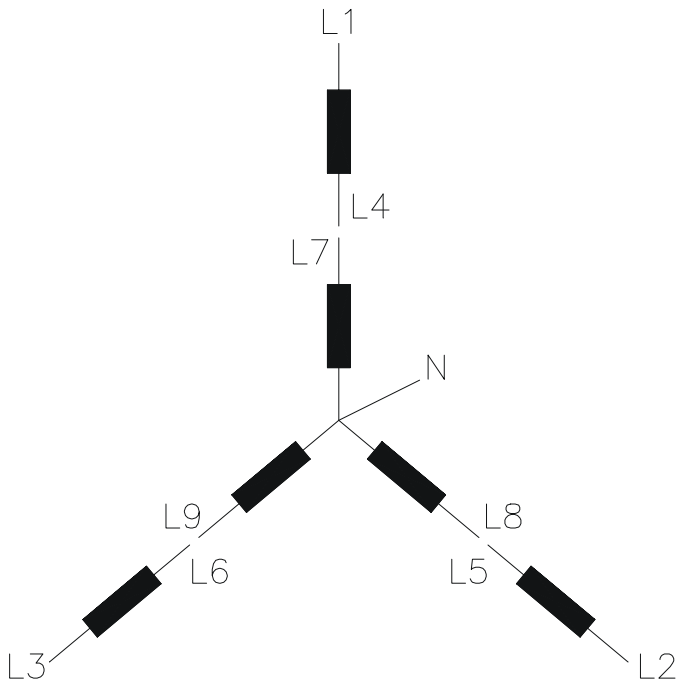
TERMINALES	VOLTIOS
L1,L12–L2,L10 L2,L10–L3,L11 L1,L12–L3,L11	440 440 440
UNIR : (L4,L7),(L5,L8) Y (L6,L9)	

CONEXIONE SERIE–TRIANGULO
12 TERMINALES



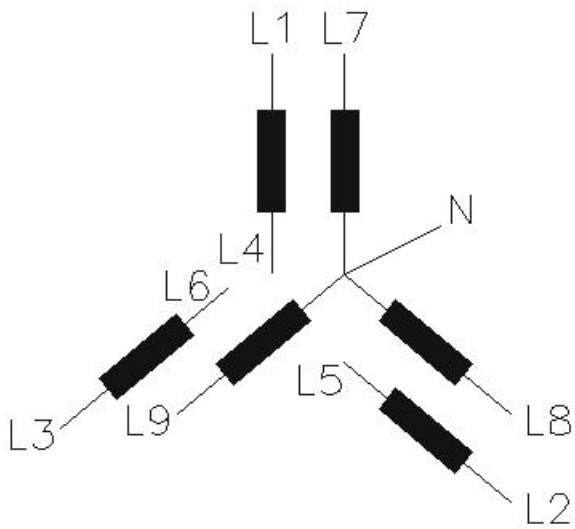
TERMINALES	VOLT	TERMINALES	VOLT
L1–L2	380	L1–N	220
L2–L3	380	L2–N	220
L1–L3	380	L3–N	220

CONEXIONE SERIE–ESTRELLA 03 TERMINALES



TERMINALES	VOLTIOS
L1–L2	440
L2–L3	440
L1–L3	440
L7–L8	220
L8–L9	220
L7–L9	220
L1–N	254
L2–N	254
L3–N	254

CONEXIONE SERIE–ESTRELLA 09 TERMINALES



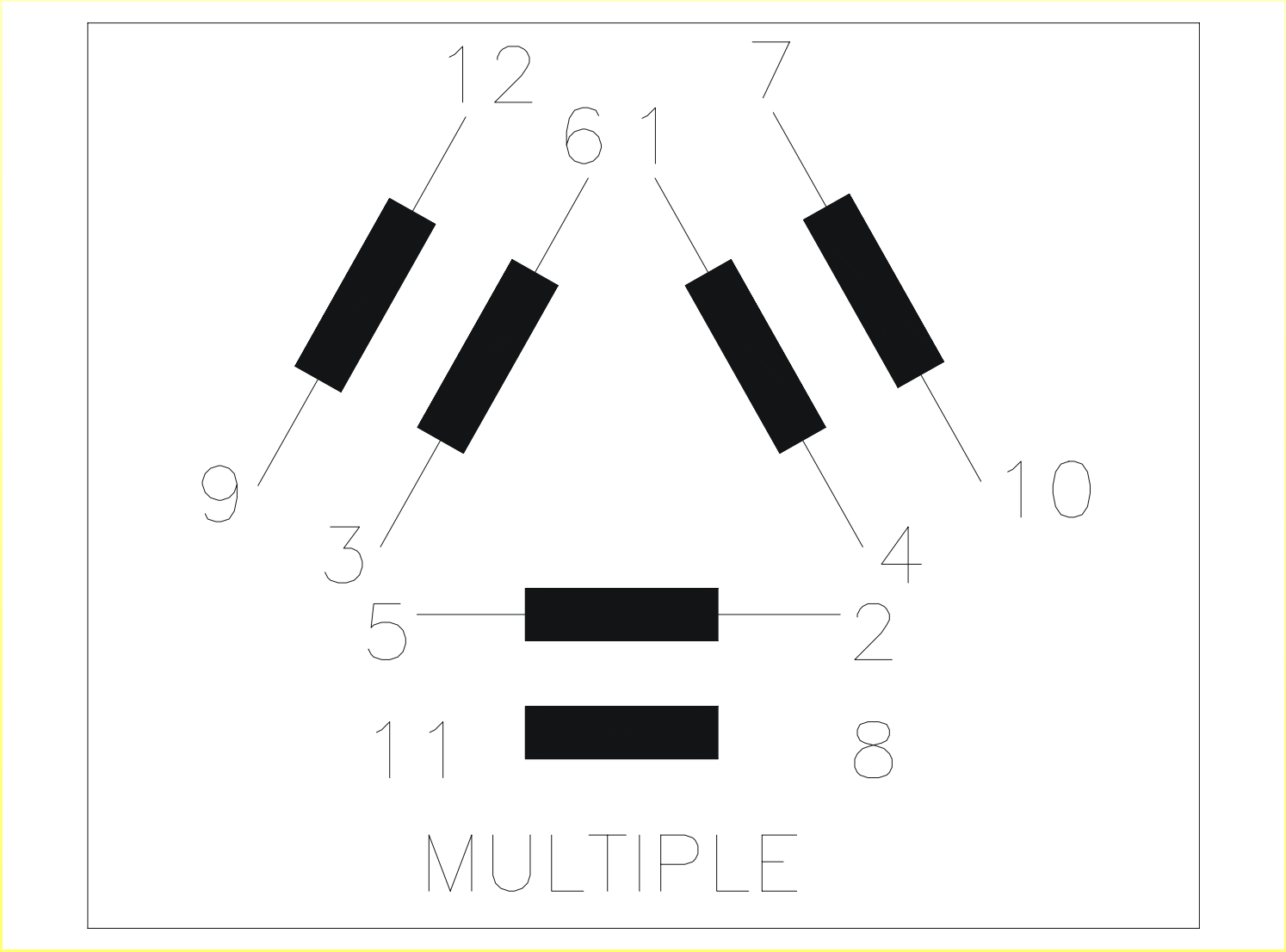
TERMINALES	VOLTIOS
L1,L7–L2,L8	220
L2,L8–L3,L9	220
L3,L9–L1,L7	220
L1,L7–N	127
L2,L8–N	127
L3,L9–N	127
UNIR : L4,L5,L6	

CONEXIONE PARALELO–ESTRELLA 09 TERMINALES

CONEXIÓN MÚLTIPLE

Se trata de varios tipos de conexiones utilizando las conexiones estrella y triángulo ya vistos anteriormente.

El caso más usual es: 220/380/440/760 voltios, para lograrlo se utilizan las conexiones triángulo y estrella conectados en serie y paralelo como muestra la siguiente figura.


12
7
6
1
9
10
3
4
5
2
11
8
MULTIPLE

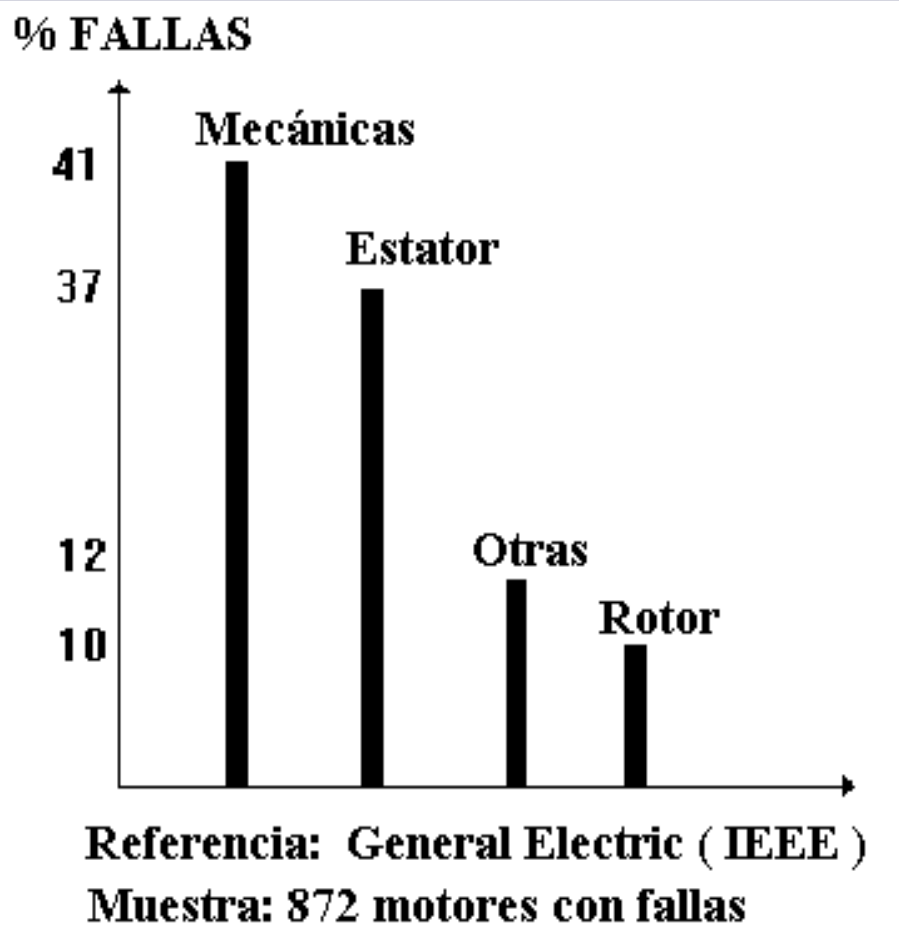
CONEXIÓN MÚLTIPLE

VOLTAJE	L1	L2	L3	UNIR
DD-220	1,6,7,12	2,4,8,10	3,5,9,11	
YY-380	1,7	2,8	3,9	4,5,6,10,11,12
D-440	1,12	2,10	3,11	(4,7),(5,8),(6,9)
Y-760	1	2	3	(4,7),(5,8),(6,9)

CONTINUA....

De las conexiones anteriores trataremos de presentar un cuadro que involucra la relación de sus corrientes, tensiones y potencias desarrolladas en las conexiones estrella y triángulo.

CONEX.	UL(volt)	IL(amp)	POTENCIA(va)
Y	$UL = \sqrt{3} \times UF$	$IL = IF$	$P = 3 \times UF \times IF$
D	$UL = UF$	$IL = \sqrt{3} \times IF$	$P = \sqrt{3} \times UL \times IL$


% FALLAS
Mecánicas
Estator
Otras
Rotor
41
37
12
10
Referencia: General Electric (IEEE)
Muestra: 872 motores con fallas

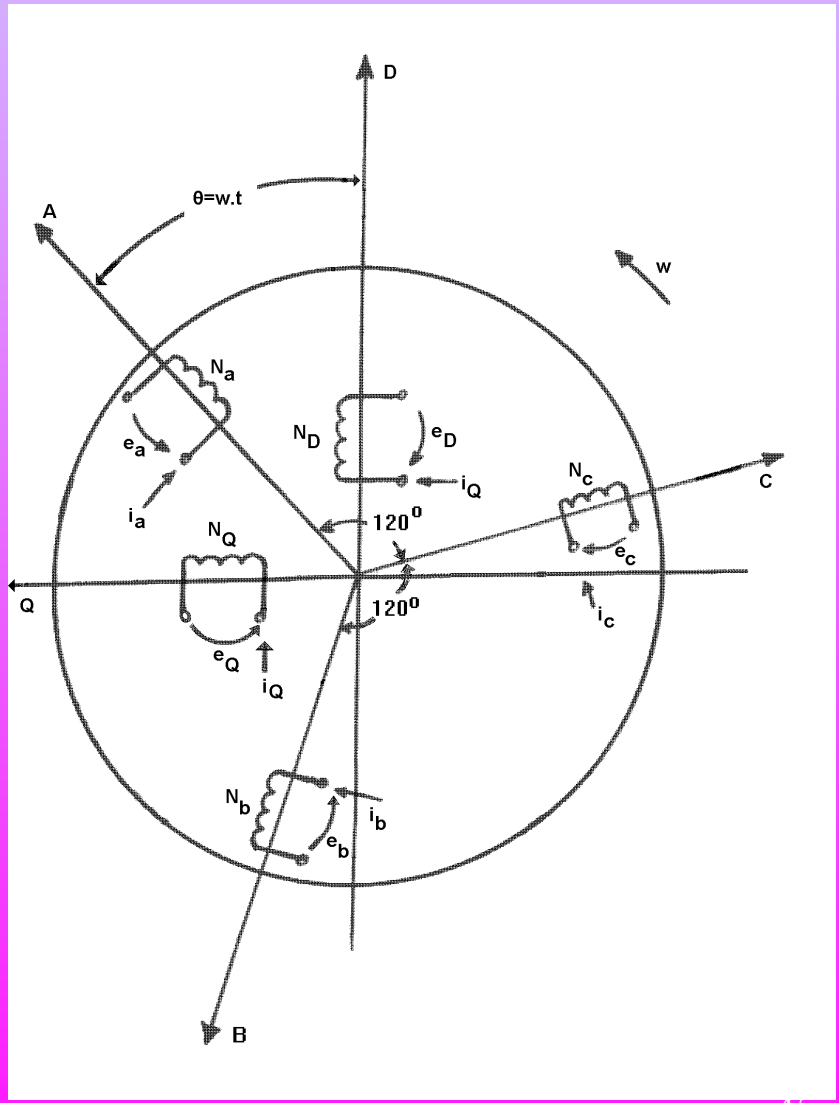
Modelo del motor de inducción simétrico

Transformación del sistema trifásico para el bifásico (d-q)

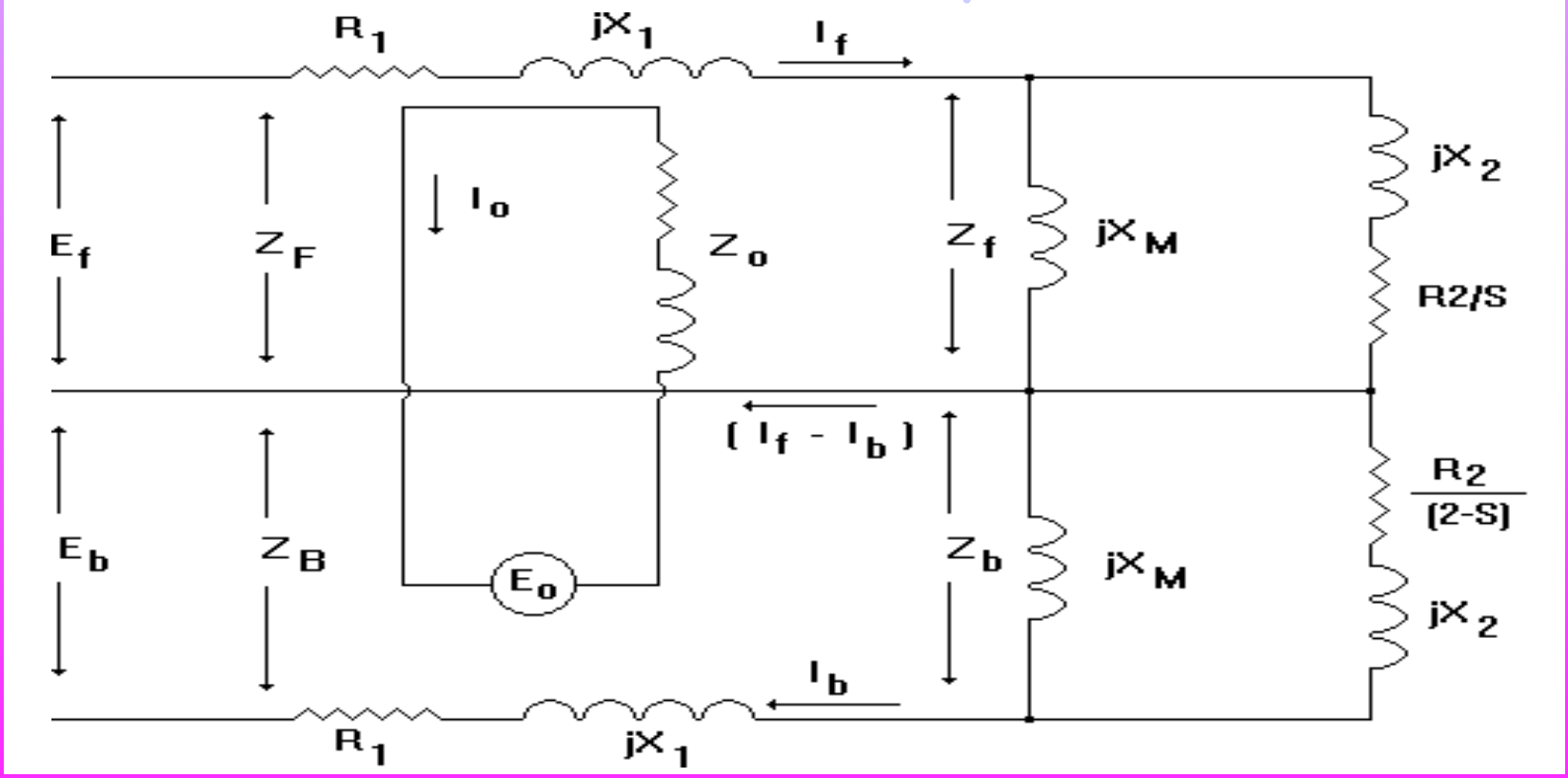
$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_o \end{bmatrix} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) . \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\operatorname{sen}\theta & -\operatorname{sen}(\theta - 2\pi/3) & -\operatorname{sen}(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) i_a - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_b - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_c$$

$$i_Q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_b - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_c$$



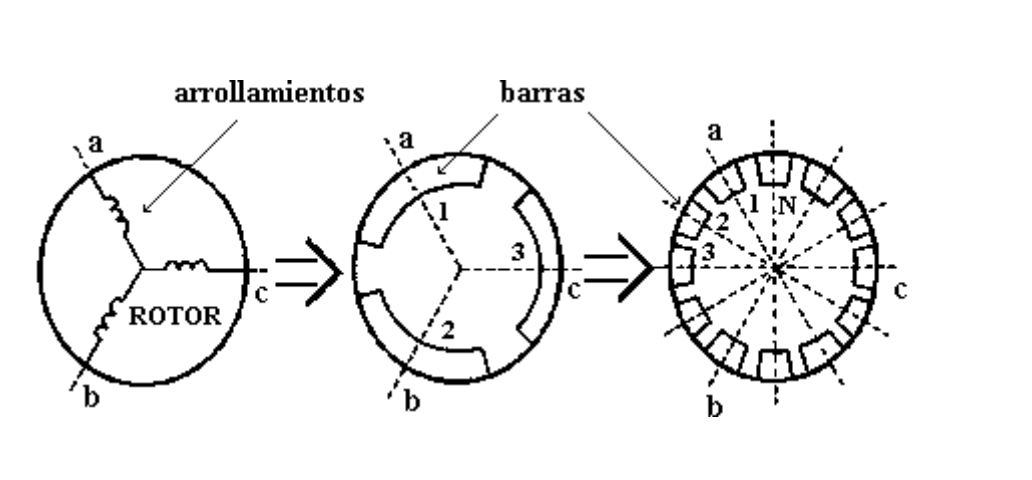
Modelo del motor de inducción

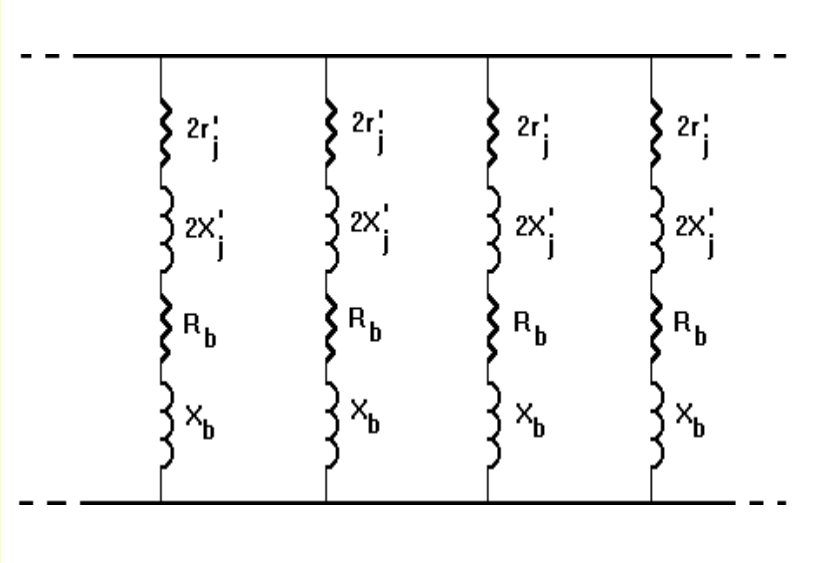


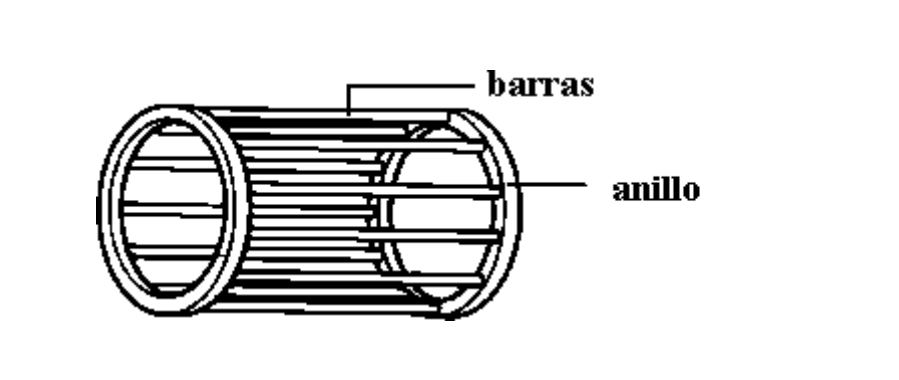
$$k = \frac{N_S - N_d}{N_S}$$

Modelo multiarrollamiento simplificado

(Parámetros a partir del equivalente convencional)



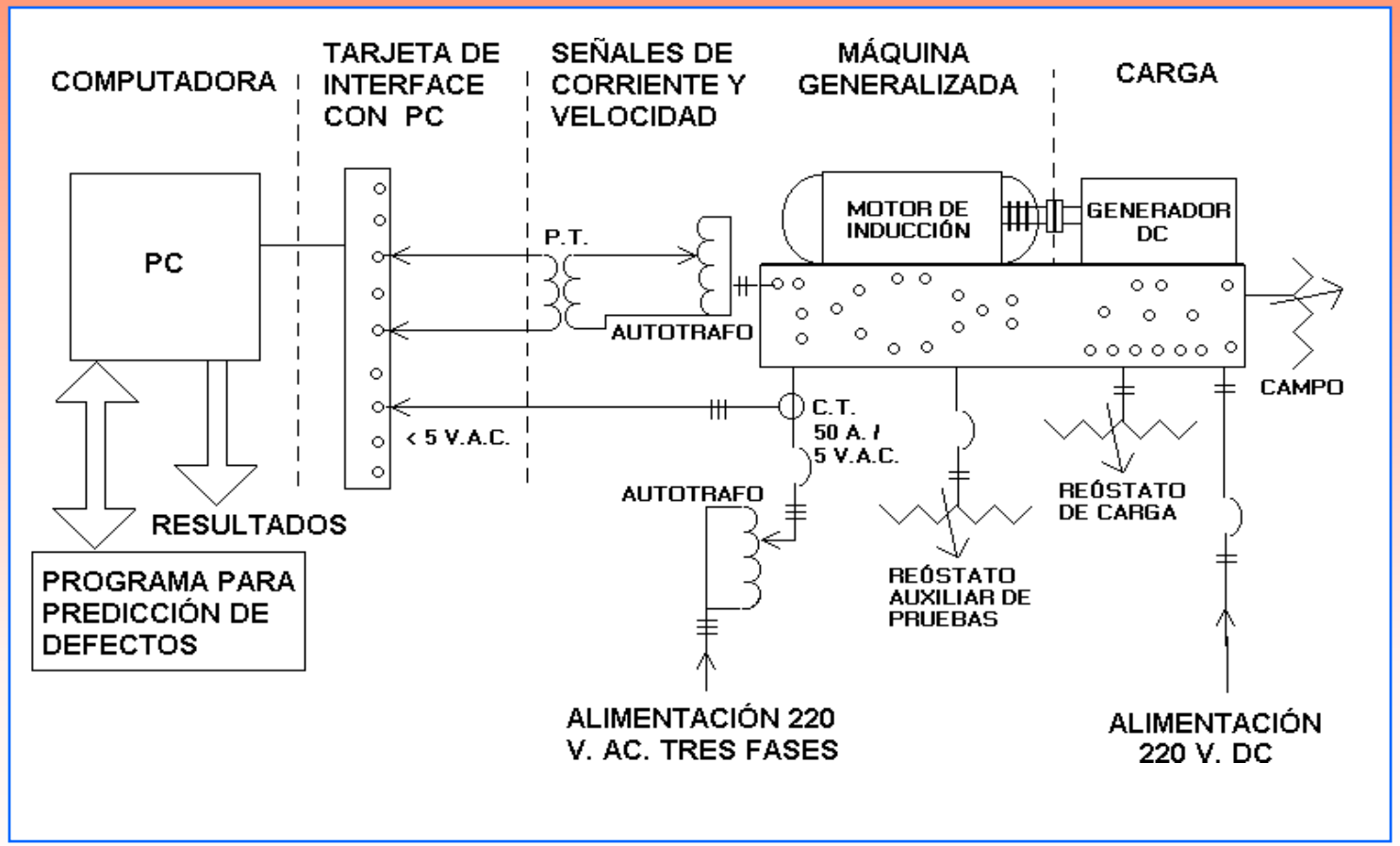




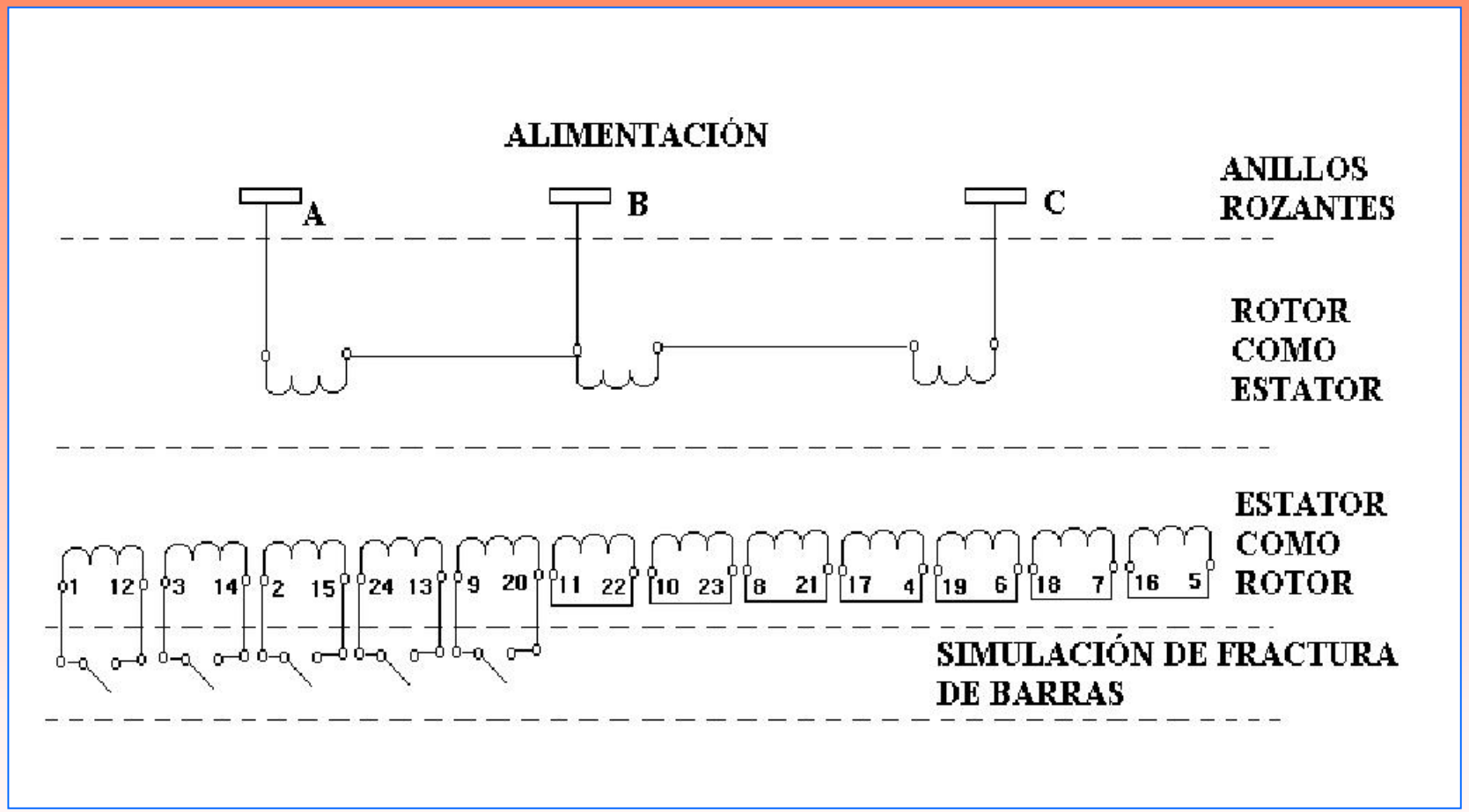
$$R_r = \left(\frac{N}{3}\right) R_{r3\phi}$$

$$[L_r] = \left(\frac{N}{3}\right) \cdot [L_{r3\phi}]$$

ESQUEMA DE CONEXIONES PARA LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DE FALLAS EN EL ESTATOR Y ROTOR



Esquema de conexiones para la prueba de fractura de barras rotoricas



BIBLIOGRAFÍA

- "Seminario Profesional de ´Máquinas Eléctricas en la Industria"
  Ing. Guillermo Cox Zapater

- "Generadores Síncronos"
  Ing. Huber Murillo M.

- "Máquinas Síncronas Trifásicas de Gran Porte"
  Ing. Huber Murillo M.