UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

ANALISIS DEL ROTOR TIPO JAULA DE ARDILLA

EXPOSITOR : Ing. HUBER MURILLO M.

INTRODUCCIÓN

Modificando las características físicas de los rotores de los motores de inducción se pueden obtener una gran variedad de curvas par – velocidad. Con el fin de apoyar a la industria se han puesto a disposición de la industria las normas que gobiernan los resultados de éstos diseños las mismas que son las siguientes:

NEMA National Electrical Manufacturers Association - EEUU.
IEC International Electrical Commission - Europa
ASTM American Society for Testing and Materials.
ANSI American National Standart Institute. (Antes)
IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. (Ahora)
UL Laboratories Undercoasting
VDE Normas alemanas.

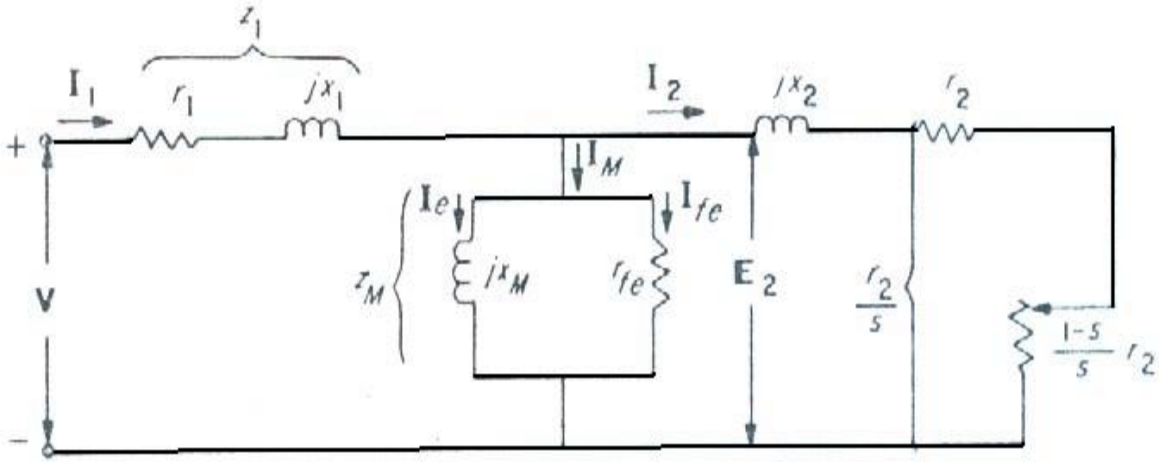


Fig. (a) Circuito equivalente

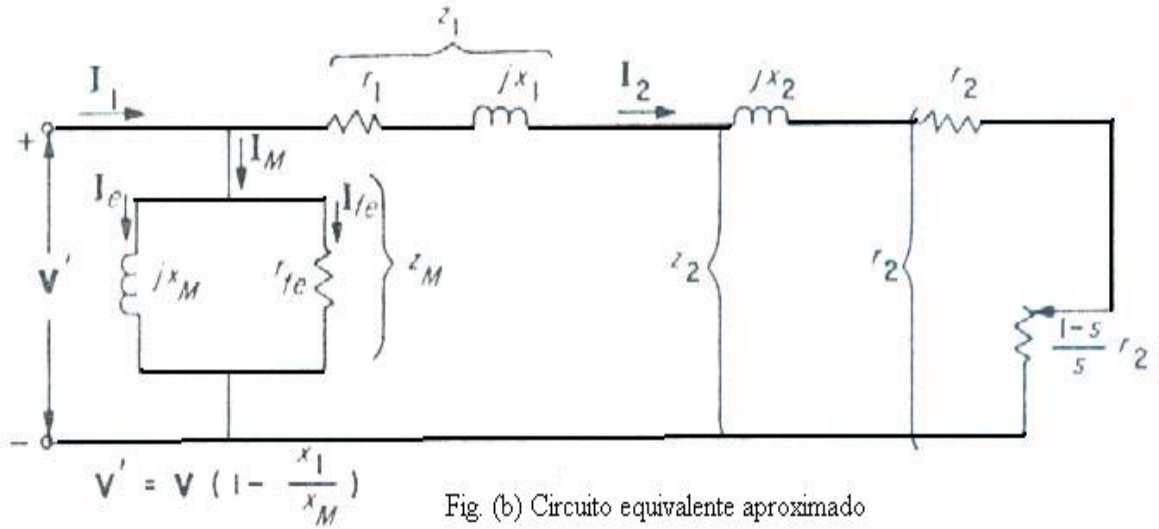
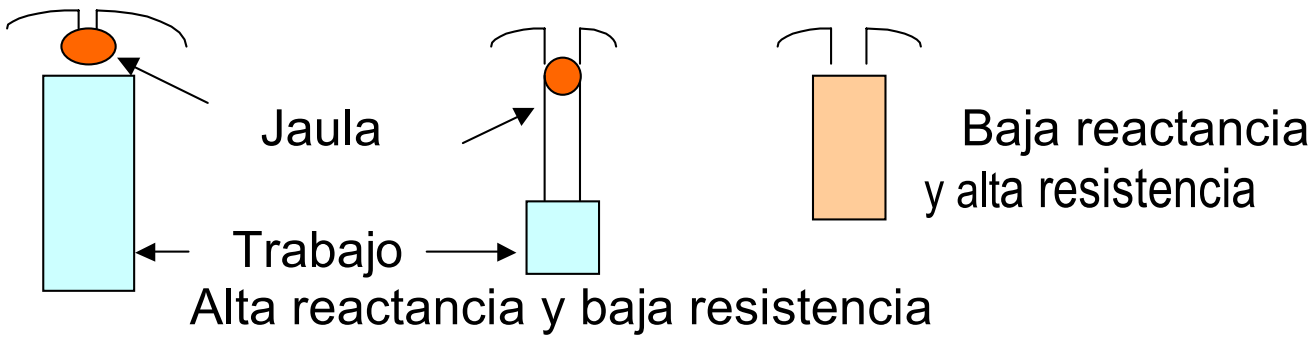


Fig. (b) Circuito equivalente aproximado

1.- TIPOS DE JAULAS EN LOS ROTORES

Según la ubicación y tipo de las ranuras rotóricas podemos afirmar que:

- Las barras superiores (Jaula de arranque) están sumergidas en un fuerte flujo producido por el estator, así mismo están mas próximas al entrehierro, producirán **reactancias pequeñas**.
- Las barras inferiores (Jaula de trabajo) están sumergidas en un flujo menos intenso ya que se hallan mas alejados al entrehierro, produciendo **reactancias mas grandes.**
- La barra superior es de una aleación de cobre de alta resistencia y la inferior puede ser de cobre o aluminio de baja resistencia.



Doble jaula Doble jaula Simple jaula (Ranura profunda)

Fig. N° 1.- Tipos de ranuras en los rotores asíncronos trifásicos.

1.- TIPOS DE JAULAS EN LOS ROTORES

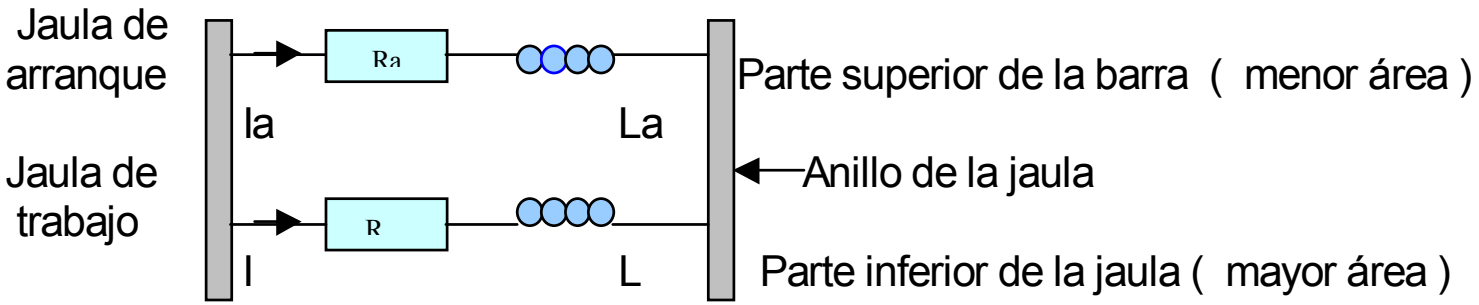
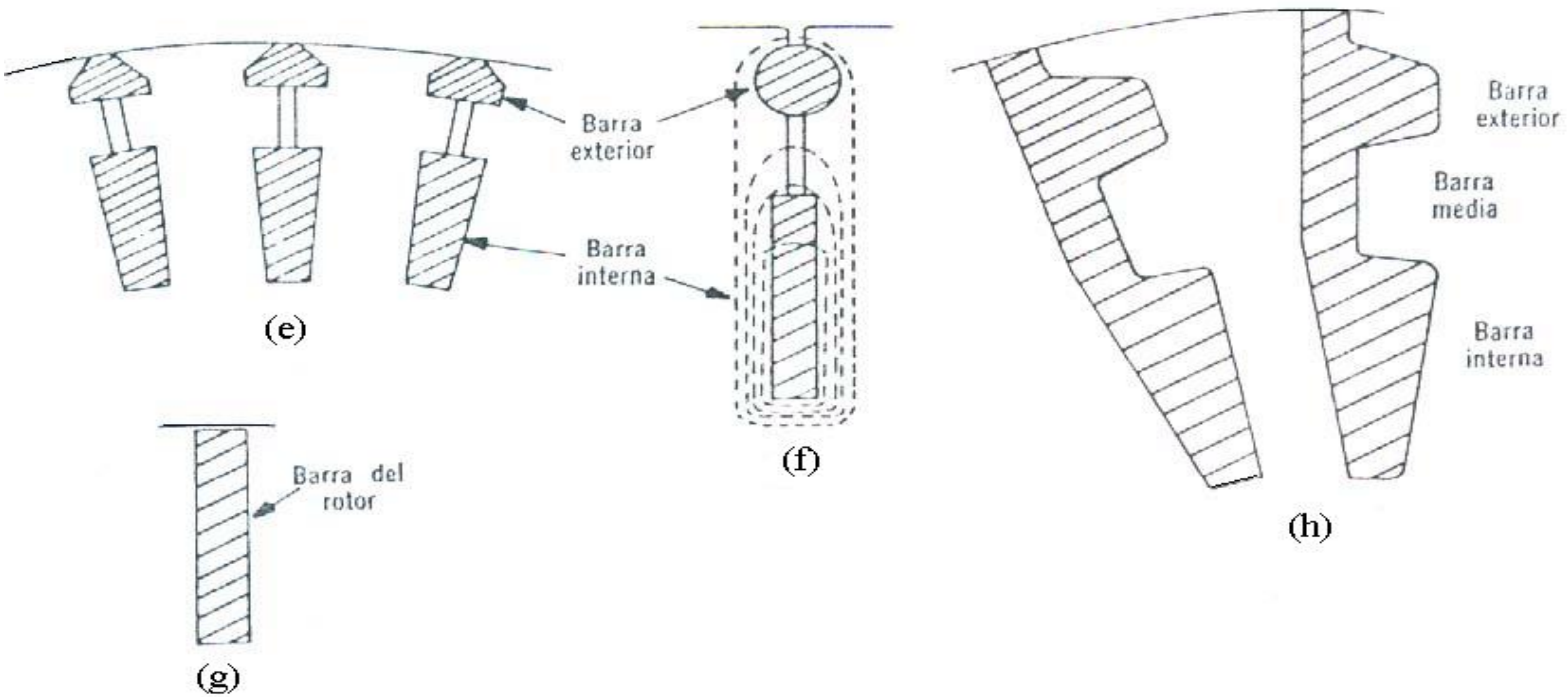
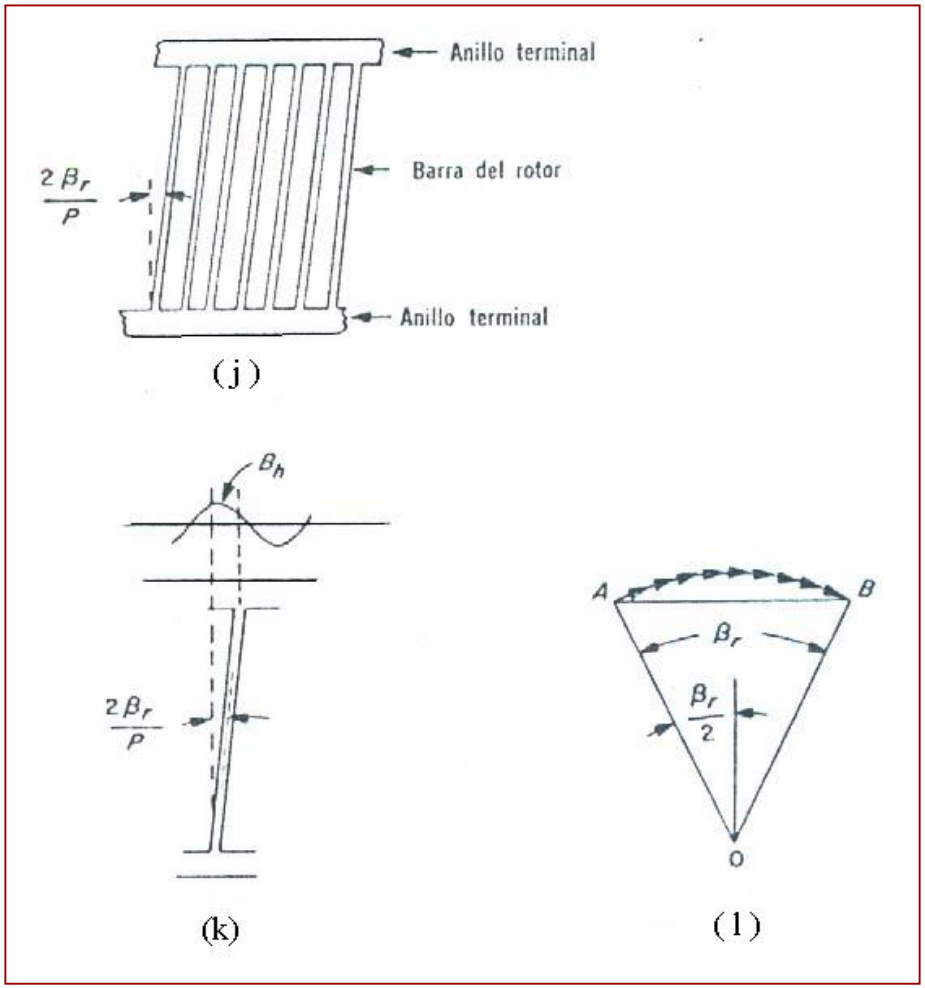


Fig. N° 1.- Tipos de ranuras en los rotores asíncronos trifásicos.





Las desventajas de la oblicuidad son:

Un voltaje inducido del rotor reducido.

Una resistencia del rotor incrementada y una reactancia de dispersión del rotor incrementada.

Pero estas desventajas se viene abajo con el mejor funcionamiento en el arranque y una operación más silenciosa.

DIAGRAMA FASORIAL DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

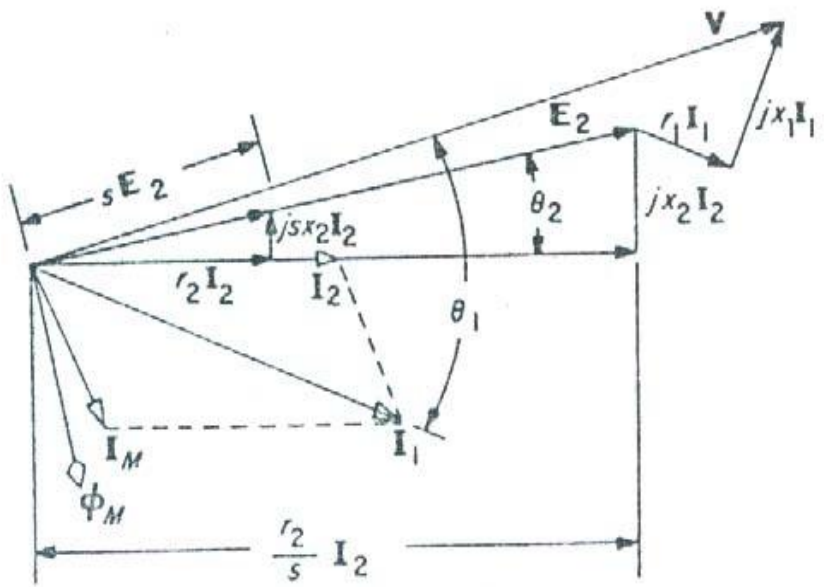


Fig. (c) Diagrama de fasores para un motor de induccion polifasico

Los circuitos equivalentes en la Fig.a y b, representan una fase y se aplican a los motores de inducción polifásica con rotores de jaula de ardilla, así como a los motores de inducción polifásica de rotores devanados, ya que todas las cantidades están referidas al embobinado del estator.

El diagrama de favorece la comprensión del motor de inducción polifásico, debido a características similares a la del transformador. La Fig.c, muestra el diagrama de favores basado en el circuito equivalente en la Fig.(a).

2.- ANALISIS DEL ROTOR TIPO JAULA DE ARDILLA

Circunstancias que justifican la utilización de una jaula de arranque:

- Se necesita alto torque en el momento del arranque, para romper la inercia. Condición : **Jaula con alta resistencia y baja reactancia**. (Jaula de arranque).
- El efecto skin (efecto piel) hace que las corrientes AC siempre tomen las superficies del conductor (ver fig. N° 3)
- La frecuencia rotórica varía desde el f nominal hasta el f trabajo (ver fig.N°2).
- Si en el momento del arranque las frecuencia son elevadas, por ejemplo F1 (cercano a 60 Hz) entonces en presencia de éstas frecuencias sucede que : Predomina La < L

  La < L y Ra > R $\Rightarrow$ Ra + 2π . F1 . La < R + 2π . F1 . L $\Rightarrow$ **Za < Z**

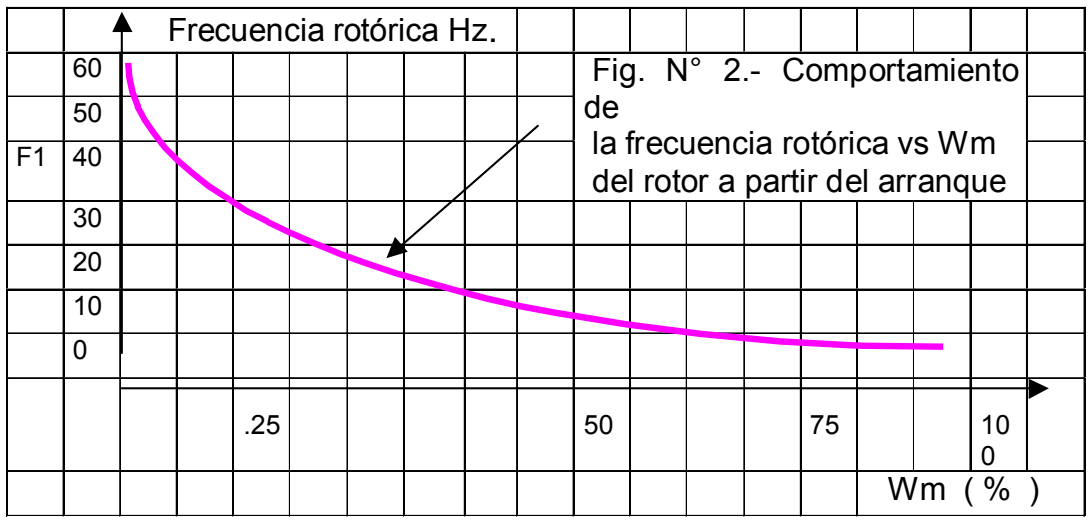


Fig. N° 2.- Comportamiento de la frecuencia rotórica vs Wm del rotor a partir del arranque

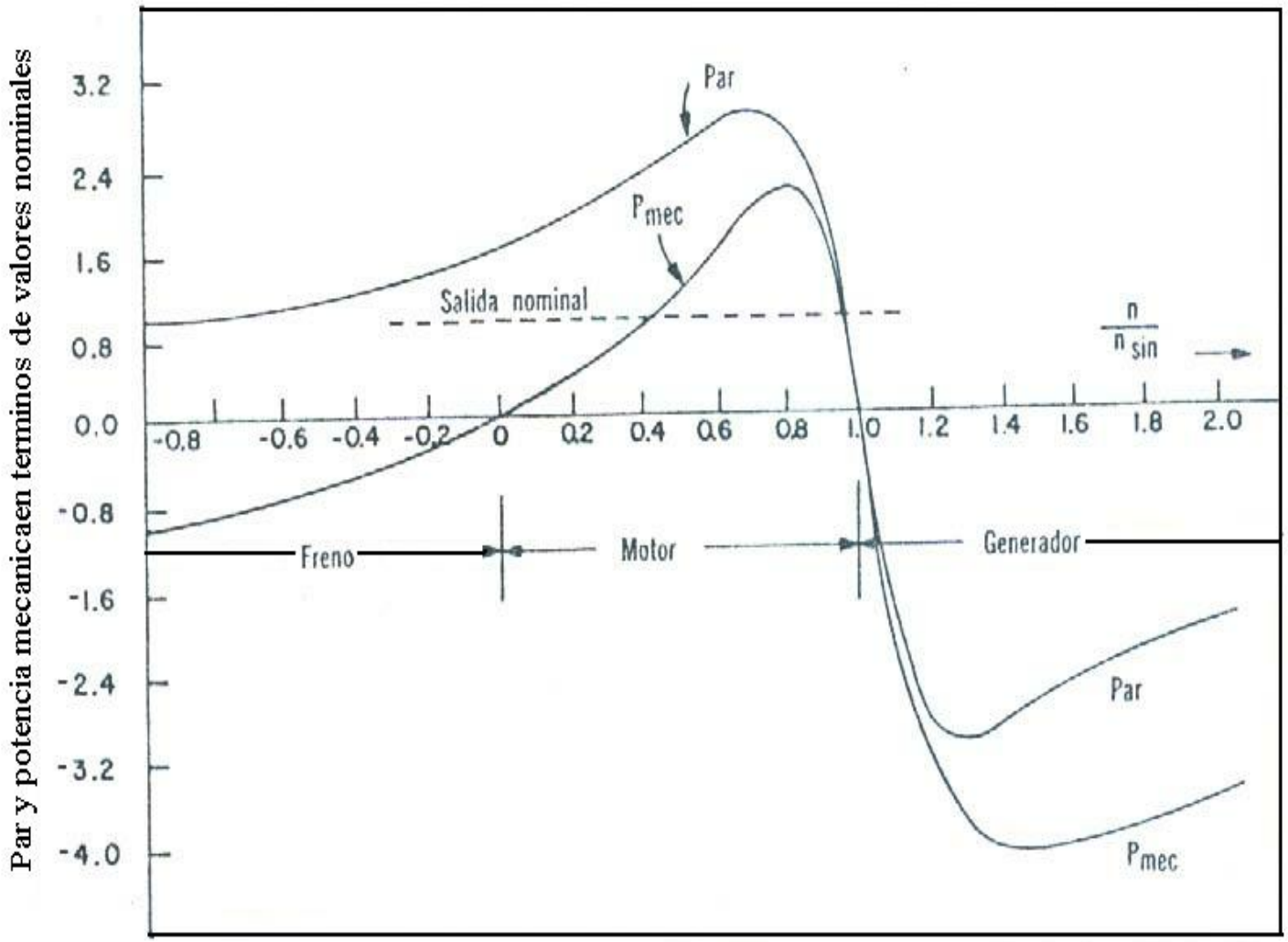
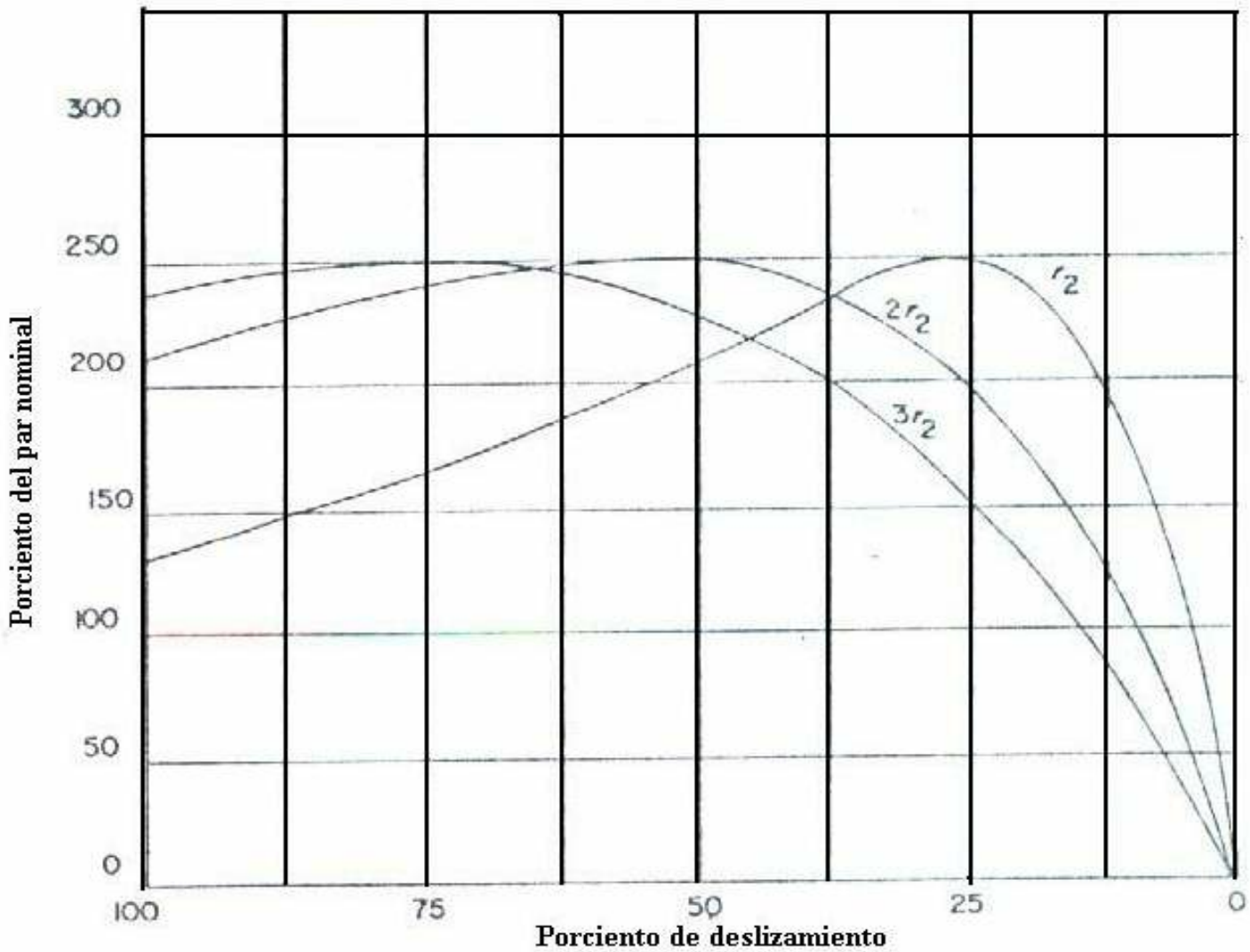
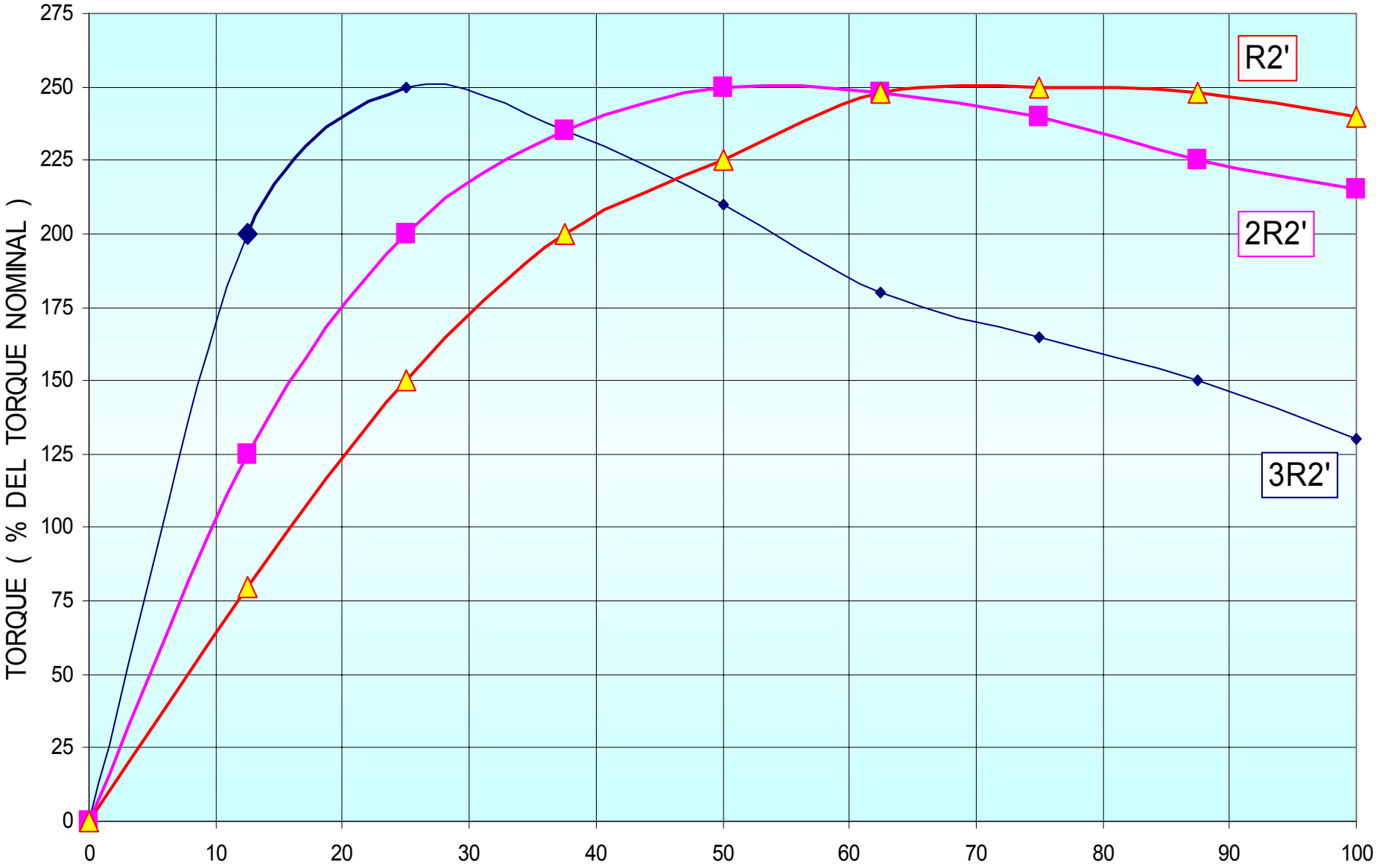

Par y potencia mecanicaen terminos de valores nominales
3.2
2.4
1.6
0.8
0.0
-0.8
-1.6
-2.4
-3.2
-4.0
Par
Pmec
Salida nominal
n / n sin
-0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0
Freno
Motor
Generador
Par
Pmec

Fig.1.1


300
250
200
150
100
50
0
Porciento del par nominal
100
75
50
25
0
Porciento de deslizamiento
r2
2r2
3r2

EFECTO DE LA RESISTENCIA DEL ROTOR EN LA CARACTERISTICA TORQUE - DESLIZAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCION POLIFASICO



ING. HUBER MURILLO M

CONTINUACION

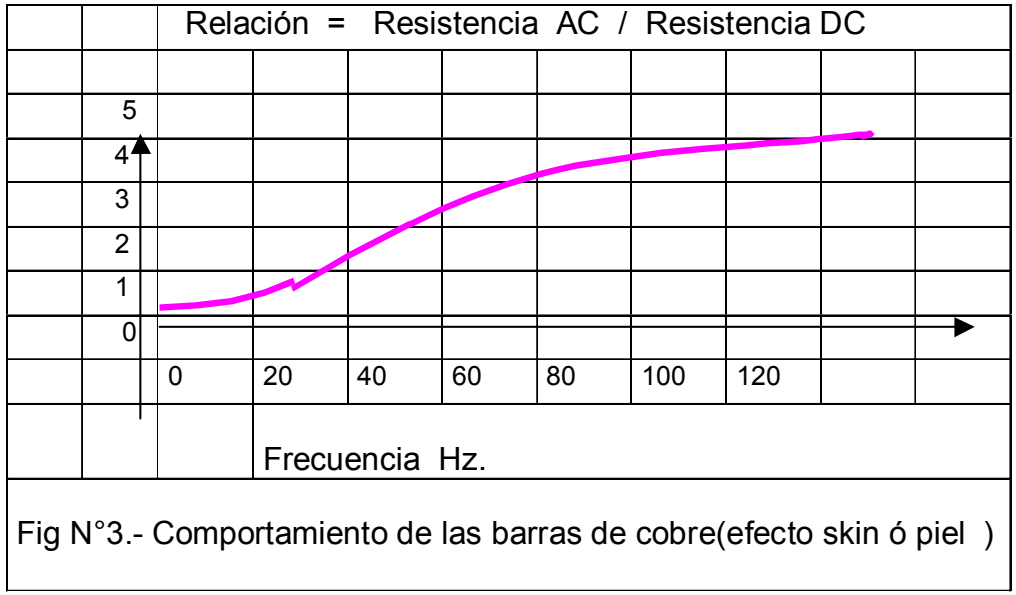


Fig N°3.- Comportamiento de las barras de cobre(efecto skin ó piel)

- En el momento del arranque las corrientes son elevadas, luego dicha corriente se reparten en forma inversamente proporcional a las impedancias de cada una de las jaulas del rotor. Entonces mientras dure el arranque las corrientes en las jaulas guardarán son :

  $Ia / I = z / Za \Rightarrow (Ia >>> I)$.
- En régimen permanente las frecuencia son bajas (5 a 2 Hz), entonces en presencia de éstas frecuencias sucede que : Predominan Ra > R

  $La < L$ y $Ra > R \Rightarrow Ra + 2\pi . F1 . La > R + 2\pi . F1.L \Rightarrow$ **Za > Z**
- En estado estacionario la corriente es la nominal, luego dicha corriente se reparten en forma inversamente proporcional a las impedancias de cada una de las jaulas del rotor. Entonces las corrientes en las jaulas guardarán la siguiente proporción:

  $Ia / I = z / Za \Rightarrow (Ia <<<<< I)$.

3.- COMPORTAMIENTO DE LA JAULA DE ARDILLA

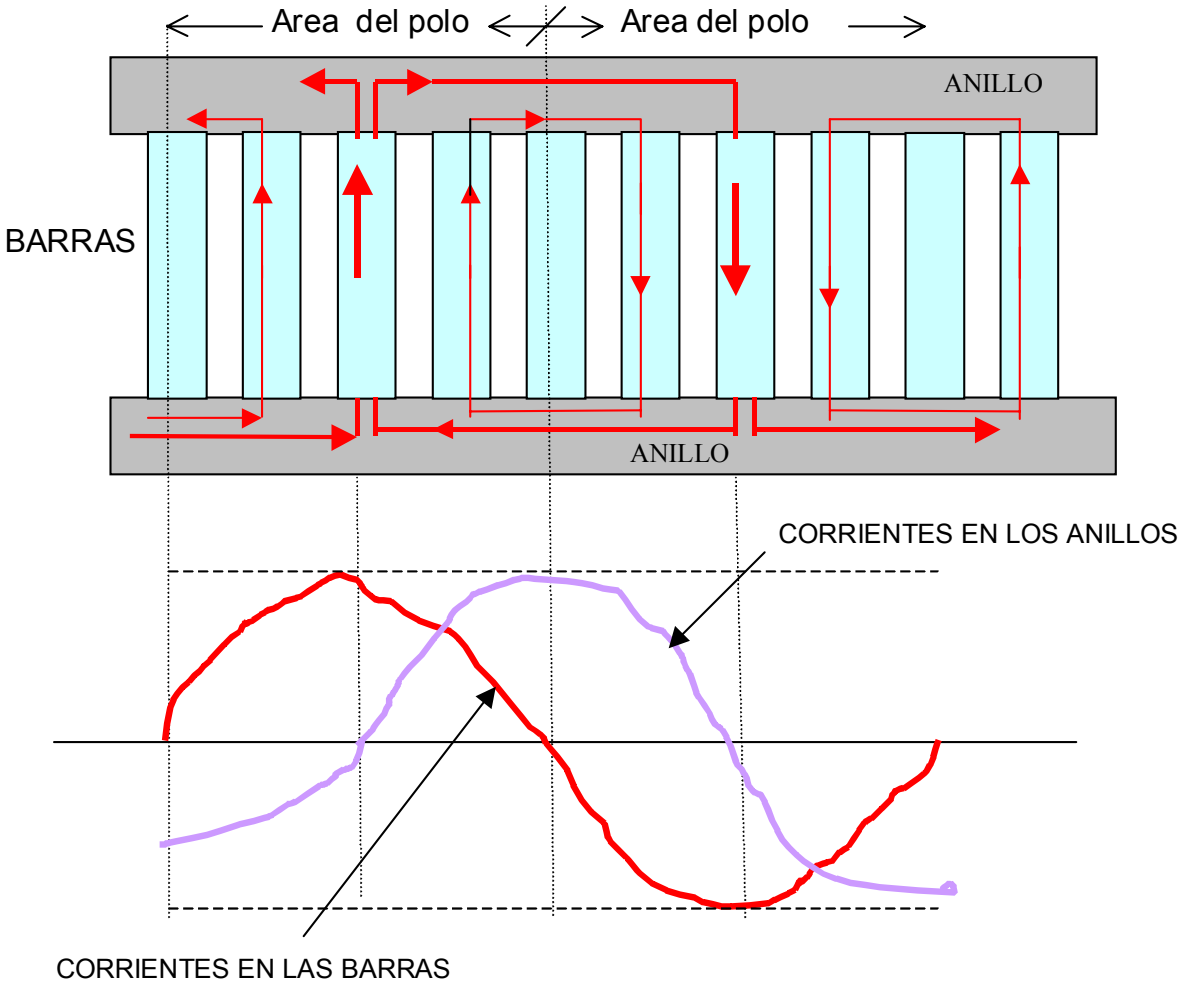
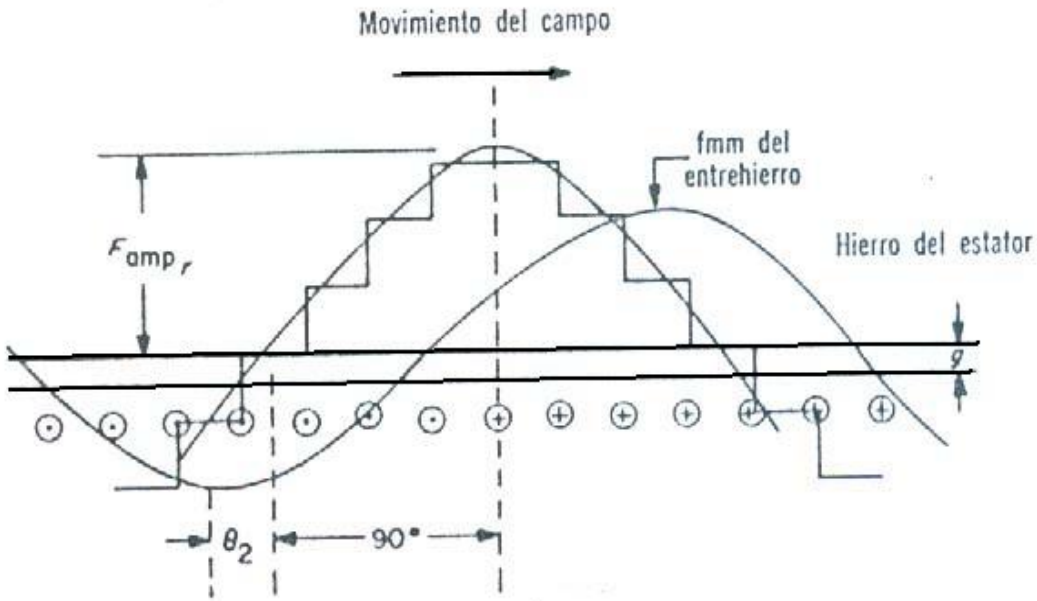
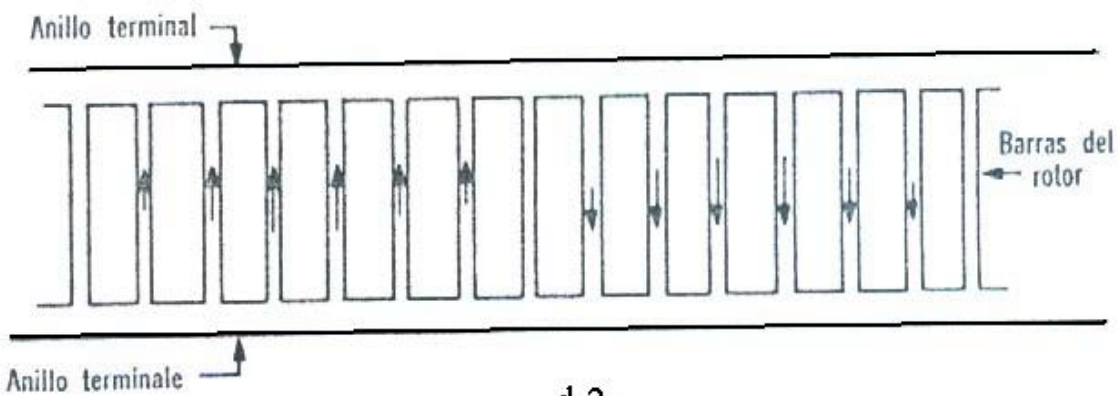


Fig N° 4.- Corrientes en la jaula de ardilla del rotor


Movimiento del campo
fmm del entrehierro
Hierro del estator
F_{amp_r}
g
θ_2
90°

d-1


Anillo terminal
Barras del rotor
Anillo terminale

d-2

4.- VARIACION DEL FLUJO EN EL ESTATOR ROTOR

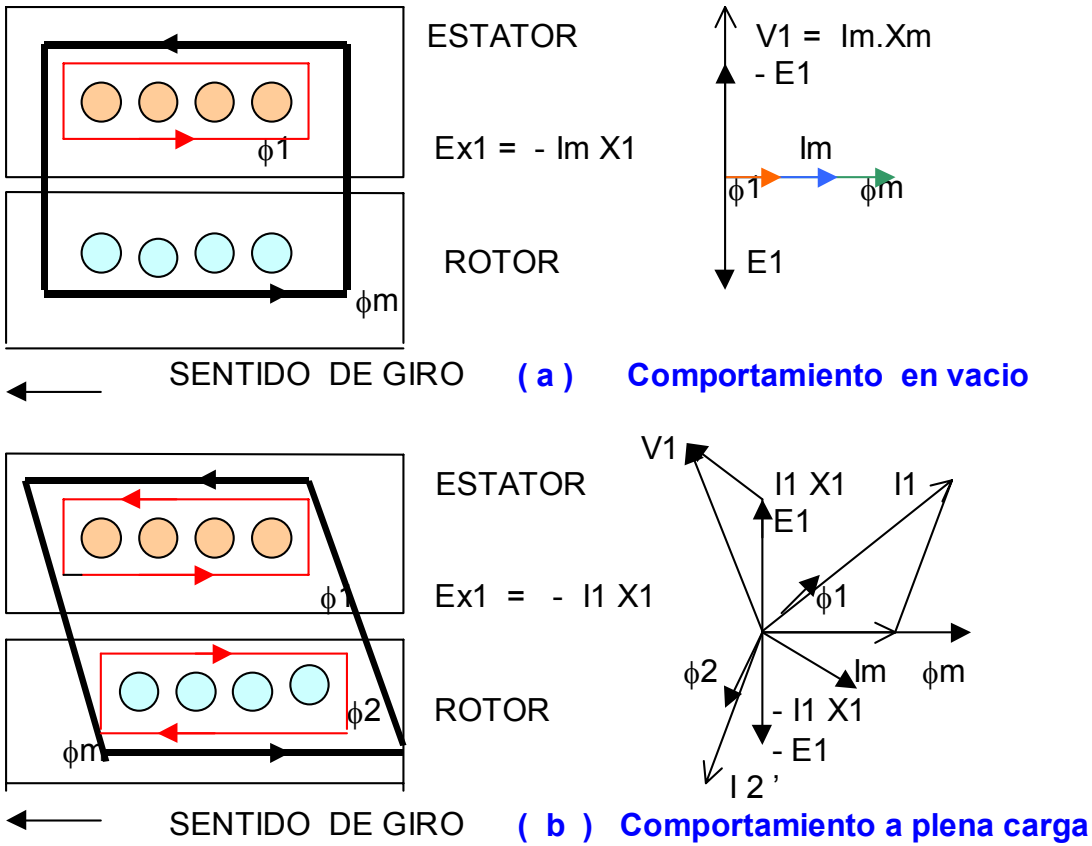
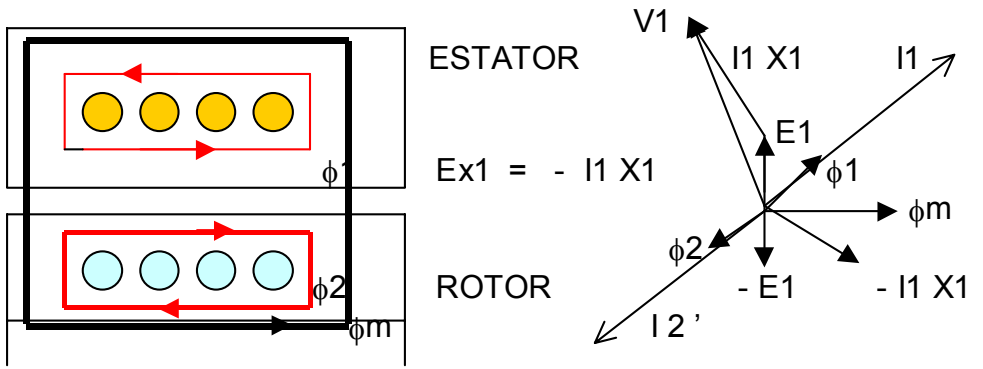


Fig. N° 5A.- Variaciones del flujo de los motores asíncronos



(c) Comportamiento a rotor bloqueado

Fig. N° 5B.- Variaciones del flujo de los motores asíncronos

5.- ANALISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito equivalente de los motores asíncronos trifásicos, tipo jaula de ardilla tienen un comportamiento muy especial en el proceso del arranque, ya que las variaciones de las frecuencia rotóricas durante éste proceso son variables. La diversidad de tipos de ranuras y las profundidades de las mismas hacen que los motores tengan una gran variedad dentro de su clasificación (manteniendo el estator constante). Así podemos encontrar los siguientes tipos:

5.1.- Motores con rotor de una simple jaula.- La utilización industrial de éstas máquinas es muy frecuente siempre y cuando las cargas a ser accionadas cumplen las exigencias de torque de los motores de inducción. Para estudiar su comportamiento presentamos su modelo equivalente. La característica predominante de este tipo de rotor es que la ranura de la jaula esta lo mas próximo posible del estator.

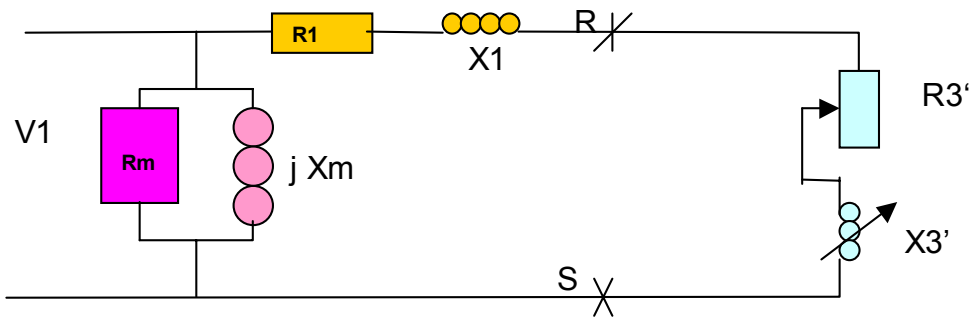


FIG. N° 6.- CIRCUITO EQUIVALENTE DE LOS MOTORES ASINCRONOS DE SIMPLE JAULA.

Donde:

R1 = Resistencia de los devanados del estator.
R3’ = Resistencia de las barras de trabajo del rotor.
Xm = Reactancia magnetizante del núcleo..
Rm = Resistance de pérdidas del núcleo.
X3’ = Reactancia magnetizante de la jaula de trabajo.
V1 = Tensión de alimentación.

CONTINUACION

a.- Análisis de la impedancia rotórica durante el arranque.- Durante el arranque la jaula resenta características muy especiales y es cuando suceden los siguientes efectos:

- Las frecuencias son elevadas y las reactancias magnetizantes X3' son grandes.
- El área de las barras de la jaula son grandes por tanto las resistencias R3' son pequeñas.
- Luego en el arranque sucede Z arranque (alta) = R3' (baja) + j X3' (alta).
  Esto hace que : I arranque sea muy elevada (X3' alta).
  Torque sea muy pobre (R3' baja).

b.- Análisis de la impedancia rotórica en estado estacionario.- Durante el trabajo normal la jaula tiene el siguiente comportamiento:

- Las frecuencias son bajas y las reactancias magnetizantes X3' son bajas (por F bajas).
- El área de las barras de la jaula son grandes por tanto las resistencias R3' son pequeñas.
- Luego en estado estacionario sucede que: Z trabajo (baja) = R3' (baja) + jX3' (baja).
- Esto hace que : I trabajo sea muy baja (X3' bja).
  Torque cubra con la exigencia. (R3' baja).

5.2.- Motores con rotor de doble jaula.- Cuando las cargas a ser movidas son muy pesadas tenemos que utilizar un nuevo diseño de la jaula de tal forma que cumpla con las exigencias de las cargas que generalmente requieren motores de:

- Torque elevado.
- Corrientes de arranque menores que las de simple jaula.

Para estudiar su comportamiento presentamos su modelo equivalente.

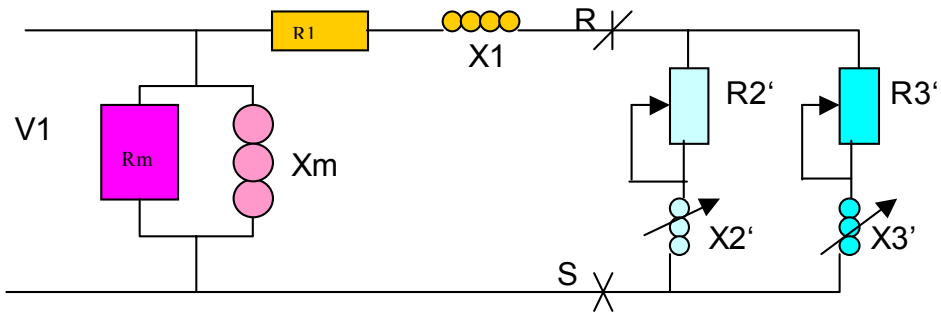


Fig.N° 7.- Circuito equivalente de los motores asíncronos de inducción de doble jaula.

Donde:

R2’ = Resistencia de las barras de arranque del rotor.
X2’ = Reactancia magnetizante de la jaula de arranque.
X23’ = Reactancia debido al efecto mutuo de 2 y 3.

CONTINUACION

a.- Análisis de la impedancia rotórica durante el arranque .- Las impedancias de las jaulas durante el arranque presentan las características siguientes:

- Las frecuencias son elevadas.
- Existe el efecto skin (efecto piel).

Luego las impedancias tienen la siguiente conducta:

$$Z\,2'\ (\text{baja}) = R\,2'\ (\text{alta}) + j\,X\,2'\ (\text{baja}) \rightarrow \text{Predomina } R\,2'.$$

$$Z\,3'\ (\text{alta}) = R\,3'\ (\text{baja}) + j\,X\,3'\ (\text{alta}) \rightarrow \text{Predomina } X\,3'.$$

$$\Rightarrow \quad \mathbf{Z\,2' < Z\,3'}$$

Luego por la jaula de arranque tendrá características resistivas preponderantes haciendo que la corriente de arranque circule en gran medida por la jaula de arranque. Con esto se logra:

- Torque elevado.
- Gran disminución de la corriente de arranque.
- Esta conducta es predominante desde 60 a 10 Hz. (0 a 80 %) W nominal.

b.- Análisis de la impedancia rotórica en estado estacionario .- Las impedancias de las jaulas en estado estacionario presentan las características siguientes:

- Las frecuencias son bajas (2 a 5 Hz.).
- Existe el efecto skin (efecto piel). (Este efecto disminuye considerablemente).

Luego las impedancias tienen la siguiente conducta:

$$Z\,2'\ (\text{Alta}) = R\,2'\ (\text{alta}) + j\,X\,2'\ (\text{baja}) \rightarrow \text{Predomina } R\,2'.$$

$$Z\,3'\ (\text{baja}) = R\,3'\ (\text{baja}) + j\,X\,3'\ (\text{baja}) \rightarrow \text{Predomina } R\,3'.$$

$$\Rightarrow \quad \mathbf{Z\,2' > Z\,3'}$$

Luego por la jaula de trabajo (Z3') circulará la mayor cantidad de corriente. La pequeña corriente que todavía circula por la jaula de arranque dependerá del material utilizado y del área de la ranura.

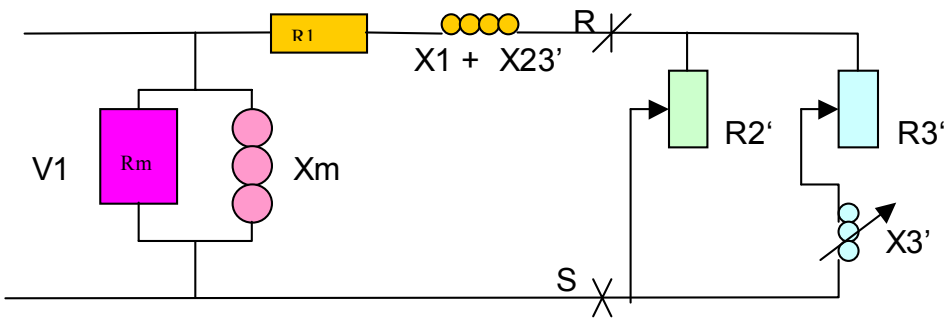


Fig.N° 8.- Circuito equivalente de los motores asíncronos en estado estacionario

CONTINUACION

La impedancia equivalente de las jaulas en paralelo en función del deslizamiento s es:

$$Z_{RS} = \frac{R2' \left(R3' + j\, s\, X3' \right)}{s \left(R2' + R3' + j\, s\, X3' \right)}$$

$$Z_{RS} = \frac{\left[\left\{ R3' \left(R2' + R3' \right) + j\, s^2 X3'^2 \right\} R2' / s \right] + j\, R2'^2\, X3'}{\left(R2' + R3' \right)^2 + s^2\, X3'} \qquad (\#)$$

De la ecuación (#) podemos deducir la expresión que nos permita encontrar la resistencia y la reactancia equivalentes de la fig. N° 8.

$$R_{RS} = \frac{R2' \cdot R3'}{\left(R2' + R3' \right)^2} \cdot \frac{1}{s} \qquad X_{RS} \left(s = 0 \right) = \frac{R2'^2\, R3'}{\left(R2' + R3' \right)^2}$$

De la ecuación (#) podemos deducir la expresión que nos permita encontrar la resistencia y la reactancia equivalentes cuando s = 1 de la fig. N° 8.

$$R_{RS} \left(s = 1 \right) = \frac{R2' \left\{ R3' \left(R2' + R3' \right) \right\} + X3'^2}{\left(R2' + R3' \right)^2 + X3'}$$

$$X_{RS}\ (s = 1) = \frac{R2'^2\ X3'}{(R2' + R3')^2 + X3'^2}$$

Ejemplo.- Sea un motor de 30 HP 400 Voltios 60 Hz.doble jaula, los valores de resistencias y reactancias son las siguientes:

Estator	R1 = 0.6 Ω	X1 = 1.9 Ω
Nucleo	Rm = 350 Ω	Xm = 67 Ω
Jaula arranque	R2' = 2.1 Ω	X2' = 1.3 Ω
Jaula de trabajo	R3' = 0.4 Ω	X3' = 4.5 Ω

Se le solicita hallar las características siguientes: Corriente rotórica, torques nominal y máximo así mismo el máximo deslizamiento.

BIBLIOGRAFIA

LEANDER W. MATSCH. Maquinas Electromecánicas y Electromagnéticas, Ediciones Alfa y Omega, Pág. 381-407

I. L. KOSOW. Maquinas Eléctricas y transformadores, Editorial Reverté, S.A., Pág. 346-350, 391-394.