FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

EVALUACION DINAMICA DE LOS MOTORES ASINCRONOS TRIFASICOS

Asesor : Msc. Ing. Huber Murillo M.

INTRODUCCIÓN

Cuando nos referimos a máquinas rotativas trifásicas, estamos incluyendo a los motores tipo jaula de ardilla (de una y doble jaula) y rotor bobinado. Para comprobar la validéz de nuestro software, se han realizado las simulaciones correspondientes con un motor Marca DELCROSA, así mismo se han realizado simulaciones con motores de diversos marcas y tamaños. Hemos tenido en cuenta la categorización de los motores Jaula de ardilla según las normas IEC 34 - 12 y NEMA., así mismo se ha contemplado la constitución mecánica y eléctrica según IEC 34 – 1 – 5 - 7 y 8. Creemos que esta herramienta ayudará a los estudiantes y profesionales vinculados con el área.

DESLIZAMIENTO, VELOCIDAD Y FRECUENCIA

Deslizamiento.- Es una característica de las máquinas rotantes asíncronas y está definida por las ecuaciones siguientes :

$$s = [(n - nr) / n] \times 100$$

$$s = [(Ws - Wr) / Ws] \times 100$$

Donde:

F = Frecuencia síncrona (estatórica) en Hz.
p = Número de polos
nr = Velocidad rotacional del rotor en RPM.
n = Velocidad rotacional síncrona en RPM.
Ws = Velocidad angular síncrona en rad/seg.
Wr = Velocidad angular del rotor en rad/seg.

$$n = 120. F / p \qquad y$$

$$nr = n (1 - s)$$

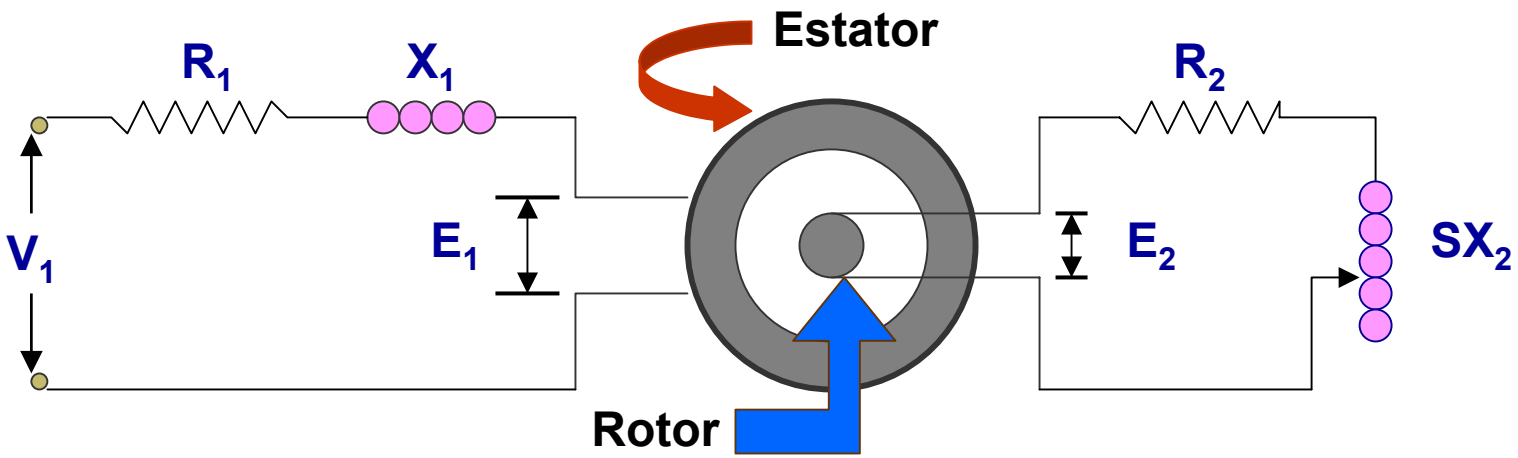
Si se desea pronosticar el comportamiento de un motor de inducción trifásico resulta imprescindible definir el modelo ADECUADO de la máquina a partir de las siguientes leyes :

- **Ley de Amper.**
- **Ley Faraday.**
- **Ley Lenz y Lorenz.**
- **Ley de Biot y Savart.**
- **Leyes de Kirchhoff** (LKI y LKV).

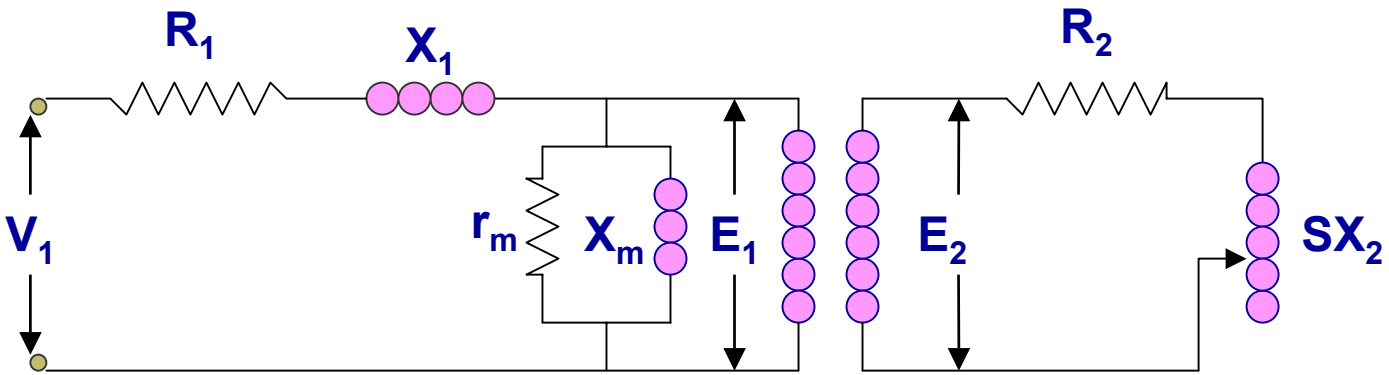
Este modelo debe permitir la evaluación dinámica de los parámetros del motor en funcionamiento.

Para el estudio del motor jaula de ardilla utilizamos un modelo monofásico muy análogo al del transformador del que deducimos el circuito equivalente exacto que vamos a utilizar es:

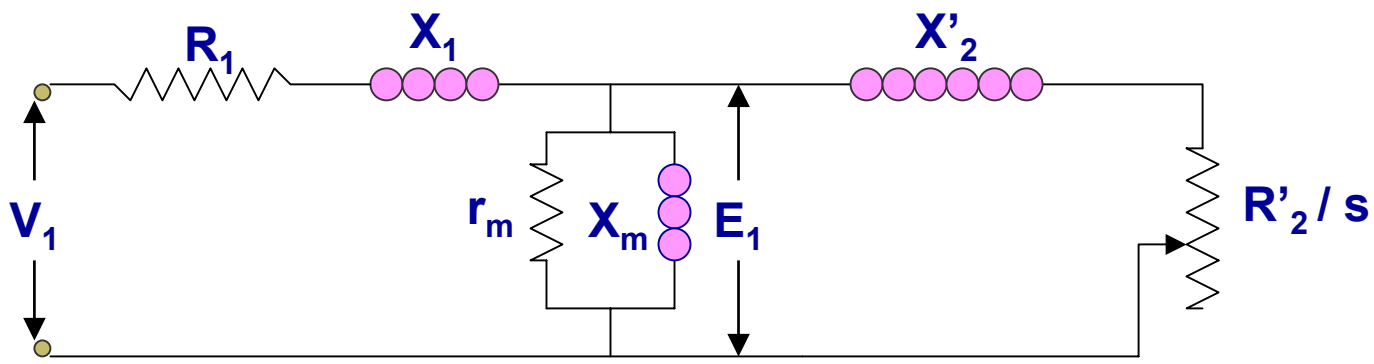
CIRCUITOS EQUIVALENTES



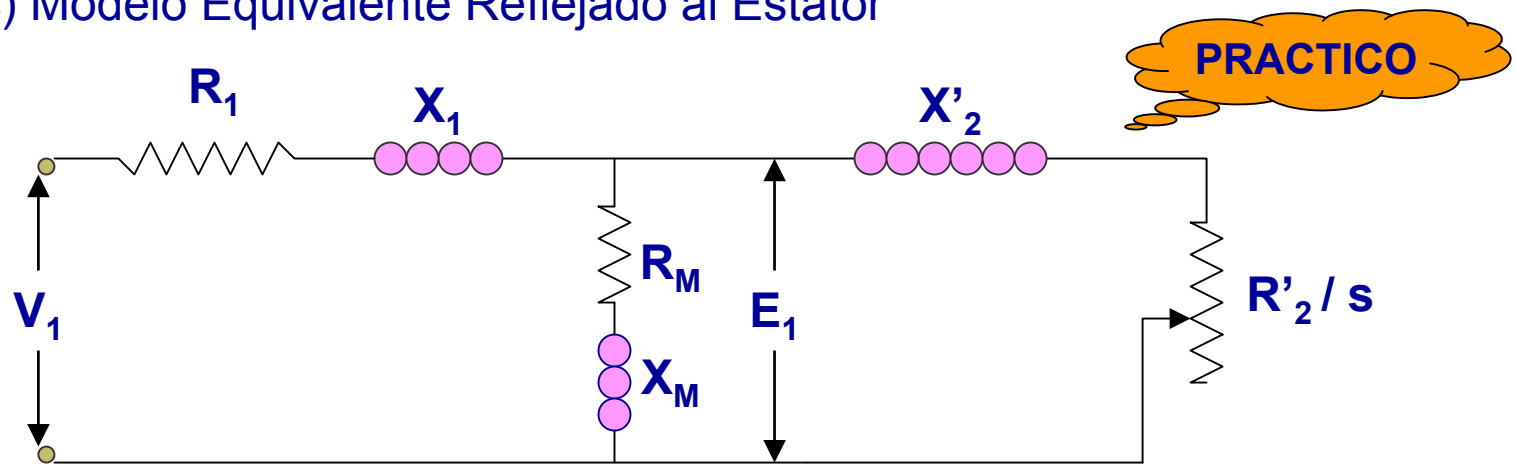
(a) Modelo Fisico



(b) Modelo Equivalente



c) Modelo Equivalente Reflejado al Estator



(d) Modelo Exacto

NOTA: El hecho de utilizar un modelo aproximado significa correr el núcleo a los bornes, provocando un error del 2 al 5 % dependiendo del tamaño de las maquinas,para evitar este error nuestra metodología utiliza el modelo exacto.

PÉRDIDAS PRODUCIDAS DURANTE SU DESEMPEÑO

a.- Pérdidas en el núcleo.- Se presentan en el circuito magnético de la máquina como consecuencia de la utilización de la corriente alterna, para cuantificar la energía absorvida por el núcleo es que lo dividimos en :

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

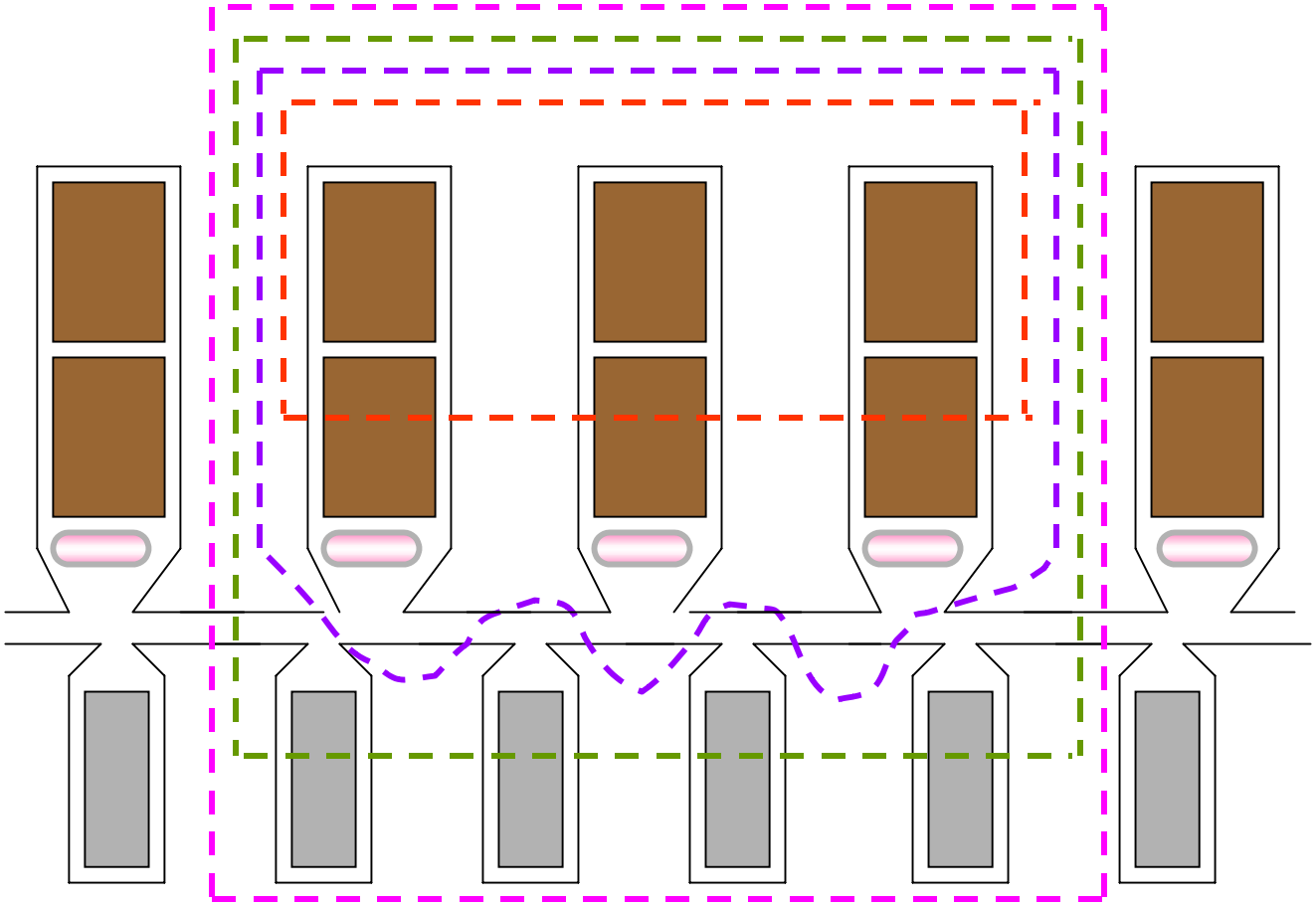
$$PE = Ke \cdot f^2 \cdot Bm^2 \qquad \text{(Watts/Kgr)}$$

Donde:

- Ke = Constante que depende de la conductividad del material y de su espesor.
- f = Frecuencia en Hz .
- Bm = Densidad máxima de flujo en el entrehierro (Tesla).

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

TRAYECTORIAS DE FLUJOS MAGNETICOS EN LOS MOTORES



RANURAS DEL ESTATOR CON BOBINADO DE DOBLE CAPA

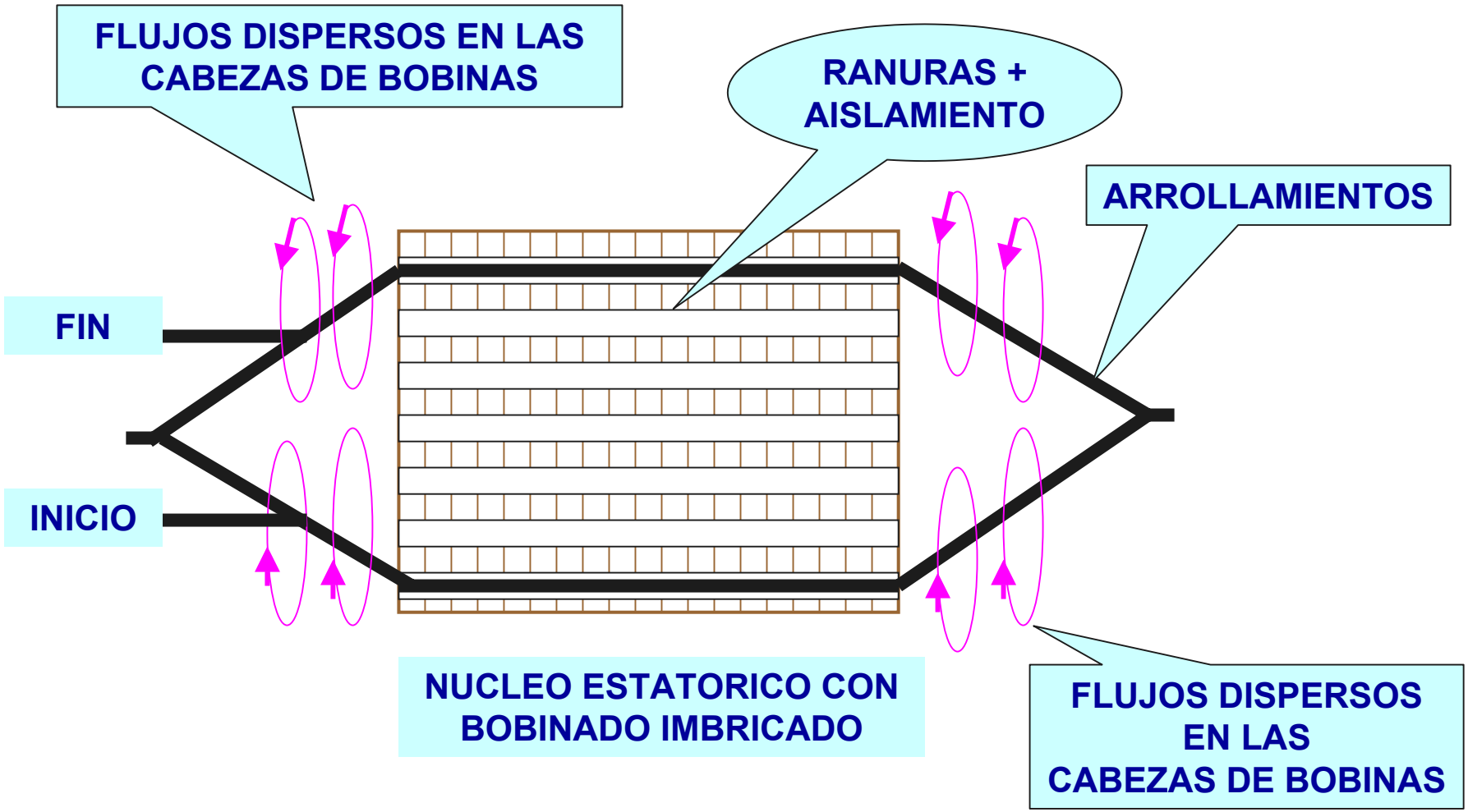
ENTREHIERRO

RANURAS DEL ROTOR STANDART

Leyenda

- Dispersión de la ranura del estator
- Dispersión diferencial
- Dispersión de la ranura del rotor.
- Flujo mutuo.
- Cuña estatórica

PÉRDIDAS DEBIDO A FLUJOS DISPERSOS SUPLEMENTARIOS



PÉRDIDAS PRODUCIDAS DURANTE SU DESEMPEÑO

$$Ph = Kh.\ F.\ Bm^{\alpha} \quad (\text{ Watts / Kgr })$$

Donde:

- Kh es una constante de proporcionalidad que depende de la calidad de acero,
- α es un exponente que según los fabricantes varía entre 1.5 - 2.5 .

b.- Pérdidas en el bobinado estatórico.- Son las pérdidas (efecto Joule) que se producen en los arrollamientos (alambre esmaltado) del estator.

$$Pestator = i_1^{\ 2} \ .\ R_1$$

c.- Pérdidas en el bobinado rotórico (o Jaula de Ardilla).- Son las pérdidas que se producen en los arrollamientos del bobinado rotórico o Jaula de ardilla del rotor.

$$Protor = I_2'^{2} \ .\ R_2'$$

d.- Pérdidas suplementarias.- Está compuesto por las diversas fricciones producidas dentro de la máquina (rodamientos) y el trabajo producido por el ventilador externo y aletas del rotor encargados de la ventilación del sistema.

e.- Potencia rotacional (Protac).- Con este ensayo se obtiene las pérdidas totales producidas por el sistema de ventilación, además de las fricciones respectivas de las máquinas rotantes.

$$\textbf{Protac} = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\phi - 3.\, I_1^2 \,.\, R_1$$

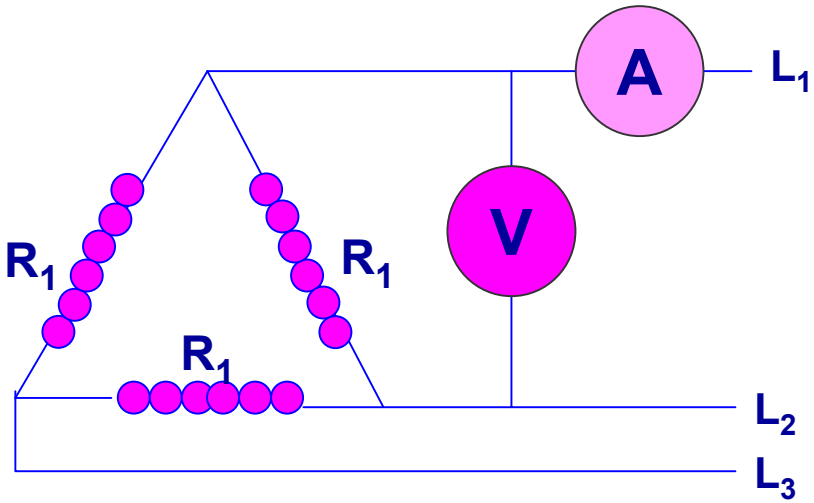
Donde :

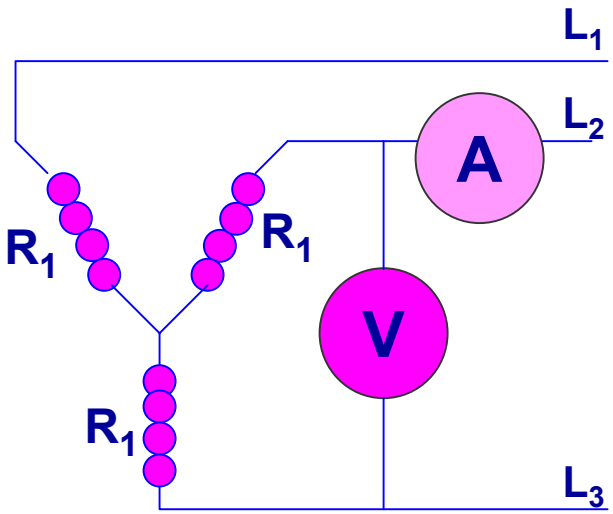
I_1 =Corriente de fase en Amperios.
V_L = Tensión de línea en Voltios.
I_L =Corriente de línea en Amperios.
Cos ϕ = Factor de potencia sin carga.

A.- MEDIDA DE LA RESISTENCIA DEL ESTATOR :

-Método del Voltio-Amperímetro.

-Método del Puente Wheastone.





$R_1 = 3R_T / 2$

$R_1 = R_T / 2$

$$R_{1\,dc} = V_{dc} / I_{dc}$$ Ohmios / fase

$$R_1 = R_{1\,dc} \{ 1 + \alpha (T - To) \}$$ Ohmios / fase

$$R_{1\,ac} (T) = K^* R_1$$ Ohmios / fase

Donde :

K = Constante del efecto skin.

$R_{1\,dc}$ = Resistencia a temperatura ambiente (To).
R_1 = Resistencia a temperatura de trabajo (T).
$R_{1\,ac}$ = Resistencia estatórica en C.A.
α = Coeficiente de temperatura y depende del material siendo su valor :

α (cobre) = 0.00393 $°C^{-1}$
α (aluminio) = 0.035 $°C^{-1}$

$$X = 0.063598 \; (u \, . \, F / R \, 1)^{1/2}$$

Siendo: u = 1 (permeabilidad para materiales no magnéticos) y F = 60 Hz.

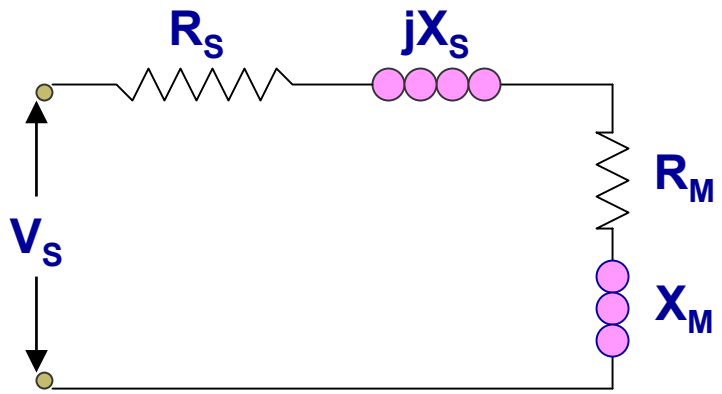
Tabla No 1.- Efecto Skin (X vs K)							
X	K	X	K	X	K	X	K
0.0	1.0000	1.0	1.0052	2.0	1.0782	3.0	1.3181
0.1	1.0000	1.1	1.0076	2.1	1.0938	3.1	1.3510
0.2	1.0001	1.2	1.0107	2.2	1.1113	3.2	1.3850
0.3	1.0004	1.3	1.0147	2.3	1.1307	3.3	1.4199
0.4	1.0013	1.4	1.0197	2.4	1.1521	3.4	1.4557
0.5	1.0032	1.5	1.0258	2.5	1.1754	3.5	1.4920
0.6	1.0006	1.6	1.0332	2.6	1.2006	3.6	1.5288
0.7	1.0012	1.7	1.0421	2.7	1.2275	3.7	1.5658
0.8	1.0021	1.8	1.0524	2.8	1.2562	3.8	1.6031
0.9	1.0034	1.9	1.0644	2.9	1.2864	3.9	1.6405

B.- PRUEBA DE VACIO

Se opera el motor sin carga en el eje a tensión y frecuencia nominales. Se toman las lecturas de tensión, corriente y potencia de entrada así como el valor de la velocidad rotacional. La potencia leída corresponden a las pérdidas en :

El cobre del bobinado estatórico, núcleo y pérdidas rotacionales dentro de la máquina. Luego :

$$P_{TOTALES} = P_{COBRE} + P_{NUCLEO} + P_{ROTACIONALES}$$



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

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

$$\mathbf{H = (N \cdot \sqrt{3} \cdot I_f) / Lm} \qquad \text{(Amper-Vuelta / metro)}$$

<u>Donde</u> **:**

Lm = Longitud media al paquete magnético en m.
N = Número de vueltas del bobinado estatórico.
L = Longitud del paquete magnético en m.
C = Altura de la corona en m.
f = Frecuencia del sistema Hz.
V_{LL} = Tensión de línea - línea en Voltios.
A = L . C = Area transv.del paquete magnético estatórico.
I_L = $\sqrt{3}$. If cuando la conexión es triángulo y el dato es corriente de fase.

Tabla N° 2.- Ensayo de vacio						
V Linea (Voltios)	I Linea (Amperios)	P Nucleo (Vatios)	Q Nucleo (VARS)	S Aparente (Volt-Amp)	Velocidad (RPM)	COS Ø

Objetivo:

- Levantar la curva de vacio (ubicar la zona de saturación) a tensión y frecuencia nominales.
- Evaluar la impedancia del núcleo.
- Constatar que la fuerza magnetomotriz total sea equilibrada,esto es que las corrientes de linea sean iguales.
- Medir las pérdidas en el núcleo (Corrientes de Foucoult y Edy)

Las impedancias del rotor y carga muy grandes ($Z'_2 + R_L \quad \infty$), luego podemos plantear para esta prueba la siguiente 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 = Impedancia equivalente por fase (Ω).
V_O = Tensión de fase en Voltios.
R_O = Resistencia equivalente (Ω).
P_O = Potencia monofásica en vatios.
R_M = Resistencia del núcleo (Ω).
X_O = Reactancia equivalente (Ω).
X_M = Reactancia magnetizante del núcleo(Ω).
I_O = Corriente de vacío en Amp.

C.- PRUEBA EN CORTO CIRCUITO (ROTOR BLOQUEADO)

Se realiza con el rotor mecanicamente parado alimentándose con una tensión reducida y a frecuencia nominal, para poder hacer circular por los devanados del estator la corriente nominal.Se aconseja tomar las lecturas rápidamente observando la temperatura del cobre antes y después del ensayo, a fín de evitar errores por cambio de temperatura. Las reactancias estatóricas y rotóricas para un motor tipo jaula de ardilla dependen de la categorización según NEMA MG1 (incluido en EMRAT). Esto nos permite plantear el siguiente modelo y formulación:

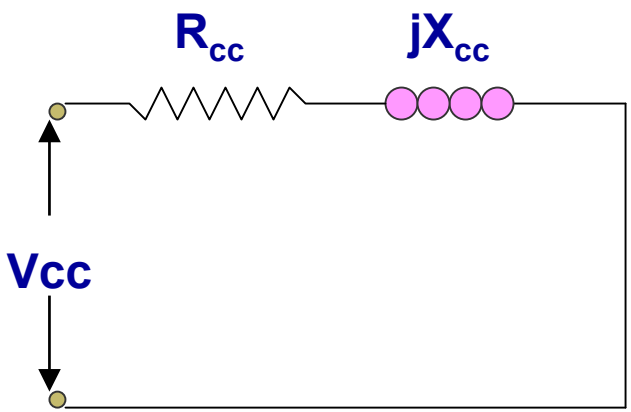


Tabla N° 3.- Ensayo de corto circuito									
V Linea (Voltios)			I Linea (Amp)			P Activa	Q Reactiva	S Aparente	COS Ø
RS	RT	ST	R	S	T	(Vatios)	(VARS)	(Volt-Amp)	

Objetivo:

- Evaluar Z_2' .
- Evaluar la impedancia Z_r, , Z_s y Z_t (Deben ser iguales).
- Controlar que las corrientes de las tres fases sean iguales a la corriente nominal de la placa (medir que la frecuencia sea la nominal).
- Medir las pérdidas en el cobre (Efecto Joule del motor)

$$R_{cc} = (P_{cc} / 3) / I_{cc}^2 = R_{1ac(T)} + R_2' \quad \Omega / \text{fase}$$

$$Z_{cc} = (V_{cc} / \sqrt{3}) / I_{cc} \quad \Omega / \text{fase}$$

$$X2' = s\,(Xcc / 2) \qquad \Omega/\text{fase}$$

$$X_{cc} = (Z_{cc}^2 - R_{cc}^2)^{1/2} = X_1 + X_2' \qquad \Omega/\text{fase}$$

$$R_2' = R_{cc} - R_{1\,ac} \qquad \Omega/\text{fase}$$

Para evaluar X_1 y X_2' recurrir a las reactancias estatoricas y rótoricas (Ver tabla N° 4 .).

Donde :

R_{cc} = Resistencia a rotor bloqueado (Ω).
P_{cc} = Es la potencia activa (Vatios).
I_{cc} = Corriente nominal de línea (A).
V_{cc} = Es la tensión de linea (Voltios).
X_{cc} = Reactancia a rotor bloqueado (Ω).
x2' = Reactancia inductiva del rotor(Ω).

En el desarrollo del software hemos tenido en cuenta la varibilidad de la corriente, torque, potencia, FP, EF y Pútil en función del deslizamiento y hemos analizado con especial atención las zonas de: Arranque, nominal y vacio.

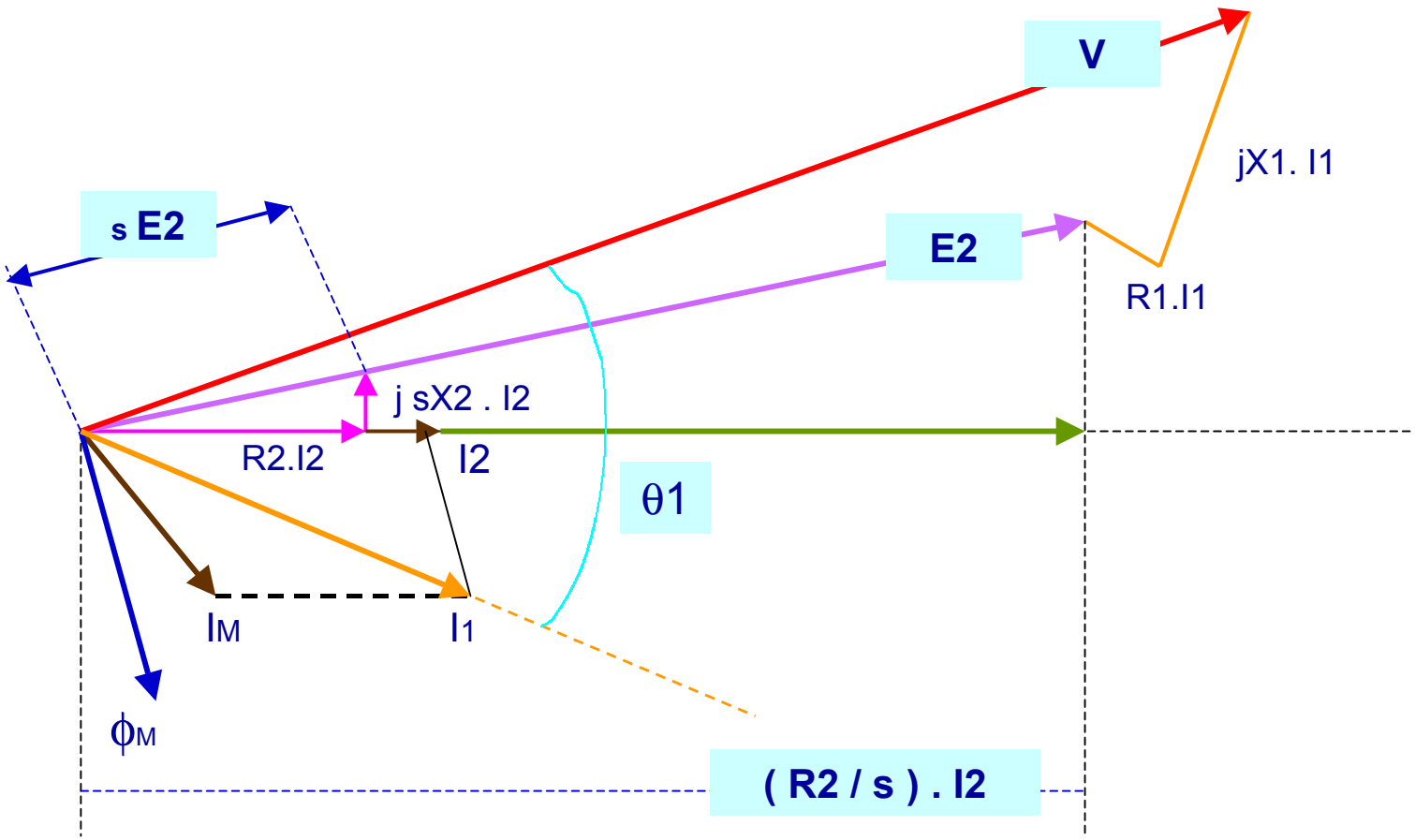
Según la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) presnetan la tabla No 3 referidas a las reactancias de dispersión del estator (Xs) y rotor (Xr ') de los motores de inducción trifásicos en función de las reactancias equivalentes de corto circuito ó rotor bloqueado (Xcc). Y a partir de ésta tabla conociendose Xo y X1 puede hallarse Xm.

Tabla No 4 .- Reactancias estatóricas y rotóricas.

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

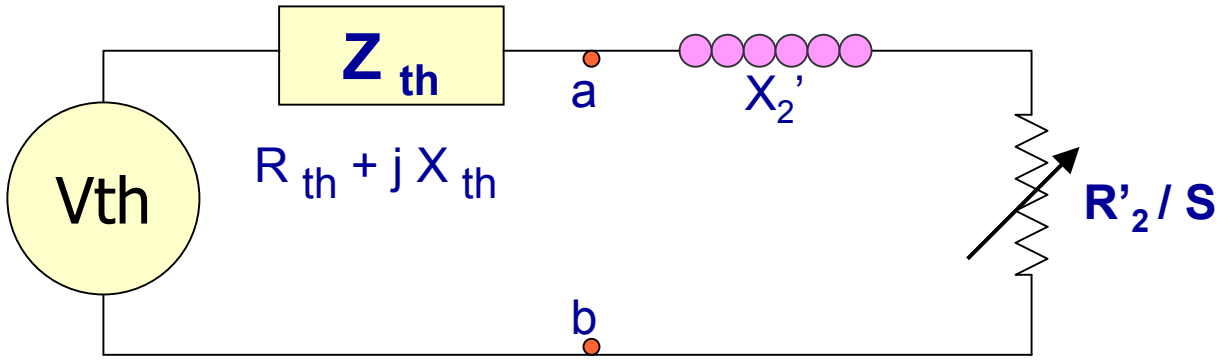
Para una discusión mas completa de las pruebas de los motores de induccion ver IEEE TEST CODE FOR POLYPHASE INDUCTION MOTORS AND GENERATORS N° 112 A (1964) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGENIEERS 345 EAST 47 th street new york n.y. 10017.

DIAGRAMA FASORIAL MONOFASICO



EVALUACION DEL TORQUE MAXIMO

Para evaluar el torque máximo utilizamos el teorema de la máxima transferencia de potencia aplicado al modelo exacto.



$$R'_2 \;/\; S_{max} = \sqrt{\left(R_{th}^2 + \left(X_{th} + X_2' \right)^2 \right)}$$

$$S_{max} = R'_2 \;/\; \sqrt{\left(R_{th}^2 + \left(X_{th} + X_2' \right)^2 \right)}$$

<u>Reemplazando</u> :

$$T_{max} = (R'_2 / W_s) \,.\, S_{max} \,.\, V_{th}^2 \;/\; \{ (S_{max} \,.\, R_{th} + R'_2)^2 + S_{max}^2 \,.(X_{th} + X_2')^2) \quad \text{N - m}$$

CONTINUACION

Para obtener el delizamiento correspondiente al torque máximo (sb), que va ha tener el torque en su proceso del rompimiento de la inercia del sistema, este valor podemos encontrarlo derivando la ec. (#) con respecto al deslizamiento, esto es:

$$\mathbf{d\,(Te) / ds = 0}$$

$$\mathbf{KW = Te \,.\, Wm = [\, I2'^2 \,.\, R2' \,(1\text{-}s)\,] / s} \qquad \text{Kw /fase}$$

$$Te = \{ [\, I2'^2 \,.\, R2' \,(1 - s)\,] / s \} / Wm \qquad y \qquad Wm = (1\text{-}s)Ws$$

$$Te = \frac{1}{Wm} \left\{ \frac{V1}{R1 + (R2' / s) + j\,Xeq} \right\}^2 \left[\frac{R2' \,(1 - s)}{s} \right]$$

$$\mathbf{Te = \frac{1}{Wm\,(1\text{-}s)} \left\{ \frac{V1^2}{R1 + (R2' / s)^2 + j\,Xeq^2} \right\} \left[\frac{R2' \,(1 - s)}{s} \right]} \qquad (\#)$$

En consecuencia tambien se puede obtener el smax en forma analítica siendo el resultado del deslizamiento máximo :

$$\mathbf{s_{max} = R'_2 \,/\, \sqrt{\left(R_{th}^2 + \left(X_{th} + X_2' \right)^2 \right)}}$$

CONTINUACION

En la curva de torque vs velocidad podemos distinguir claramente los torques de: arranque, mínimo, máximo, nominal y de la carga. Su cálculo es importante puesto que él determina la capacidad de sobrecarga momentánea del motor.
En los motores de inducción tipo jaula de ardilla (SCIM) el torque máximo se obtiene aplicando el **teorema de maxima transferencia** para lo cual en el rotor se presenta la siguiente igualdad:

$$R'r = smax \,.\; Xcc$$

Siendo **smax.** el deslizamiento en la región donde se produce el torque máximo y se halla utilizando la sgte. fórmula:

$$Smax. = [\, RPM\ sinc - RPM\ (Tm\ )\,] \,/\, RPM\ sinc.$$

RPM(Tm) es la velocidad donde se produce el torque máximo.
Entonces el torque máximo desarrollado por el rotor (Tmax) se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$Tmax = Tr\ \{\, [\, (\, smax / sr\,) + (\, sr / samx.\,)\,] / 2\, \}$$

Donde:

Tr = Torque nominal
sr = Deslizamiento a la velocidad nominal del rotor
sr = { RPM sinc – RPM(rotor) } / RPM sinc.

TORQUE ARRANQUE (Tarr.)

El efecto pelicular (Skin) y la tem-peratura hacen que la impedancia rotórica sea diferente del valor que alcanza en operación normal, entonces se precisa tener niveles permisibles de torque y corriente de arranque, tales que saquen del reposo a la masa inercial sin llegar a deteriorar sus componentes tales como conductores aislados, materiales aislantes, etc.

$$\mathbf{Tarr = Tmax \{ 2 / [(smax. / sarr) + (sarr / smax.)] \}}$$

sarr = 1 (en el momento del arranque ,el rotor se halla parado)

Habiendo realizado las pruebas de corto circuito donde podemos conocer Vcc, R2' y Xcc, esto nos permitirá conocer $R2'_{tot}$ (resistencia total del rotor en Ohm/fase), ya que Sarr = 1.

$$\mathbf{Iarr\ (nom) = Vcc\ / [(R2'_{tot})^2 + (Xcc)^2]^{1/2}}$$

Solo consideramos el circuito rotórico pues la corriente I2' >>> I_ϕ.
Finalmente la potencia de ingreso al rotor en el arranque está dado por la siguente ecuación.

$$\mathbf{RPI\ (nom) = [Vcc^2 / (R'r)^2 + (Xcc)^2]\ R2'_{tot}}$$

CORRIENTE DE ARRANQUE (Iarr.)

Los numerosos ensayos realizados por los fabricantes han encontrado que la impedancia equivalente del núcleo (Z_M) es mucho mayor que la impedancia equivalente de la máquina (Zeq), por ésta razón podemos afirmar que: $\mathbf{Z_M \geq 20\ Zeq}$
Por esta razón y sin cometer mucho error podemos hacer el siguiente planteamiento.

$Req = R1 + R2'$, $Xeq = X1 + X2'$, $R2' = a^2R2$, $X2' = a^2R2$, $R_L = R2'(1-s)/s$

$I\phi = I_P + j\, I_M$ y $I\phi \approx Vs / Z_M$ Amp./fase , a = Relación de transformación.

Luego, podemos afirmar, que la corriente total registrada en el estator esta dada por :

$$\mathbf{I1 = Io + I2'} \qquad \text{Amp/fase}$$

$$\mathbf{I2' = Vs\ /\ [\ Req + R_L + j\ Xeq\ ]} \qquad \text{Amp/fase}$$

$$\mathbf{I2' = Vs\ /\ [\ Req + (\ R2' / s\ ) + j\ Xeq\ ]} \qquad \text{Amp/fase}$$

Cuando la velocidad de la masa girante sea igual a cero ($RPM_{ROTOR} = 0$) el deslizamiento tomará el valor s = 1, luego podemos encontrar la corriente de arranque de la máquina. En la siguiente ecuación se puede notar que la corriente de arranque no esta en función de la carga, pero si depende directamente de los parámetros del motor (donde si resulta predominante las características del rotor).

$$\mathbf{I2'\ arr = Vs\ /\ [\ Req + R2' + j\ Xeq\ ]} \qquad \text{Amp / fase}$$

A.- VALORES MAXIMOS NORMALIZADOS

La tabla N° 5 muestra los límites máximos de la corriente con rotor bloqueado en función de la potencia nominal del motor. Son válidos para cualquier número de polos y están expresados en términos de la potencia aparente absorbidos con el rotor bloqueado en relación a la potencia nominal, KVA/CV ó KVA/KW.

$$\text{KVA / CV} = \frac{\text{Potencia aparente con rotor bloqueado}}{\text{Potencia nominal}}$$

$$\text{KVA / CV} = \{ \sqrt{3} \cdot I_P \cdot V \} \ / \ \{ P(CV) \cdot 1000 \}$$

$$\text{KVA / KW} = \{ \sqrt{3} \cdot I_P \cdot V \} \ / \ \{ P(KW) \cdot 1000 \}$$

Siendo : I_P = Corriente con rotor bloqueado ó de arranque (Amp.)
V = Tensión nominal (Voltios).
P = Potencia nominal (CV ó KW).

TABLA N° 5.- POTENCIA APARENTE CON ROTOR BLOQUEADO (S_P / S_N) PARA MOTORES TRIFÁSICOS CONFORME LA NORMA IEC 34-12.			
FAJA DE POTENCIAS NOMINALES		S_P / S_N	
CV	KW	KVA/CV	KVA/KW
> 0.54 ≤ 8.6	> 0.4 ≤ 6.3	9.6	13
> 8.6 ≤ 34	> 6.3 ≤ 25	8.8	12
> 34 ≤ 140	> 25 ≤ 100	8.1	11
> 140 ≤ 860	> 100 ≤ 630	7.4	10

B.- INDICACION DE LA CORRIENTE

La indicación del valor de la corriente de rotor bloqueado en la placa de identificación del motor es hecha a través de la letra código normalizada que da la indicación de la faja de valores KVA/CV.

Los valores correspondientes a éstas letras del código de arranque se muestran en la tabla N° 6.

Los valores del torque de arranque son especificados por las nor-mas NEMA (MGI 1978 Parte 12) e IEC (Public. 34-12). Quienes dan los requerimientos mínimos de torque.

CONTINUACION

Deben observarse que las normas NEMA son mas rigurosas para definir la características de torque, definiendo el diseño A, B, C y D.

Mientras las normas IEC solo distinguen dos tipos de diseño: El N (motor trifásico de torque normal) y H (motor trifá-sico de alto torque de arranque).

La corriente de arranque se especifica de acuerdo a las normas de fabricación, habiendo dos alternativas que son:

- Los fabricantes que utilizan las normas IEC especifican directamente la relación I_P / IN.
- Los fabricantes que utilizan las normas NEMA especifican indirec-tamente la corriente de arranque por una letra de código que indica la relación de los KVA de arranque y los HP ó CV nominales.
-

$$I_{ARRAN} = \frac{(\text{Letra de código}).\ HP\ .\ 1000}{\sqrt{3}\ .\ V}$$

$$\text{Código de arranque - KVA / CV} = \frac{(I_P\ /\ I_N\ .\ 0.736)}{EF\ .\ FP}$$

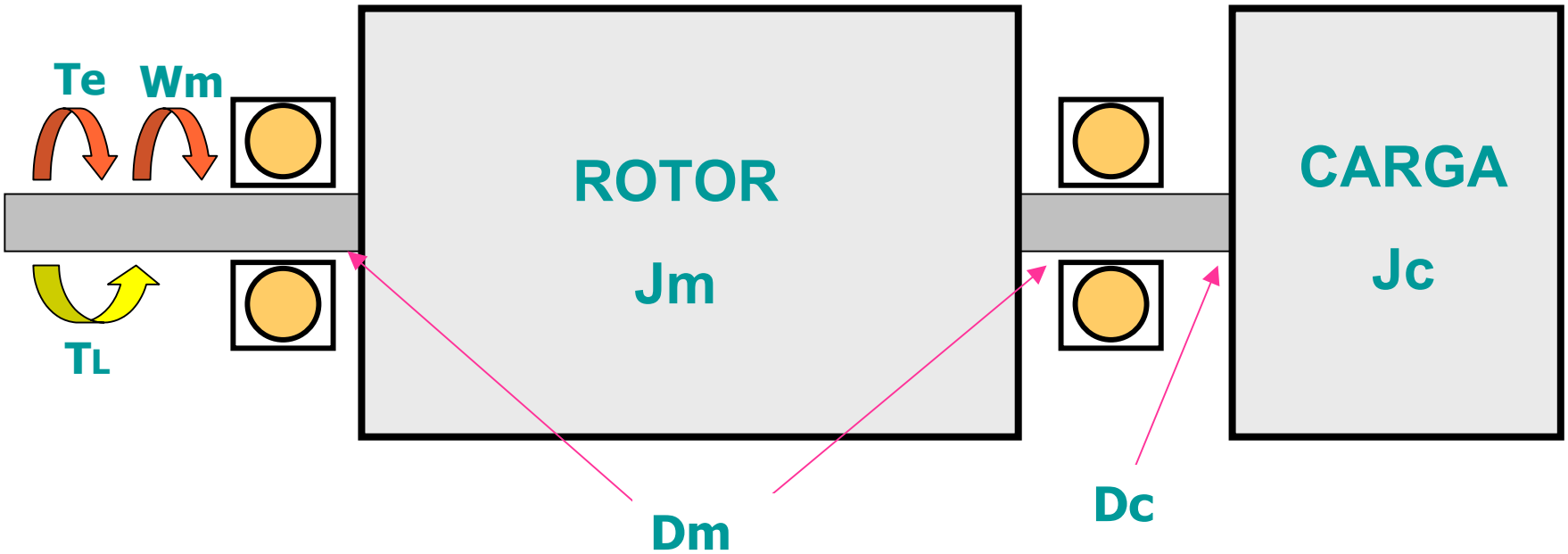
Donde:

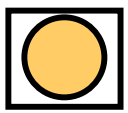
EF = Eficiencia
FP = Factor de potencia.
HP = Potencia útil puede ser CV.

TABLA N° 6.- RELACIÓN DE LOS KVA DE ARRANQUE POR HP CONFORME A LAS NORMAS NEMA IEC		
CODIGO	KVA / HP	KVA / CV
A	0.10 - 3.14	0.10 - 3.14
B	3.15 - 3.54	3.15 - 3.54
C	3.55 - 3.99	3.55 - 3.99
D	4.00 - 4.49	4.00 - 4.49
E	4.50 - 4.99	4.50 - 4.99
F	5.00 - 5.59	5.00 - 5.59
G	5.60 - 6.29	5.60 - 6.29
H	6.30 - 7.09	6.30 - 7.09
J	7.10 - 7.99	7.10 - 7.99
K	8.00 - 8.99	8.00 - 8.99
L	9.00 - 9.99	9.00 - 9.99
M	10.00 - 11.19	10.00 - 11.19
N	11.20 - 12.49	11.20 - 12.49
P	12.50 - 13.99	12.50 - 13.99
R	14.00 - 15.99	14.00 - 15.99
S	16.00 - 17.99	16.00 - 17.99
T	18.00 - 19.99	18.00 - 19.99
U	20.00 - 22.39	20.00 - 22.39
Y	22.4 a mas	22.4 a mas

ECUACION MECANICA

$$T_e - T_L = J_{TOTAL}\, p\, W_M + D_{TOTAL}\, W_M$$





Rodamientos de bolas

ECUACION MECANICA

Se trata de equilibrar la energía eléctrica absorvida por los arrollamientos del estator y la potencia mecánica entregada por el eje de la máquina rotativa. Para relacionar ésta transferencia de energía eléctrica a mecánica es que se utiliza la siguiente ecuación a la que la llamamos ecuación mecánica.

$$\mathbf{Ta = Te - T_L = J_{TOTAL}\, p\, Wm + D_{TOTAL}\, Wm}$$

Donde :

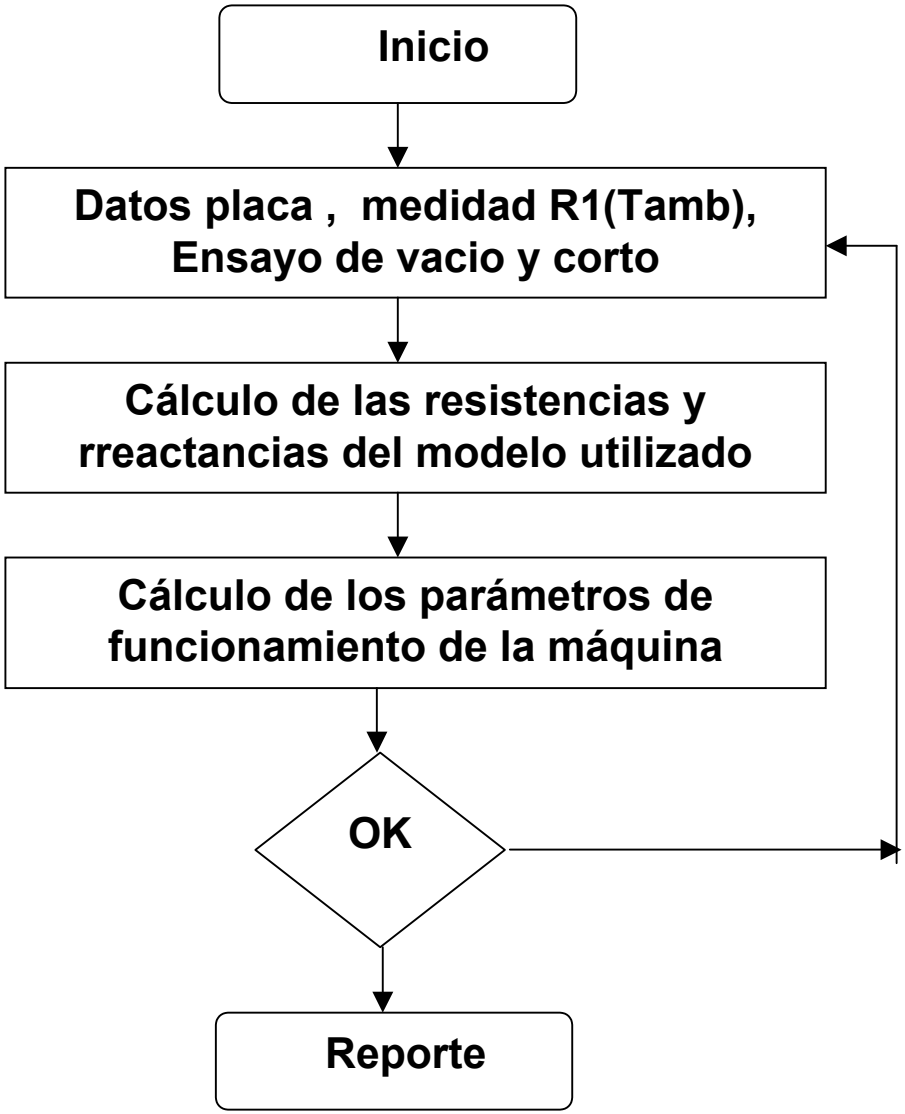
Te	=	Torque electromagnético (N-m)
T_{TOTAL}	=	Torque de la carga (N-m)
J_{TOTAL}	=	Momento de inercia (Kg-m^2)
Wm	=	Velocidad angular (Rad/seg)
D_{TOTAL}	=	Coeficiente de fricción (N-m-seg)
p	=	Derivada con respecto al tiempo.

La ec. mecánica resulta viable siempre y cuando exista un torque acelerante es decir para que exista movimiento el torque electromagnético de ser mayor que el torque resistente de la carga, tal como lo señala a continuación $\mathbf{Te > T_L}$.

$$\mathbf{J_{TOTAL} = J_{ROTOR} + J_{CARGA}} \qquad y \qquad \mathbf{D_{TOTAL} = D_{ROTOR} + D_{CARGA}}$$

El torque electromagnético tendrá su trabajo principal en la carga y la potencia mecánica en el eje del motor(HP) ó potencia neta (la que se encuentra en los catálogos del fabricante), tiene una relación directa con la velocidad angular a la cual se desplaza la masa girante.

FLUJOGRAMA


Inicio
Datos placa , medidad R1(Tamb), Ensayo de vacio y corto
Cálculo de las resistencias y rreactancias del modelo utilizado
Cálculo de los parámetros de funcionamiento de la máquina
OK
Reporte

EJEMPLOS

CONEXION ESTRELLA

CONEXION TRIANGULO

EMRAT

PRUEBAS DE RUTINA

Nombre	Descripción	Normas	Notas
1.- Resistencia DC	Medida de la resistencia estatorica. Medida resistencia rotórica (R, Bob.)	IEEE 112 / 1978 Item 4.1	Hacer corrección A temp. de trabajo
2.- En vacío	Medida de la corriente, tensión y Potencia activa .en la entrada.	IEEE 112 / 1978 Item 4.6	A tensión y fecuencia nominales.
3.- Rotor bloqueado	Medida de la corriente, tensión, potencia en la entrada, torque	IEEE 112 / 1978 Item 4.8	. A tensión reducida. . A tensión nominal.
4.- Alto tensión	Aplicado a los bobinados desconecta-dos están en función del frame.	IEEE 112 / 1978 Item 6.2	Peligro.Peligro Prueba destructiva.

PRUEBAS TIPO

Nombre	Descripción	Normas	Notas
1.- Torque	Medida de las caracte -rísticas del torque	IEEE 112 / 1978 Item 4.9.2 Método 4.	Torque vs Velocidad Corriente vs Velocidad
2.- Temperatura	Determinación deTmax. en los bobinados	IEEE 112 / 1978 Item 5.1 Método 3	
3.- Carga	Medidas de: Corriente, Pin,Pout, RPM nom.l EF, FP, s, Torque nom.	IEEE 112 / 1978 Item 4.2, 4.4, 4.5, 4.7 Metodo B	Curvas de performance A 100,75,50 % de carga

APLICACIONES

1.- Tenemos un motor trifásico tipo jaula de ardilla (simple jaula) con categoría NEMA B con las siguientes características : 10 HP, 440 Voltios, 14 Amperios, 60 Hz, 8 polos, 865 RPM, conexión estrella con seis terminales.

Se han realizado las pruebas cuyos resultados pasamos a detallar:

* Vacío: Vo = 440 Voltios, Io = 5.95 Amperios y Po = 350 Watios.
* Corto circuito (rotor bloquedo): Vcc = 94.5 Voltios, Icc = 11.83 Amperios y Pcc = 890 Watios.

La medida de la resistencia estatórica al inicio de la prueba fue de 0.65 Ohmios (utilizando fuente de DC, instrumentos y a temperatura ambiente de 20°C).

Se desea hallar los parámetros del circuito T equivalente.

APLICACIONES

b.- Un motor trifásico tipo jaula de ardilla (simple jaula) con categoría NEMA B con las siguientes características: 60 HP, 380 Voltios, 60 Hz, 1760 RPM, conexión triángulo con seis terminales.
Se han realizado las pruebas:
La medida de la resistencia estatórica al inicio de la prueba fue de 0.02728 Ohmios/fase (utilizando un puente Westhon a temperatu-ra ambiente de 20? C).
* Ensayo en vacío a 60 Hz:

Vo(Vol.)	440	420	400	380	360	340	320	300
Io(Amp.)	53.3	44.0	37.3	32.3	29.0	26.3	24.0	22.1
Po(Wat.)	2700	2400	2100	1800	1740	1530	1500	1440

* Ensayo de Corto circuito (rotor bloquedo): Vcc = 59 Voltios, Icc = 87.2 Amperios y Pcc = 1875 Watios.

Calcular:

- Se desea hallar los parámetros del circuito T equivalente y L invertida a 380 voltios y 60 Hz.
- Usando el circuito L invertida hallar: Tarr/Tn, Tmax/Tn,

CONCLUSIONES

1.-El software EMRAT realiza la simulación del funcionamiento de los motores asíncronos trifásicos (en vacío y con carga),emitiendo un reporte minucioso y preciso en las diferentes regiones de trabajo de la máquina.Ademas nos proporciona las curvas de torque,corriente ,eficiencia y factor de potencia.

2.-Variando el deslizamiento de 1 a 0 podemos ir variando los parámetros de los motores desde el arranque hasta su trabajo en vacio,pasando por el torque y potencia máxima (máxima transferencia de potencia).

3.-Queda demostrado que para un deslizamiento llamado Smax se produce una máxima potencia y por ende un máximo torque (caracteristica fundamental de las máquinas rotativas).

4.-En consecuencia,con la utilización de esta herramienta podemos evaluar a plenitud todos y cada uno de los parámetros de los motores asíncronos trifásicos.

5.-Se ha determinado que las variaciones del torque son directamente proporcionales a R_2'.

6.-Finalmente este paquete computacional puede ser utilizado en la verificación de los motores asíncronos trifásicos de pequeño,mediano y gran porte.

BIBLIOGRAFIA

1.- Veinott Cyril Theory and Desinn of small induction motors.Mac Graw-Hill. Bok Company INC 1959

2.- George J.Thaler - Milton L. Wilcox. Máquinas eléctricas - Estado dinámico y permanente. John Wiley & Sons Inc. 1966.

3.- A.E.Fitzgerald - Charles Kingsley. Teoría y análisis de las máquinas eléctricas.Mac Graw-Hill .Bok Company Inc 1992

4.- Che Mun Ong Dinamic Simulation Machinary Prentice Hall Inc 1998

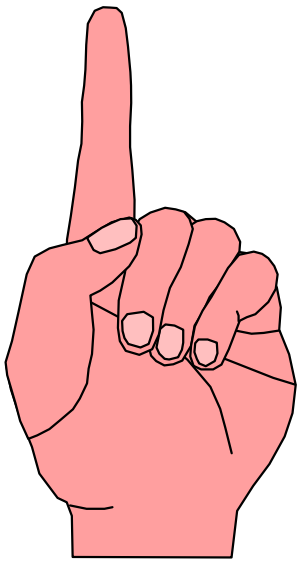
5.- George Patrick Shult Transformer and motors - A Division of Prentice Hall Computer 11711 North
College,Carmel,Indiana USA. 1995

6.- Irving. L. Kosow. Máquinas eléctricas y transfor-madores Prentice Hall Inc 1991

7.- Donald V. Richardson. Arthur J. Caisse. Rotating Electric Machinery and Transformer Technology.
Prentice Halll Inc 1998

8.- Normas internacionales : IEC 34 – 2, EMA MG1 – 1993 Part.1 Pag 12, IEEE – 112 (test standart).Volumen 1,2,3 y 4.

ENSAYOS DE RUTINA



EXPOSITOR : ING. HUBER MURILLO M.

ÍNDICE

- INTRODUCCIÓN.
- PRUEBA DE RESISTENCIA ÓHMICA
- MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO
- PRUEBA DE VACÍO.
- PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO.

INTRODUCCION

Las pruebas de rutina, se realizan teniendo el motor completamente armado; es decir, después de su fabricación, reparación y/o mantenimiento.
Estas pruebas se realizan según la norma: IEC 34 - 2.
Las pruebas de rutina tienen dos propósitos fundamentales:

1) Verificar que las máquinas cumplan con las condiciones a que estarán sometidas durante su operación.

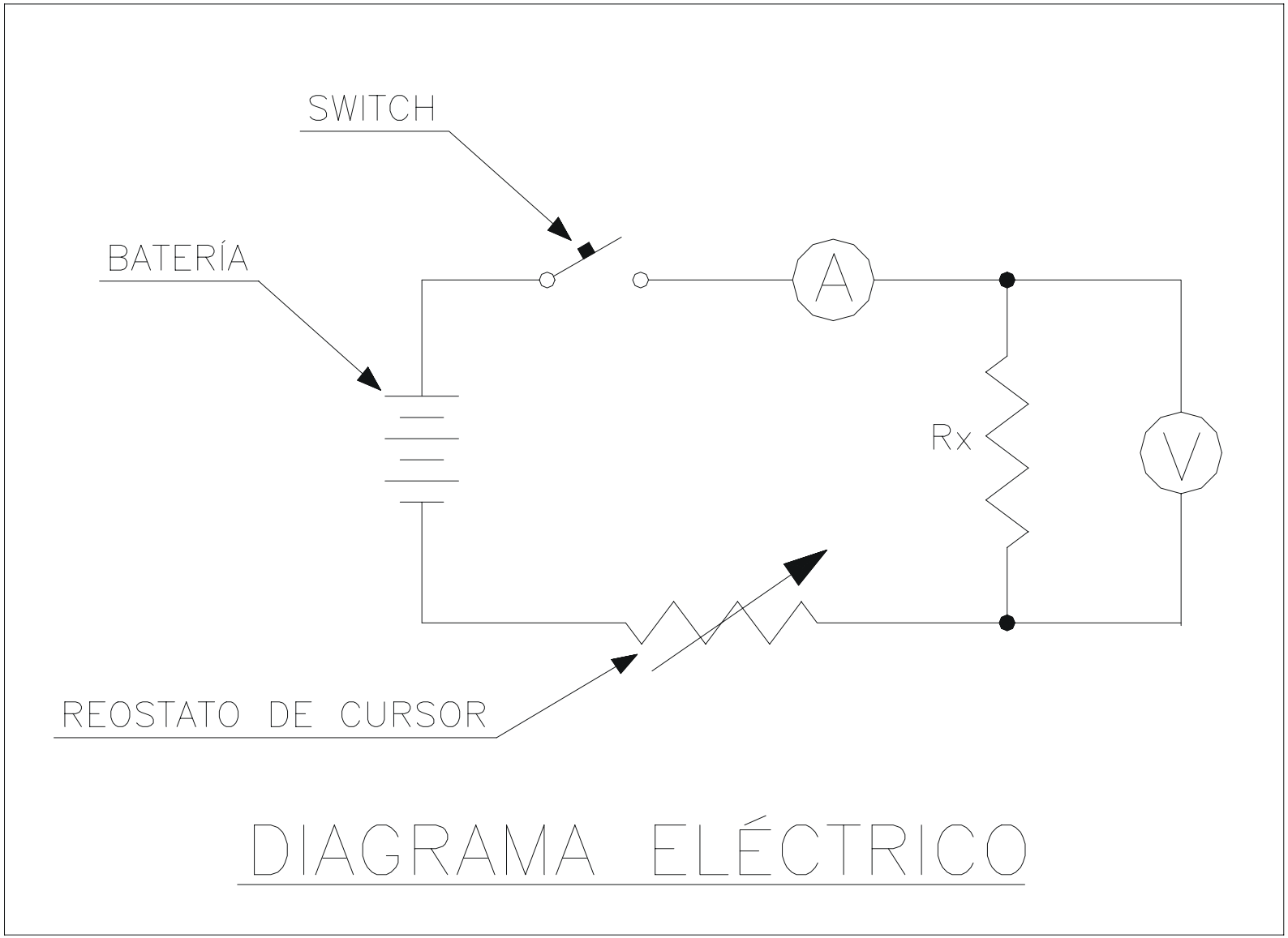
2) Verificar las características de diseño de las máquinas indicadas normalmente en la placa de características.

PRUEBA DE RESISTENCIA ÓHMICA :

La medición de la resistencia de los devanados del estator y el rotor para los motores de rotor devanado se efectúa por lo general por el método voltio – amperímetro en forma excepcional, cuando se tienen resistencias elevadas se usa el puente de Wheatstone y para devanados de muy baja resistencia se usa el doble puente de Thomson.

Tomar las precauciones del caso para que la medida contenga un bajo error.

La medida realizada se hace a Tambiente.
Hacer las compensaciones por : Temperatura y efecto skin.


SWITCH
BATERÍA
A
Rx
V
REOSTATO DE CURSOR
DIAGRAMA ELÉCTRICO

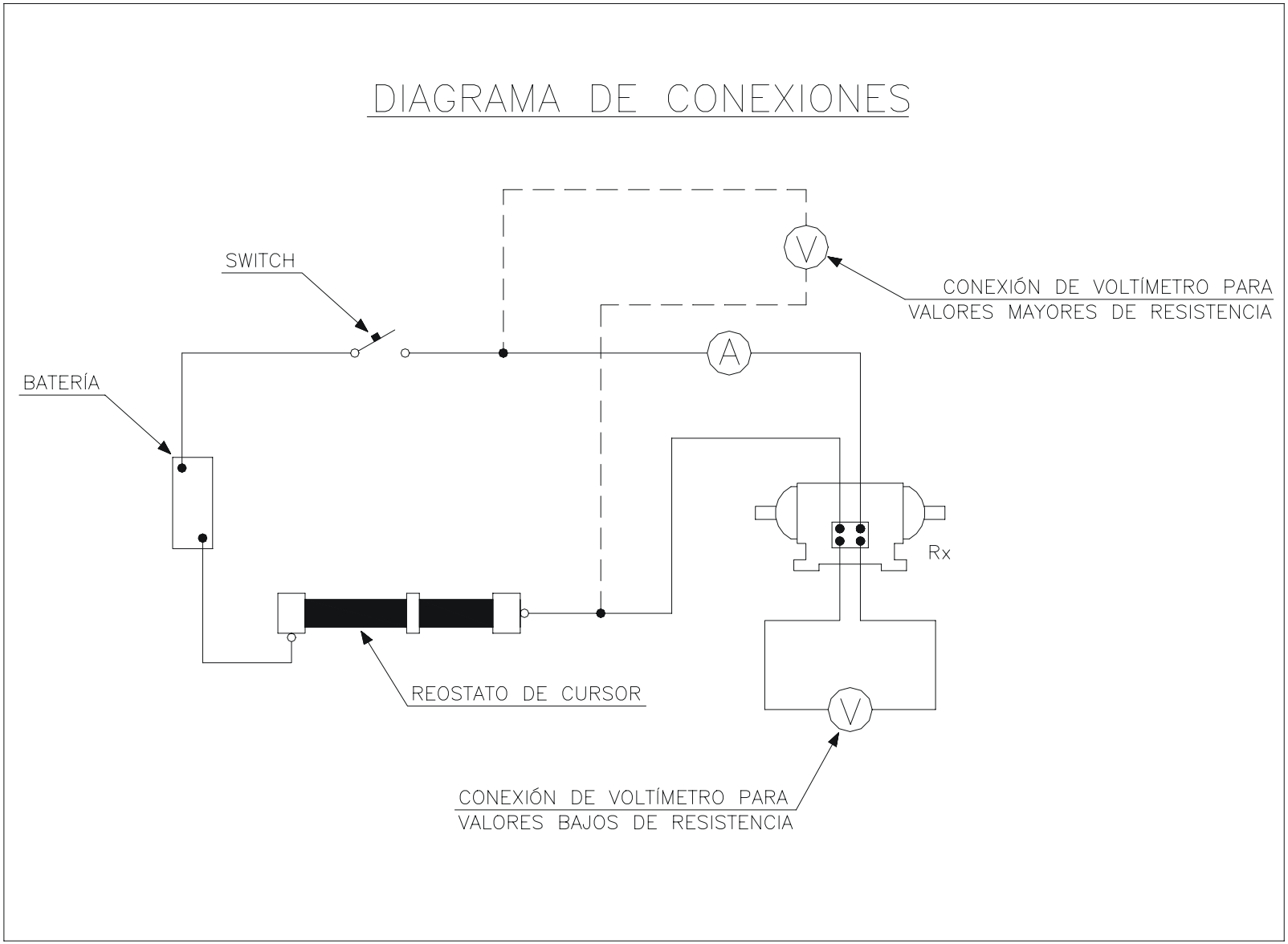


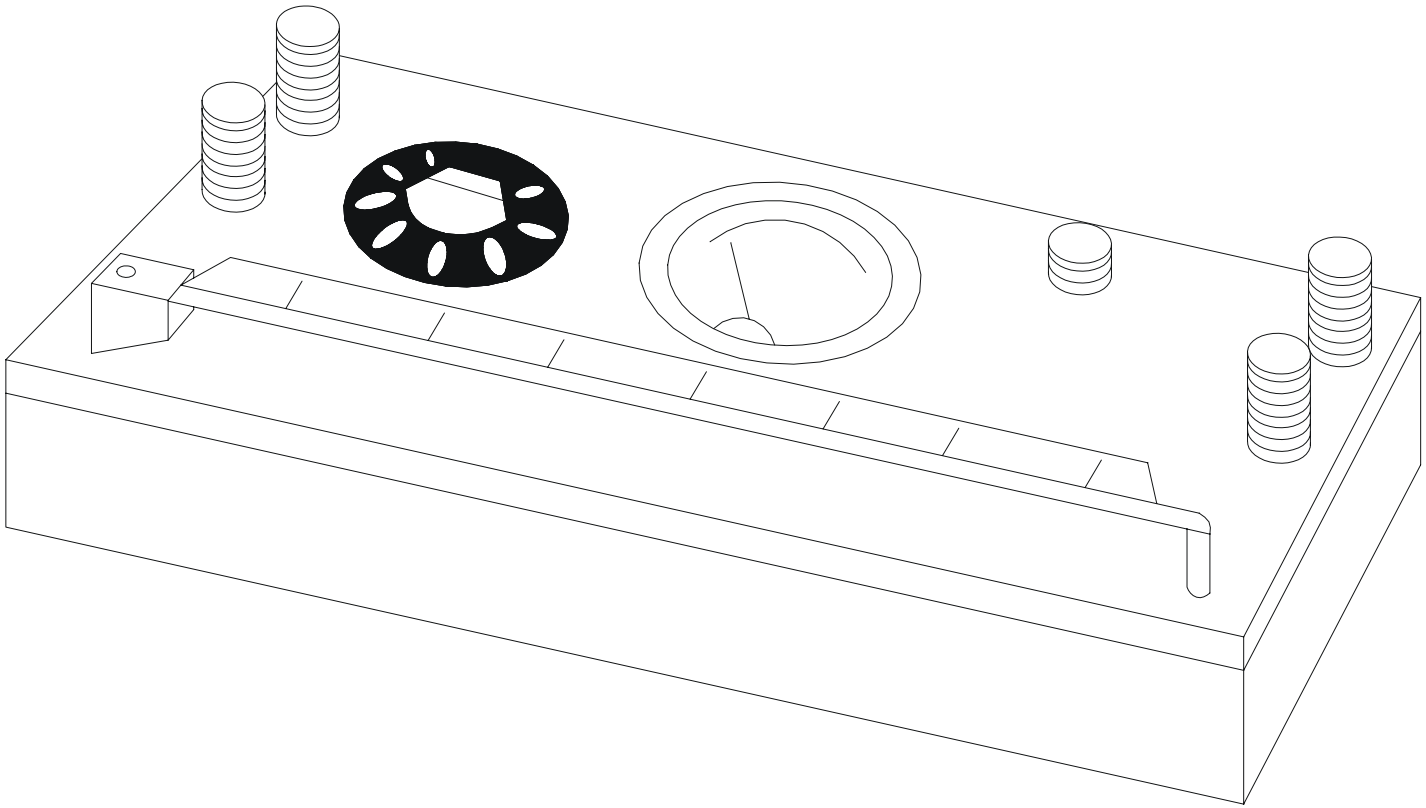
DIAGRAMA DE CONEXIONES
SWITCH
BATERÍA
V
A
CONEXIÓN DE VOLTÍMETRO PARA
VALORES MAYORES DE RESISTENCIA
Rx
REOSTATO DE CURSOR
V
CONEXIÓN DE VOLTÍMETRO PARA
VALORES BAJOS DE RESISTENCIA

MÉTODO DEL PUENTE DE WHEATSTONE:

Está constituido por cuatro resistencias dispuestas formando un cuadrilátero; en la diagonal se encuentra una fuente de f.e.m. (pila) y un elemento de ajuste de cero Ra, Rb y Rc son tres resistencias de valor conocido y Rx es la resistencia por medir.

En base a la polaridad de la batería se puede saber a priori el sentido de circulación de la corriente a lo largo de las dos ramas, ya sea en el sentido a-b-c o a-d-c.

En cambio, no se puede establecer a priori el sentido de la corriente en la rama diagonal donde se encuentra el indicador de cero debido a que depende de la diferencia de potencial entre los puntos b y d.



PUENTE DE WHEATSTONE

MÉTODO DEL DOBLE PUENTE DE THOMSON:

Para la medición de resistencias muy pequeñas, se emplea frecuentemente el llamado doble puente de Thomson, el cual tiene como característica fundamental dar una indicación independiente de las eventuales variaciones de corriente en el circuito en el cual se encuentra la resistencia por medir.

El método del doble puente de Thomson se basa en la comparación entre la caída de tensión provocada por la resistencia incógnita Rk del mismo orden de magnitud, conectadas en serie entre sí y alimentadas por la batería de alimentación del puente.

En los extremos de estas dos resistencias se derivan los conductores que llevan las resistencias Ra, Ra’, Rb, Rb’ del puente y entre las cuales se inserta el galvanómetro.

Cuando el galvanómetro indica cero, significa que no circula corriente a través del mismo, es decir que a través de Ra y Rb circula la misma corriente, como puede ser a través de Ra’ y Rb’.

Esta condición de equilibrio se expresa por la relación que permite obtener **EL VALOR DE LA RESISTENCIA POR MEDIR QUE ES:**

$$Rx = Rk \times (Ra/Rb)$$

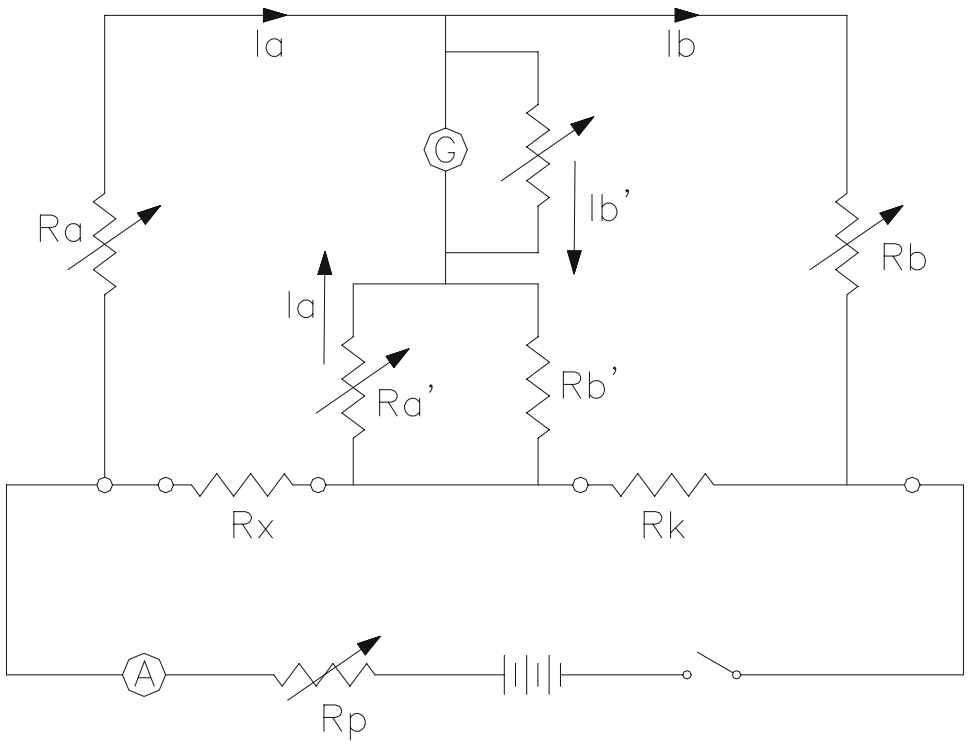


DIAGRAMA DE PRINCIPIO DEL DOBLE PUENTE DE THOMSON PARA MEDIR RESISTENCIAS INFERIORES A 1 OHM

PRUEBA DE AISLAMIENTO:

Estas pruebas sirven para verificar las características de los aislamientos usados en las máquinas eléctricas cuando se ven sometidas a esfuerzos dieléctricos, y determinar si pueden o no sufrir daños.

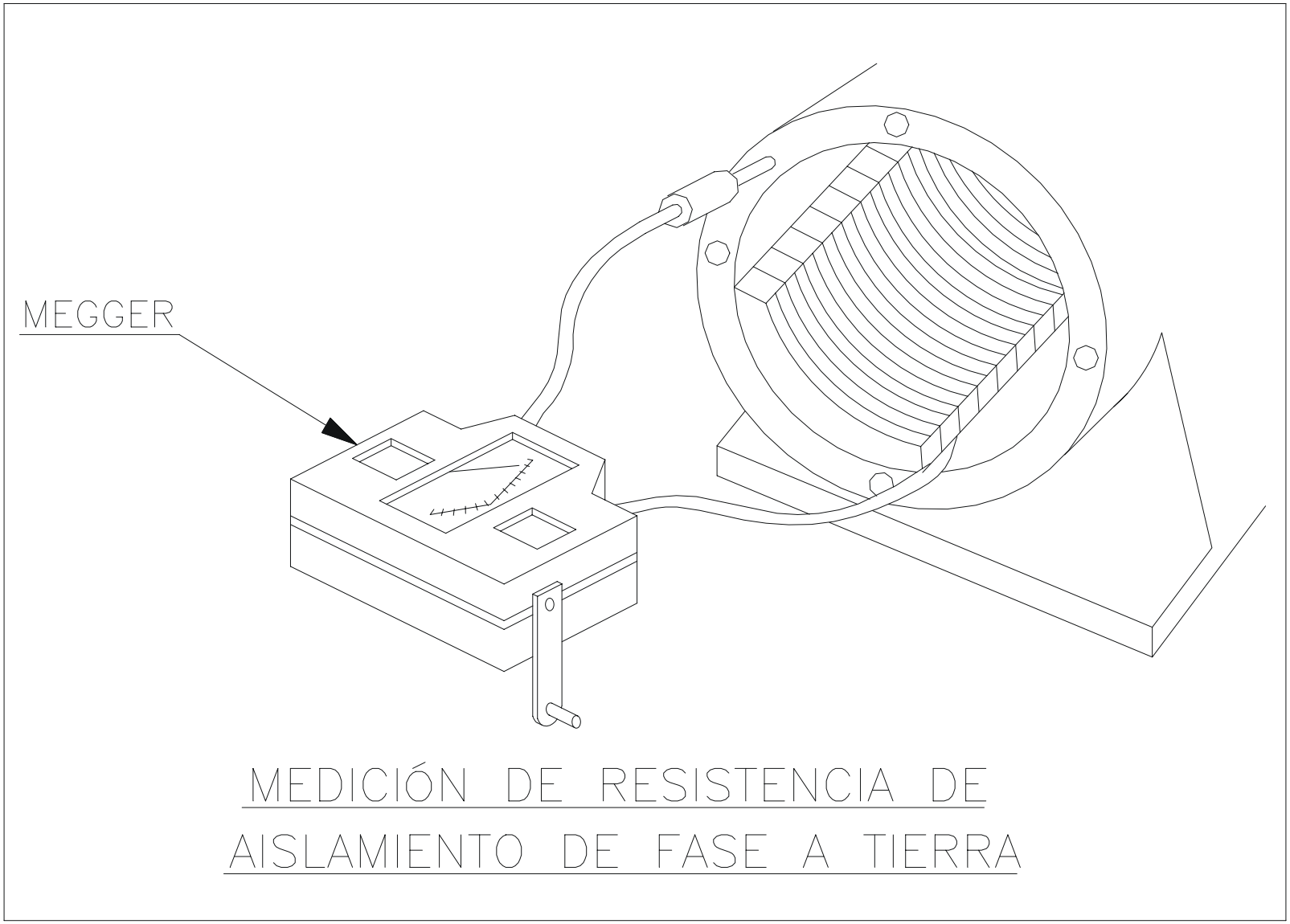
Las pruebas en los aislamientos se pueden clasificar para los motores eléctricos como:

- Prueba de resistencia de aislamiento.
- Prueba de tensión aplicada.

Al realizar este ensayo seguir el procedimiento de medición recomendado por el fabricante.

$$R_{min} = 1 + V_n / 1000 \qquad (M\Omega)$$

Vn es la tensión mayor nominal de la máquina.



MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE FASE A TIERRA

PRUEBA CON TENSIÓN APLICADA:

Consiste en aplicar entre cualquier fase y masa (o entre fases) de la maquina a probar una tensión normalizada. Para realizar la prueba con tensión aplicada se debe disponer de un transformador elevador monofásico de potencia apropiada de cuyos terminales salen conductores delgados que se conectan a la máquina en prueba.

La tensión de prueba es gradúa por medio de un regulador de voltaje conectado en el ladode bajo voltaje del transformador elevador.

Tensón aplicada = 2 Vn + 1 (Kv)

PRUEBA DE VACÍO :

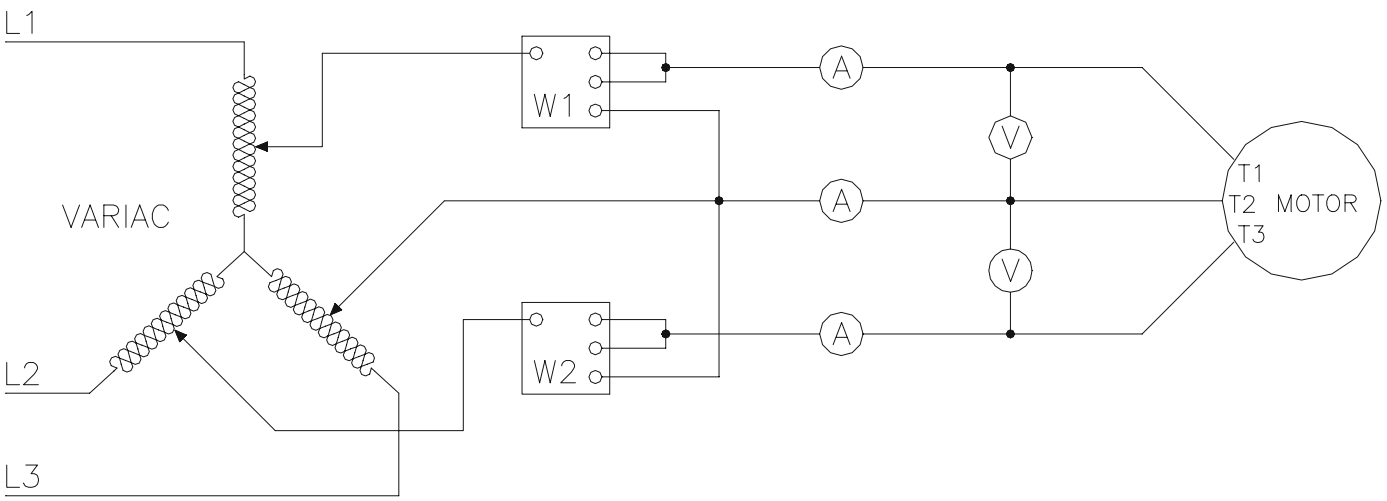
En este caso, el motor se encuentra desacoplado de la carga y se aplica una tensión nominal al devanado del estator. Al no haber carga en el eje tenemos que llevar a la masa inercial a la velocidad de vacío, para lo cual tenemos que vencer sus pérdidas (ligeras) en el cobre , núcleo y pérdidas por fricción y ventilación.

Estando en vacío el, el motor, presenta un desliza-miento muy pequeño, motivo por el cual la corriente que circula por el rotor se desprecia.

Este ensayo es muy importante para la evaluación de la calidad del motor asíncrono o de inducción.

El objetivo de esta prueba es determinar:

- Problemas mecánicos, ruidos y conexiones en mal estado.
- Las pérdidas en el núcleo (Histérisis y Foucoult).
- La corriente de vacío o de excitación.
- El deslizamiento en vacío.
- Las curvas características.



CONEXIONES PARA LA PRUEBA DE VACÍO

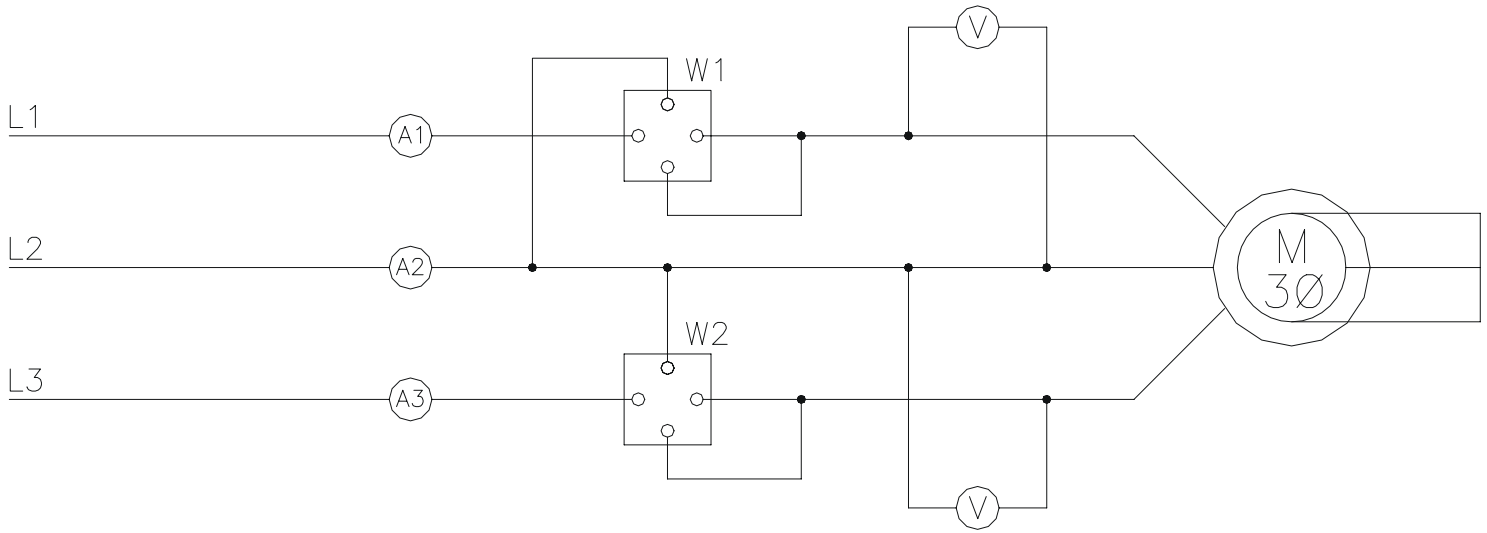
EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN

PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO:

El objetivo de esta prueba son determinar:
- Las pérdidas en los devanados del motor.
- La corriente nominal del motor.
- La tensión de corto circuito.
-La curva característica de corto circuito.

A partir de estos datos se debe calcular:
- La impedancia, resistencia y reactancia del rotor.
- El factor de potencia en corto circuito.
- Las pérdidas en los devanados a tensión nominal.
- La determinación del diagrama circular.

El desarrollo de esta prueba se realiza con rotor bloqueado y se debe efectuar en el menor tiempo posible, para evitar el calentamiento de los devanados.



CONEXIONES PARA LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN

PRUEBA DE TEMPERATURA O CALENTAMIENTO:

La prueba consiste en llevar a la máquina al valor de su propia carga nominal y mantenerla así hasta que se alcance su temperatura nominal o de régimen.

En el caso de los motores de inducción, la carga se aplica por medio de freno dinamométrico, es decir, aplicando el freno de Prony o cualquiera de las variantes de freno.

Control de la temperatura utilizando :

- Resistencias especiales (PTC, Pt100, etc).
- Termostatos.
- Resistencias regulables.

En este caso se usan termómetros de bulbo o de termopar aplicados a los puntos de las máquinas en donde se desea conocer la temperatura.

Se aplica en general para la medición de la temperatura:

- En las cabezas de las bobinas del devanado estatórico.
- En de puntos particulares de la superficie de la carcaza.
- En la base de los rodamientos.
- En los ductos de las cavidades por donde circula el aire frío y caliente de la ventilación del motor.

A partir de esta información se obtiene los siguientes parámetros principales:

- Potencia nominal.
- Corriente nominal.
- Deslizamiento en vacío.
- El factor de potencia.
- La eficiencia.

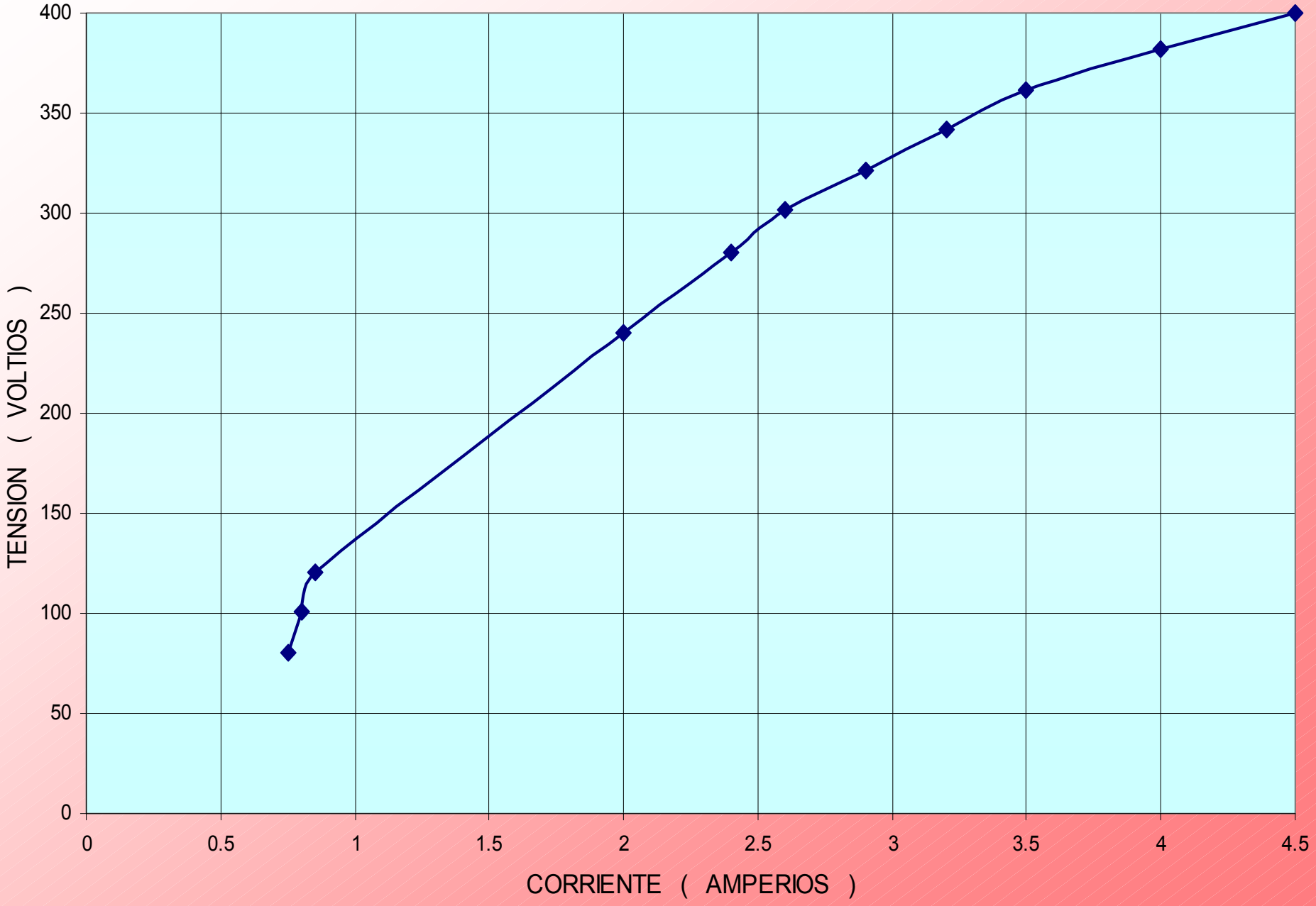
La obtención del rendimiento efectivo se puede hacer especialmente para motores pequeños, con la prueba directa, es decir, alimentando el motor a la tensión y frecuencia nominales y cargándolo por medio de un freno dinamométrico que se aplica en su flecha.

ENSAYOS DE MOTOR JAULA DE ARDILLA

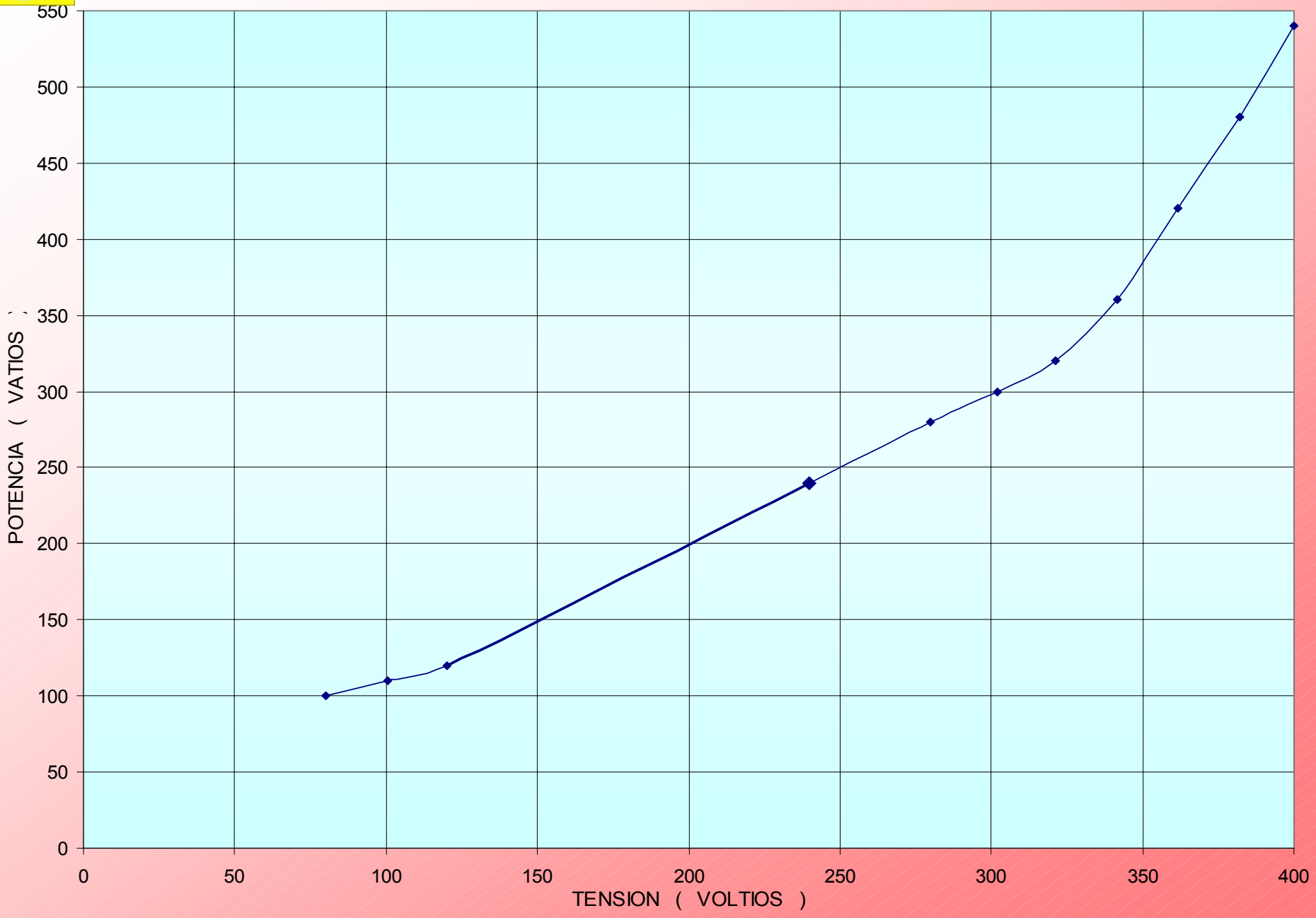
CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR TIPO JAULA DE ARDILLA MARCA DELCROSA

TENSION : 380 VOLTIOS.
FRECUENCIA : 60 HZ.
POTENCIA : 3.6 / 2.7 HP / KW.
RPM NOMINALES : 1150.
TIPO : NV112M6.
EFICIENCIA : 81 % .
F. P : 0.71 (Factor de potencia).
I NOMINAL : 7.0 AMPERIOS
Ca / Cn : 2.0.
Cmin / Cn : 1.8
Cmax / Cn : 3.0
Ia / In : 5.5
PD ² motor : 5.8 x 10- ² (Kgm ²)
Kgrs.I motor : 37.5 Kg.
F.C : B3 (Forma constructiva)

CARACTERISTICAS DE VACIO TENSION vs CORRIENTE

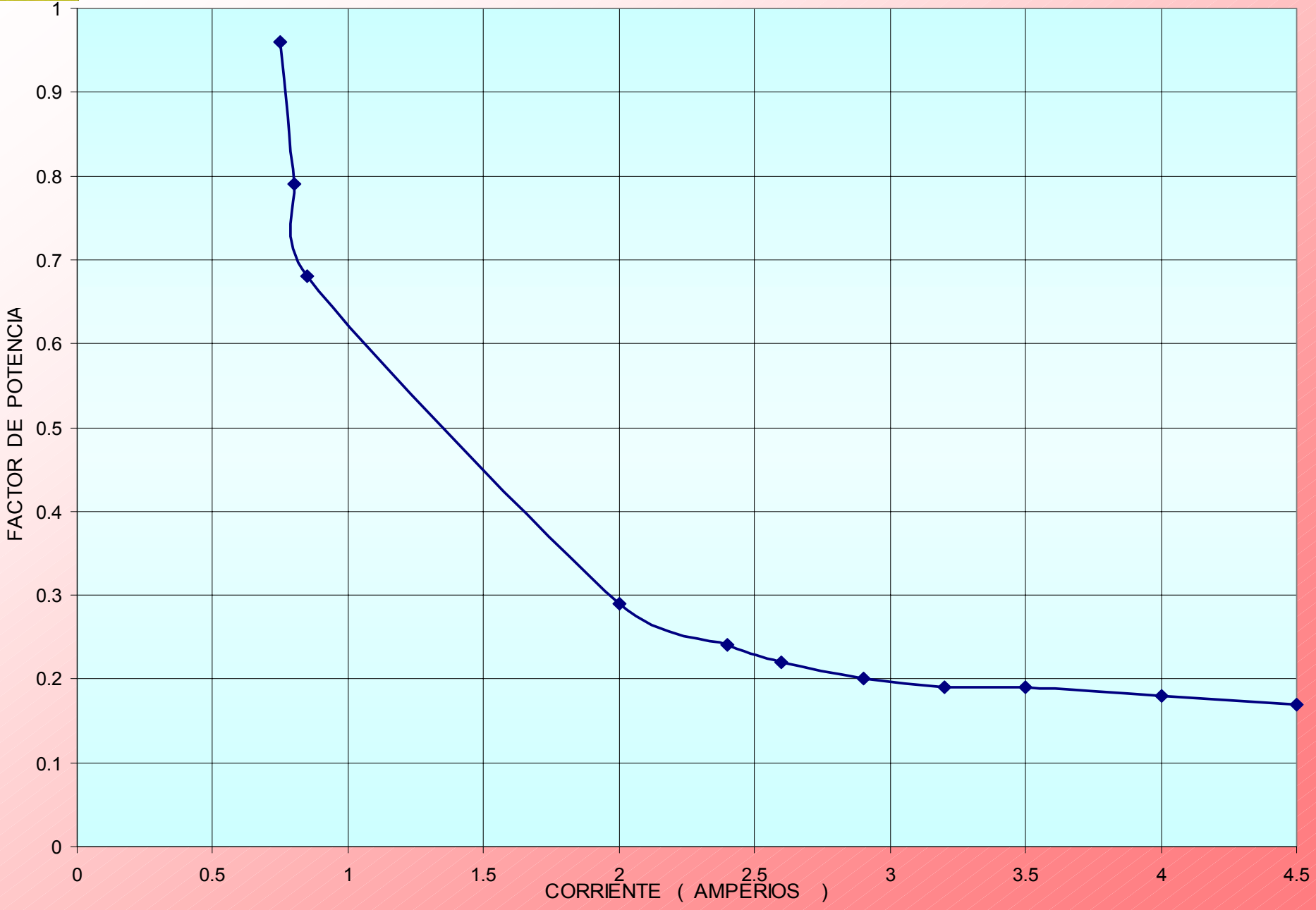


POTENCIA EN EL NUCLEO VS TENSION (EN VACIO)

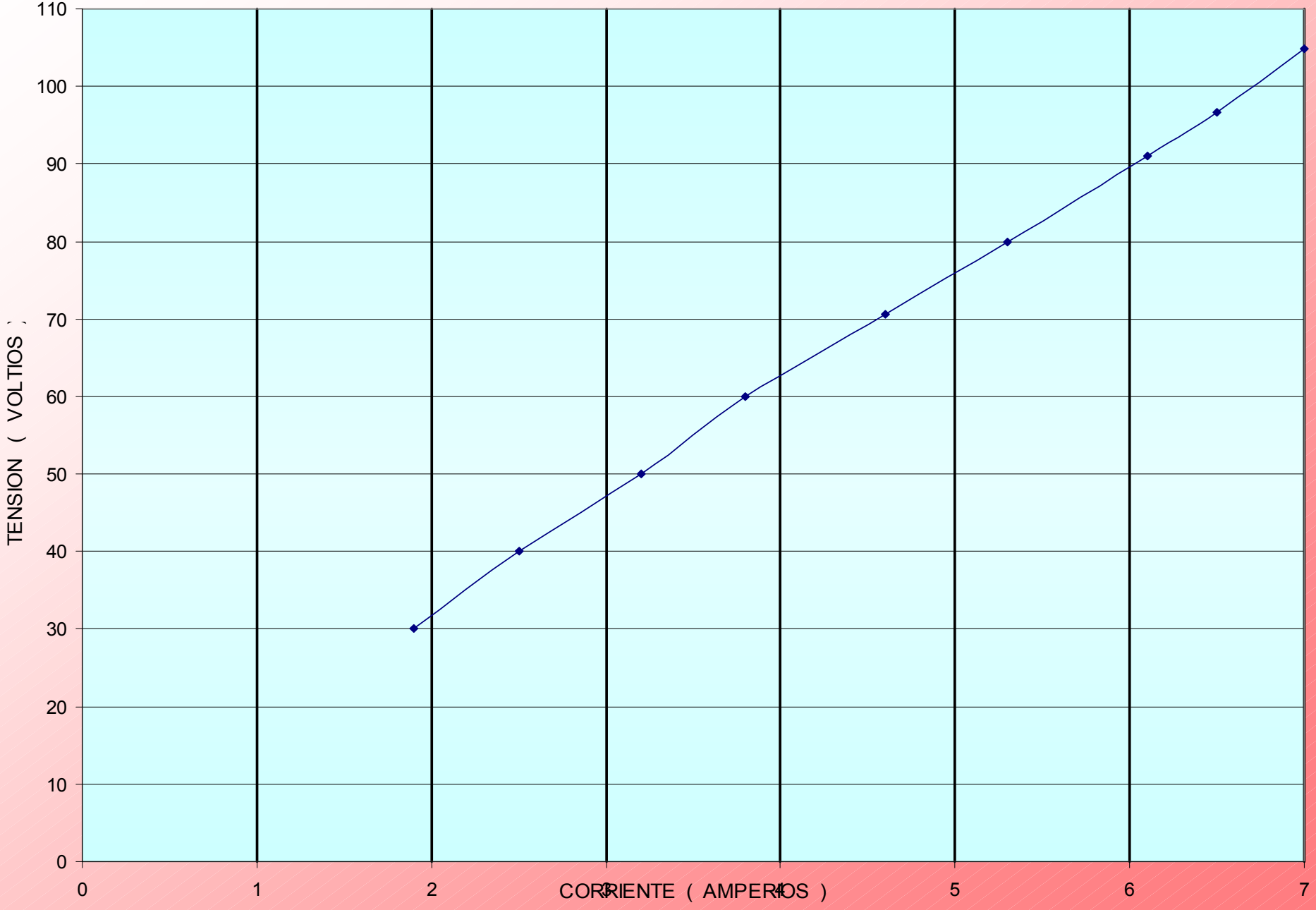


POTENCIA APARENTE VS TENSION (EN VACIO)

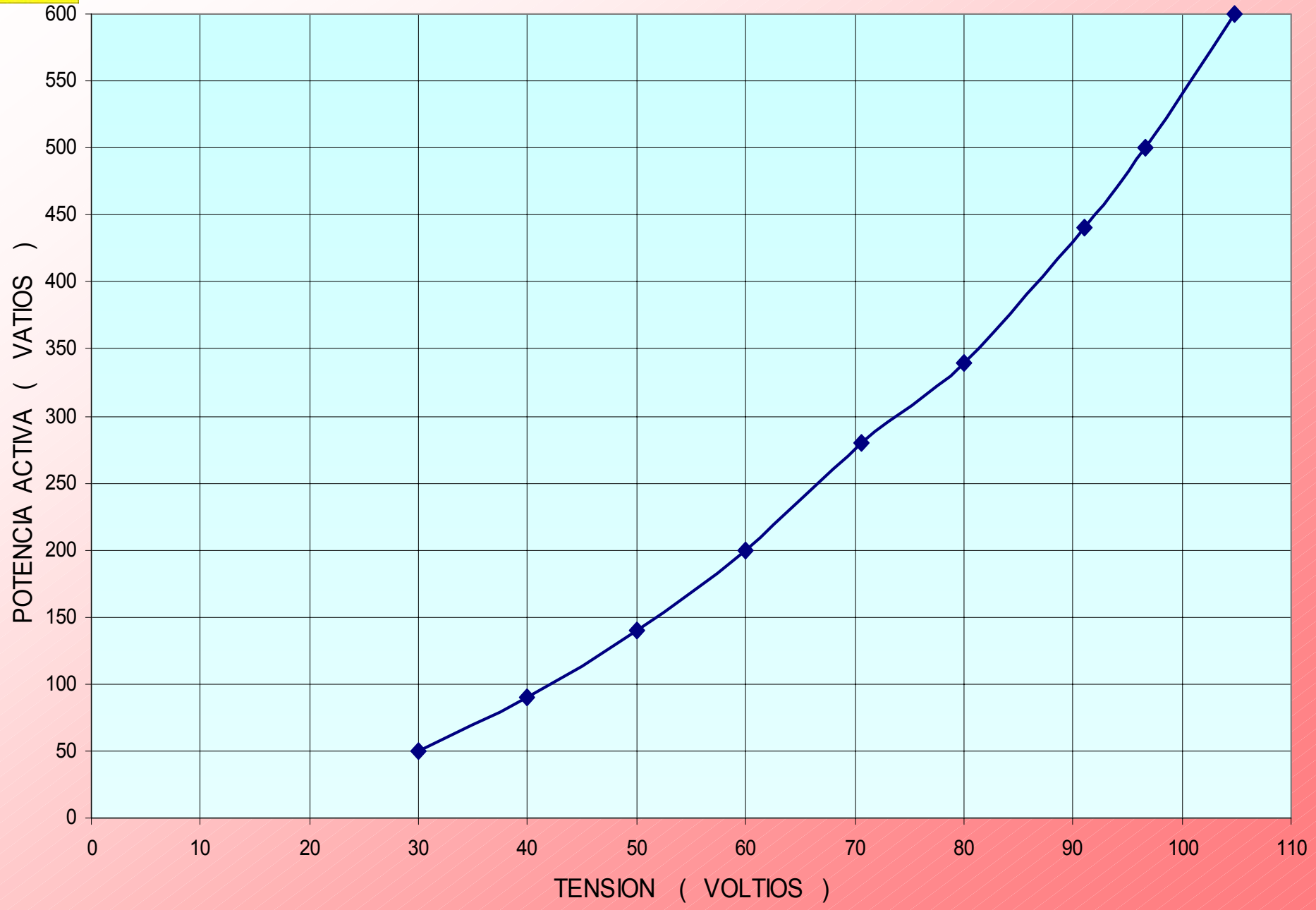
FACTOR DE POTENCIA VS CORRIENTE (EN VACIO)



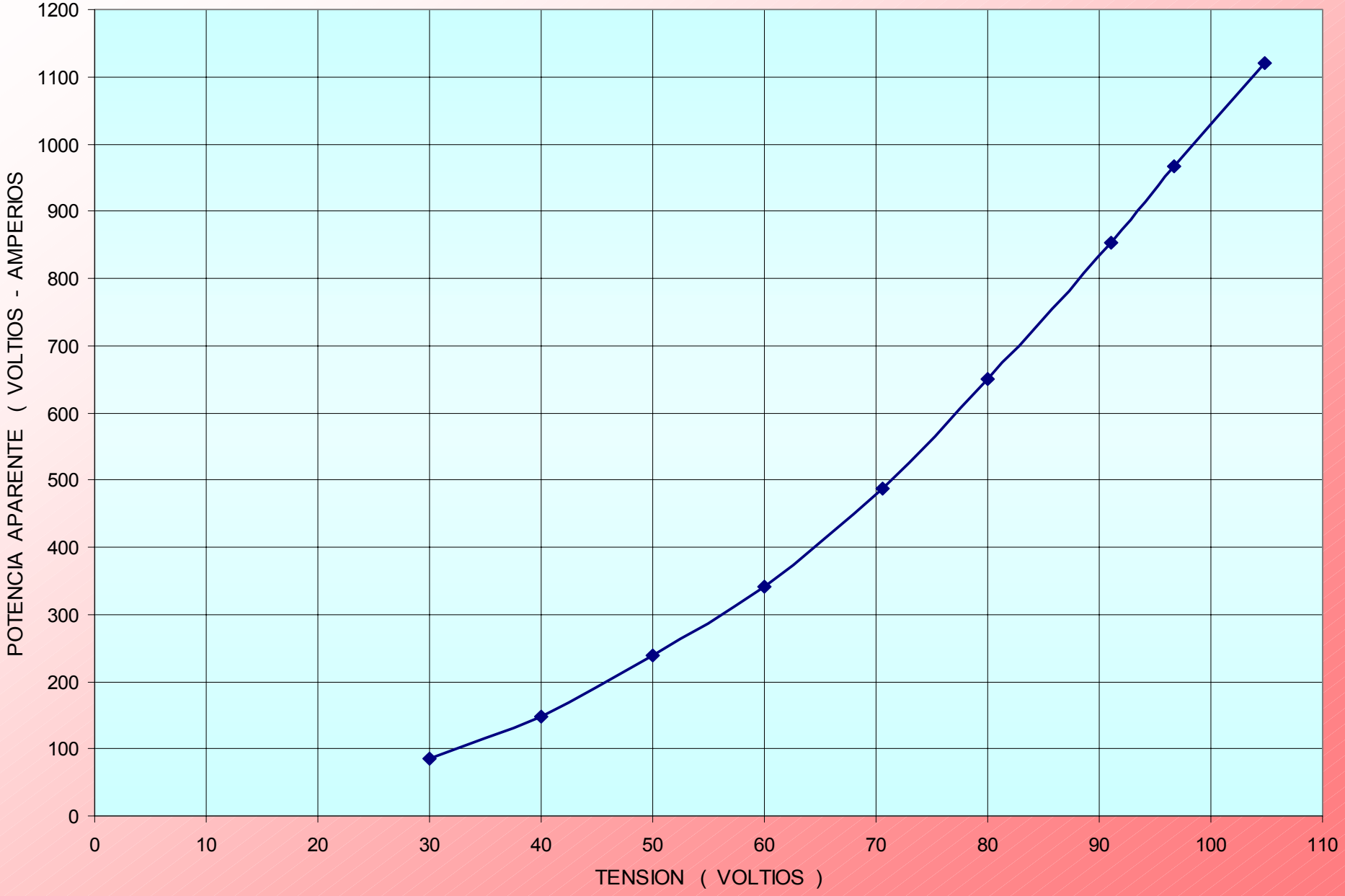
TENSION VS CORRIENTE (CORTO CIRCUITO)



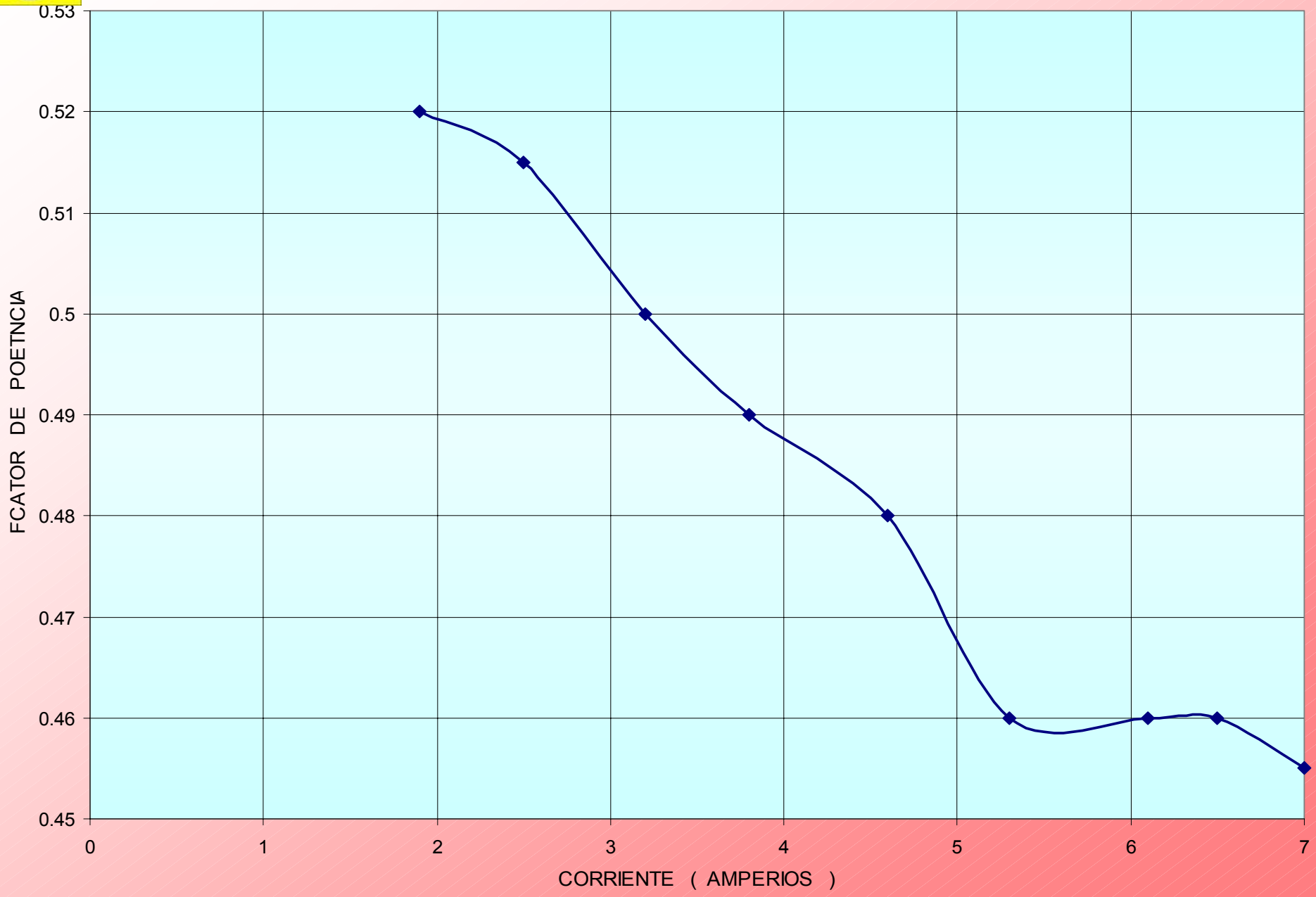
POTENCIA PERDIDAS vs TENSION (CORTO CIRCUITO)



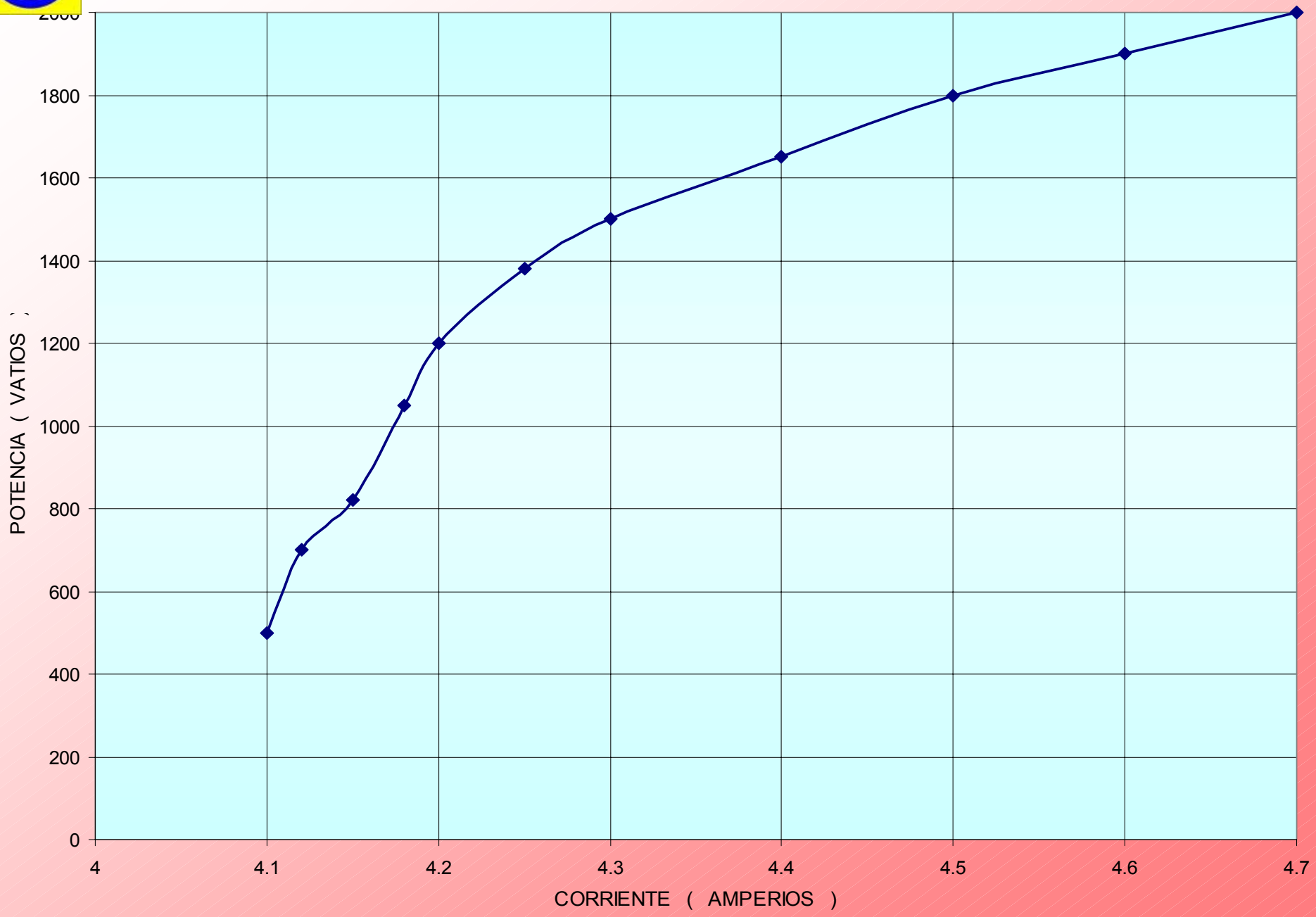
POTENCIA APARENTE vs TENSION (CORTO CIRCUITO)



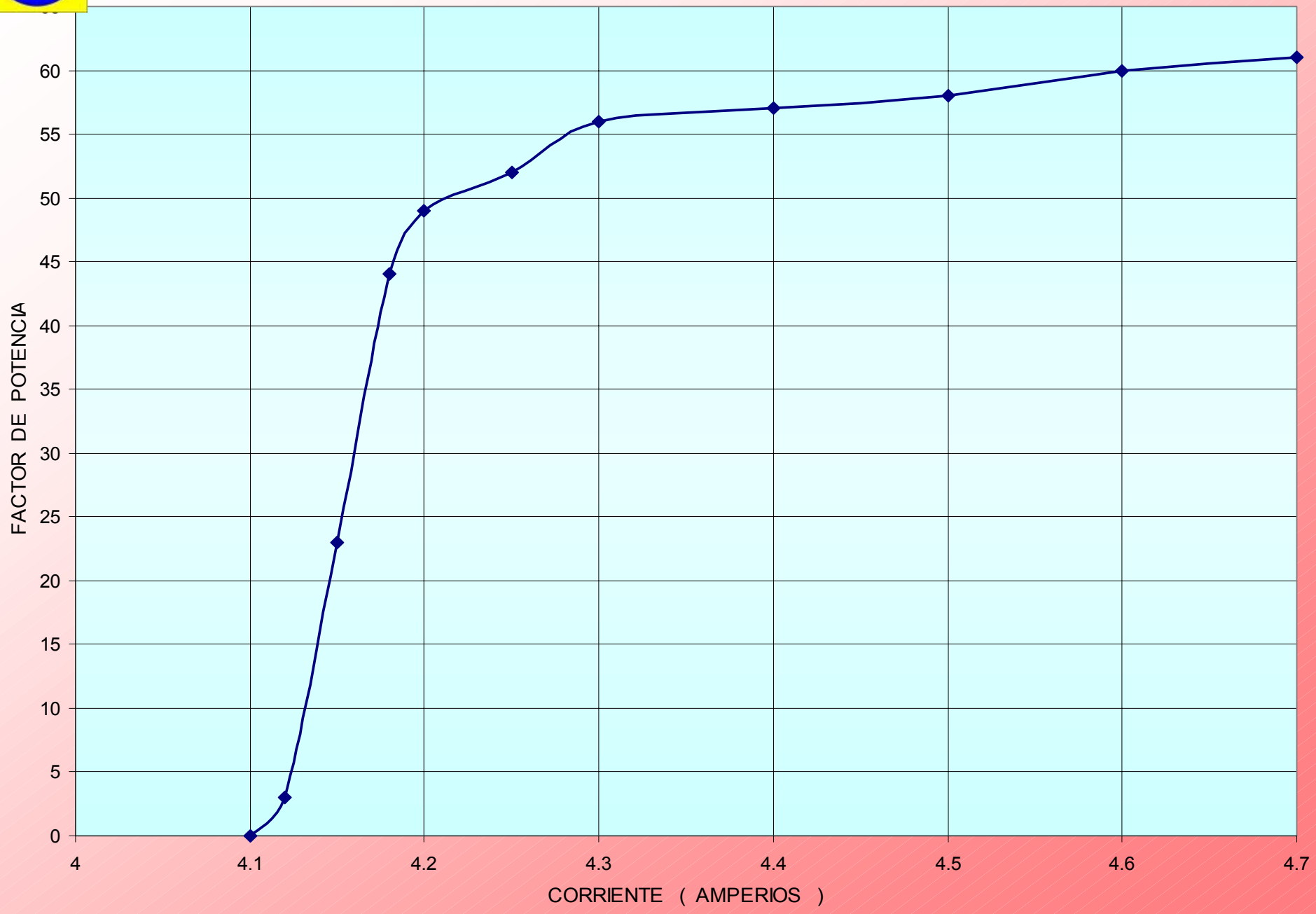
FACTOR DE POTENCIA VS CORRIENTE (CORTO CIRCUITO)



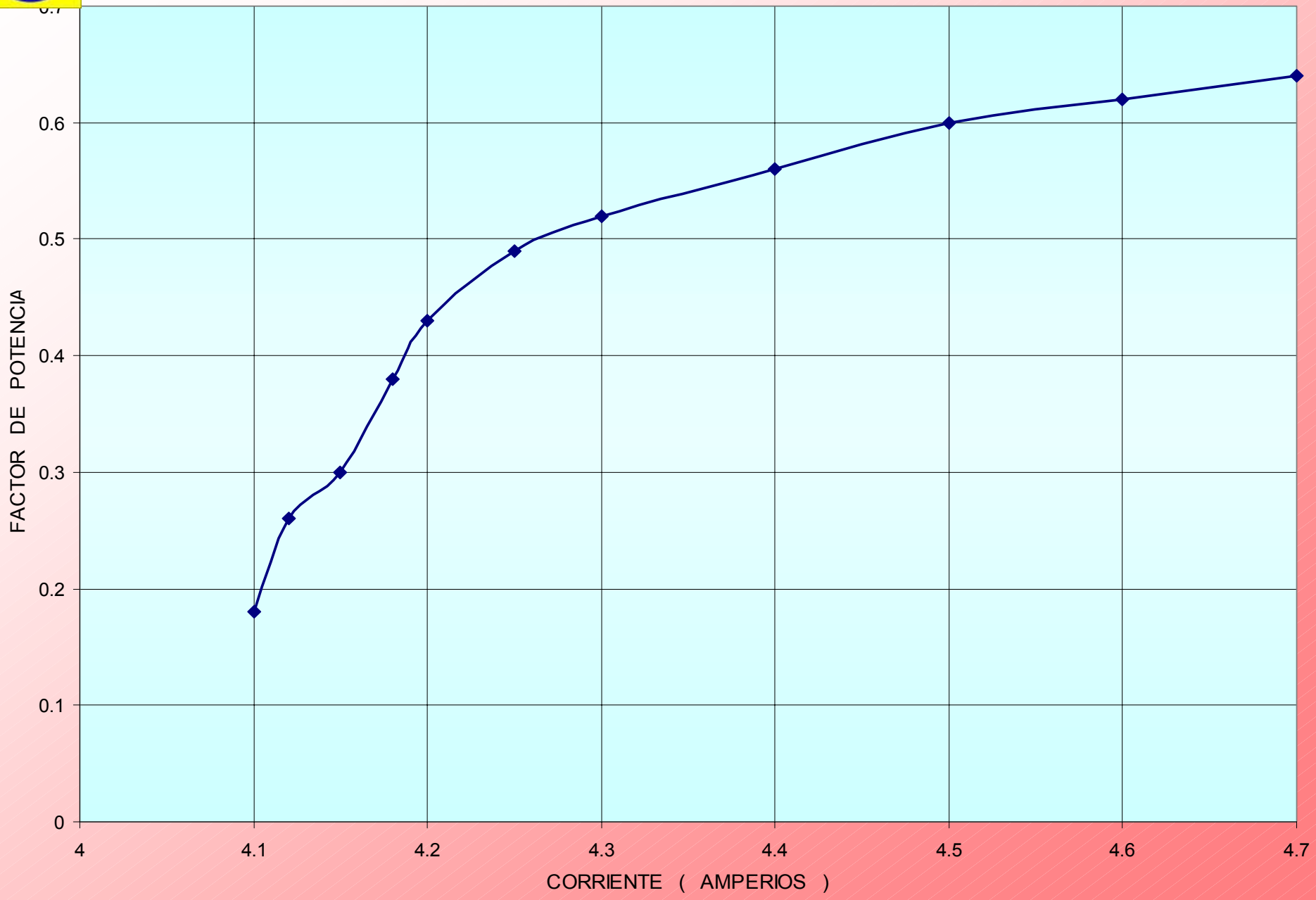
PERDIDAS TOTALES VS CORRIENTE (CON CARGA)



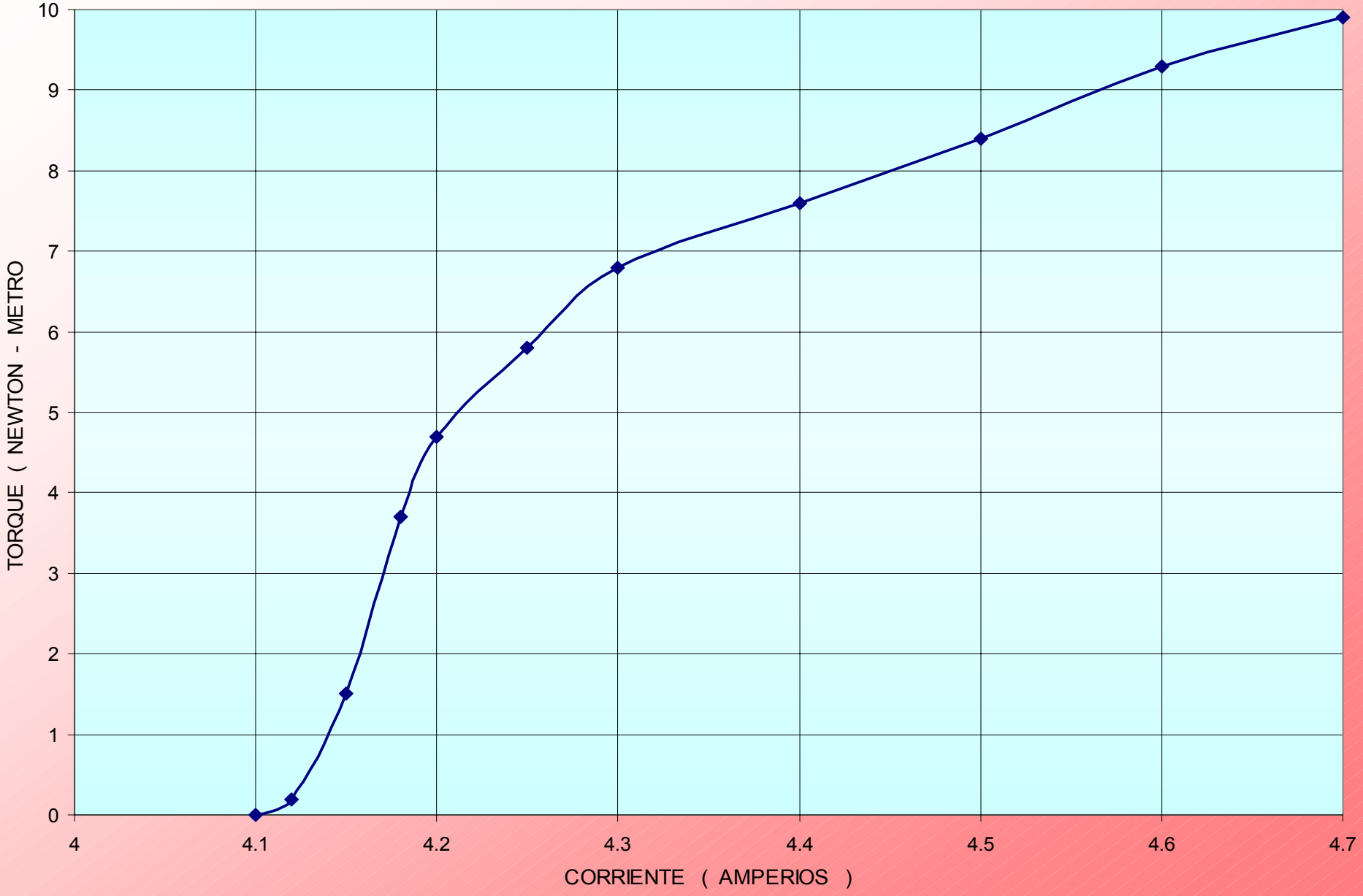
EFICIENCIA VS CORRIENTE (CON CARGA)



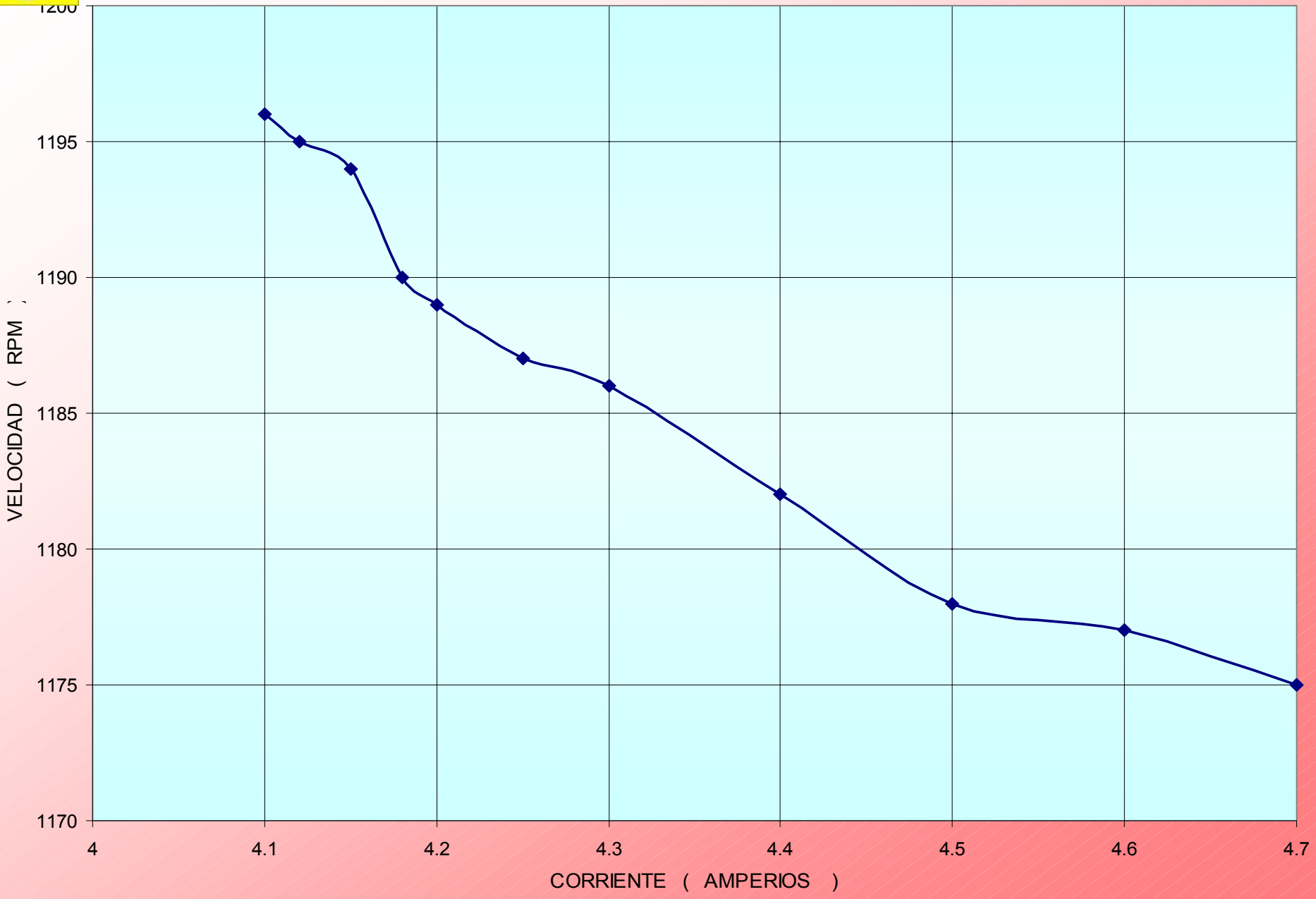
FACTOR DE POTENCIA VS CORRIENTE (CON CARGA)



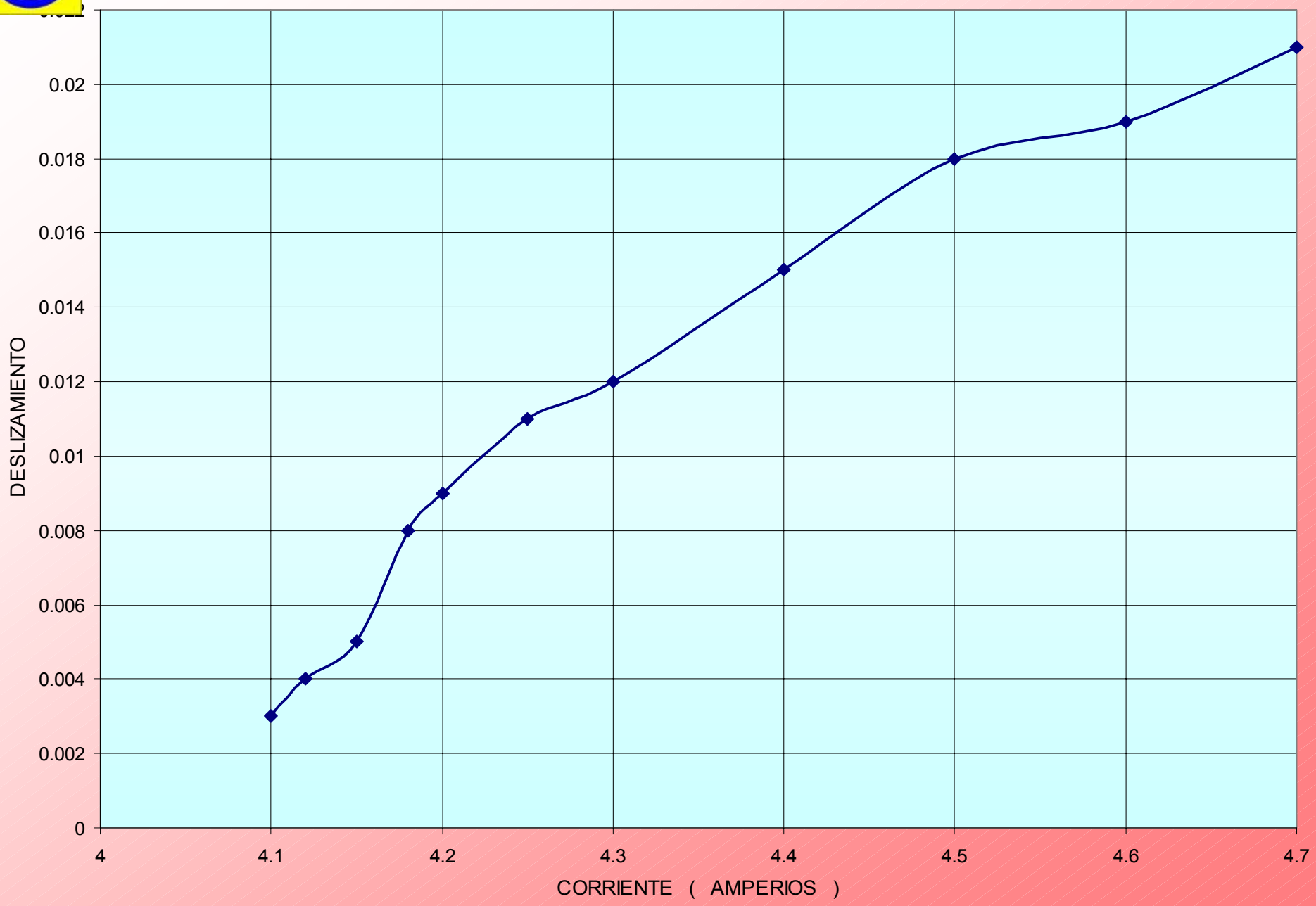
TORQUE ELECTROMAGNETICO VS CORRIENTE (CON CARGA)



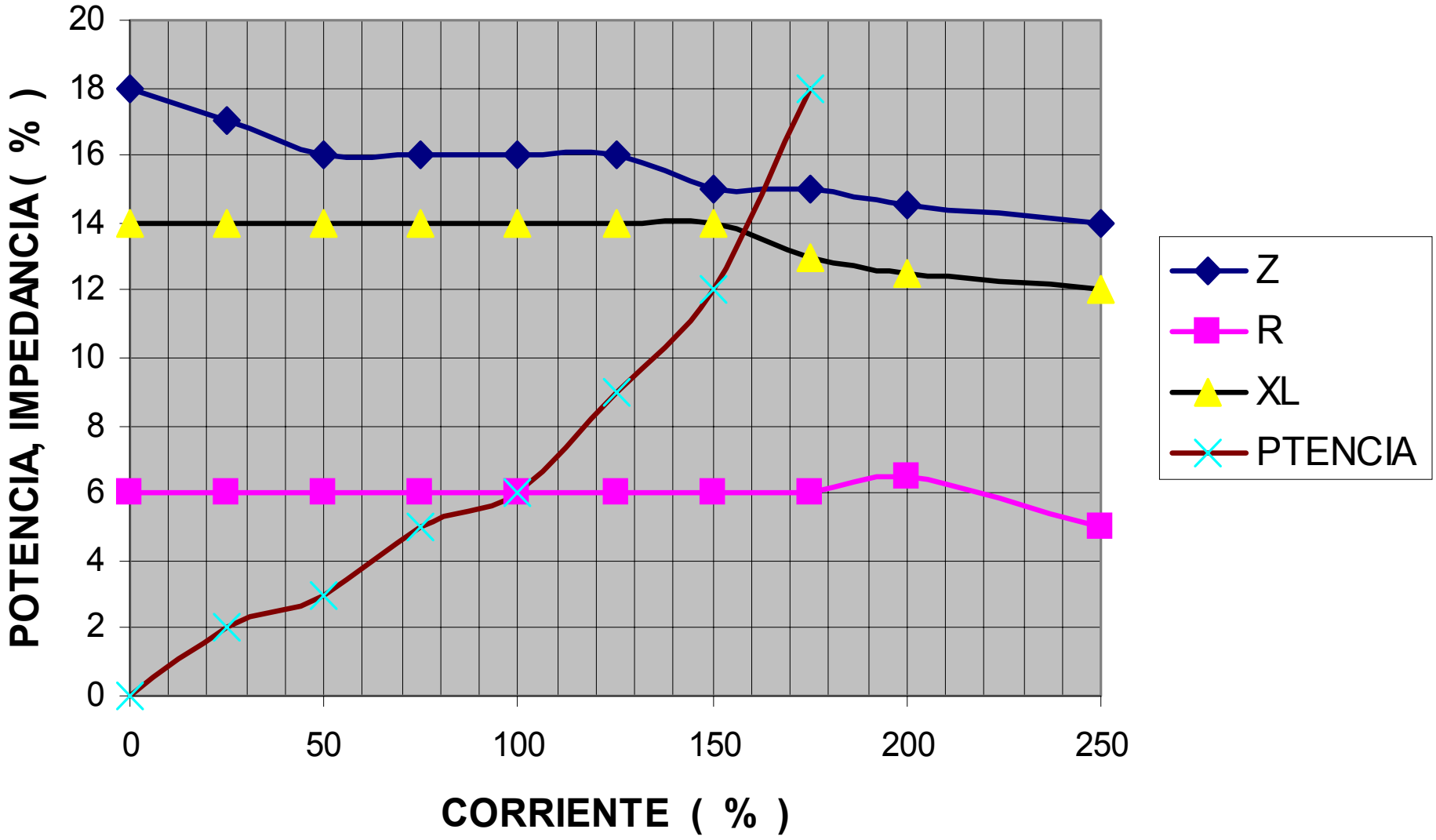
VELOCIDAD VS CORRIENTE (CON CARGA)



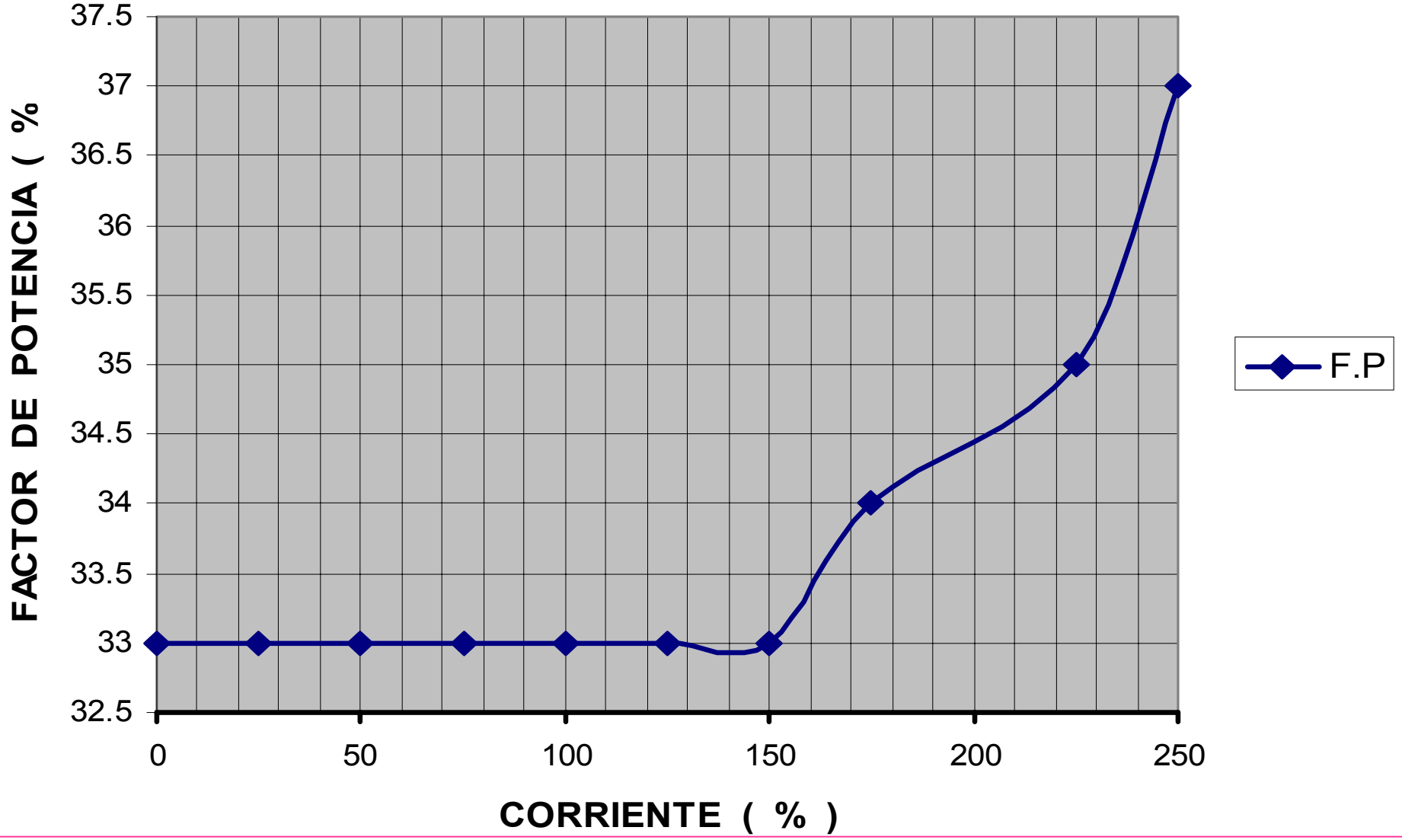
DESLIZAMIENTO VS CORRIENTE (CON CARGA)



PRUEBA DE CORTO CIRCUITO
CORRIENTE VS Zcc , XL , R



PRUEBA DE CORTO CIRCUITO CORRIENTE VS FACTOR DE POTENCIA



bibliografia

- El ABC de las máquinas - tomo II Enrique Harper.
- Máquinas Eléctricas Fitzgerald.
- Ensayo de laboratorio de máquinas eléctricas. J. Palacios Briegel.
- Instalaciones eléctricas. Giuseppe Castelfranchi.
- Separatas Ing. Huber Murillo M.