

VARIADORES DE FRECUENCIA

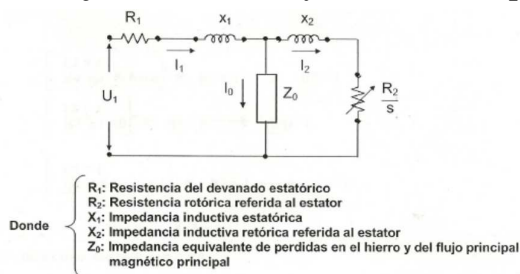
1. INTRODUCCIÓN.

Sin duda alguna los accionamientos a base de motores eléctricos son los más numerosos en la mayoría de las aplicaciones industriales, y dentro de ellos los basados en motores de corriente continua han gozado de una total hegemonía en el campo industrial durante décadas entre otras razones porque la variación de la velocidad está en función de la variación de la tensión de alimentación. No obstante es un motor con un elevado costo de mantenimiento.

En la actualidad el motor con menor nivel de exigencias en el mantenimiento son los motores trifásicos, asíncronos tipo jaula de ardilla o rotor en cortocircuito, debido a que carecen de colector, tienen una relación peso-potencia mucho menor que los de continua, y por tanto también un costo significativamente más bajo.

Cuanta además con capacidad de soportar sobrecargas y su elevado rendimiento, lo hace el motor más atractivo para la industria de hoy en día.

Oportunamente en Electrotecnia, hemos estudiado el motor asíncrono tipo jaula de ardilla y su circuito equivalente:



estator fig. 1



fig. 3

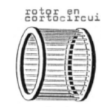


fig. 4

El Torque Electromagnético es:

$$TEM = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \frac{R_2}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_s \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]} \quad (1)$$

Siendo {
 p: numero de pares de polos
 m₁: numero de fases
 f_s: frecuencia de la tensión de alimentación U₁ (o frecuencia de sincronismo)

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

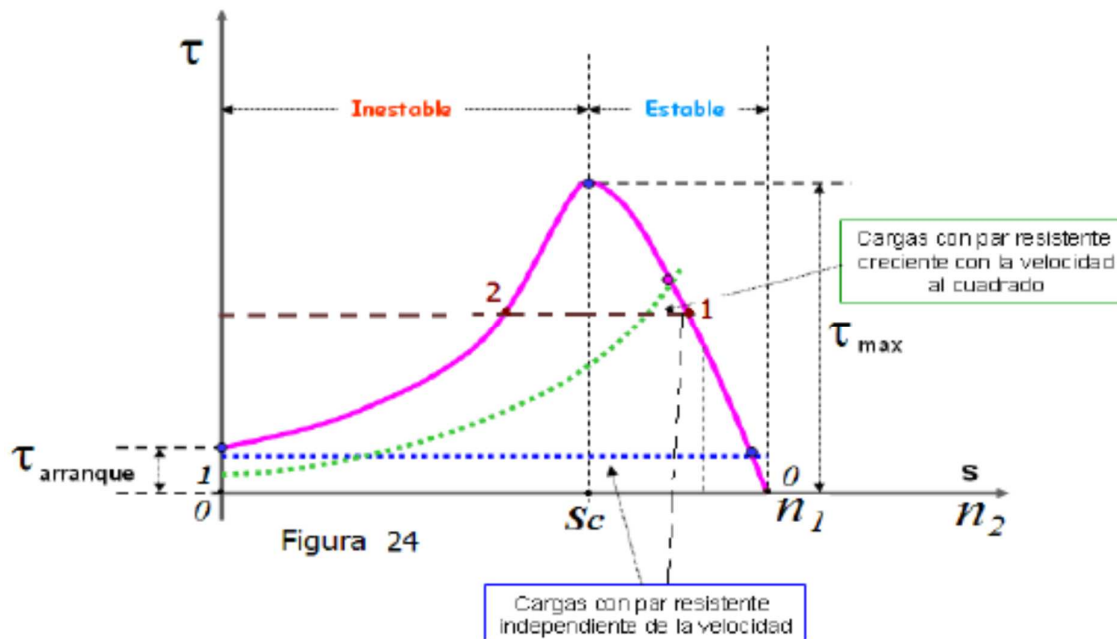


Figura 24

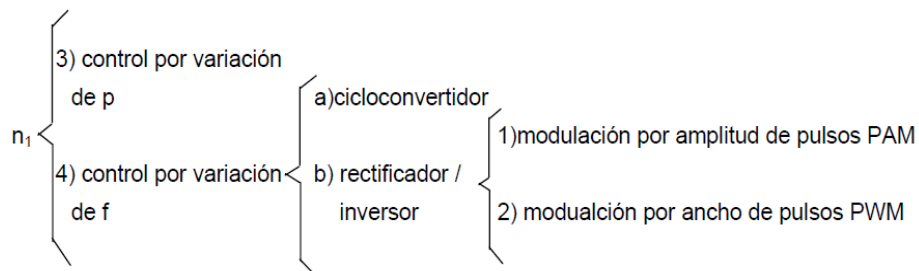
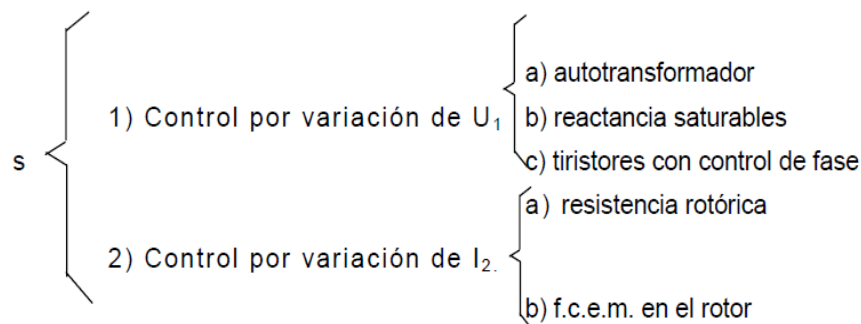
No obstante, para los motores asincrónicos una limitación **era** la no fácil variación simultánea del par y la velocidad.

Oportunamente hemos estudiado diferentes métodos para poder variar la velocidad de los motores asincrónicos:

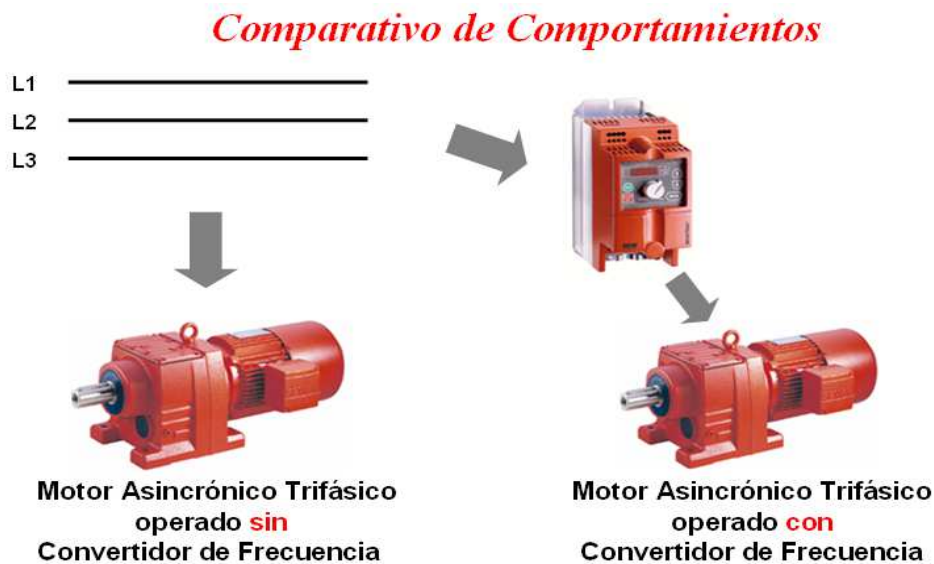
De la expresión:
$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

a.- Variando s (Resbalamiento)

b.- Variando n_1 (Frecuencia, Pares de polos)



Los dispositivos conocidos como **variadores** de frecuencia que como veremos también lo son de tensión, han cambiado drásticamente la limitación de la variación de la velocidad de motores asíncronos:



Primera Conclusión: Desde hace aproximadamente 20 años, el elevado desarrollo de la electrónica de potencia y los microprocesadores ha permitido desarrollar los variadores de velocidad para motores trifásicos, asíncronos, tipo jaula de ardilla. Han resultado confiables y de relativo bajo costo.

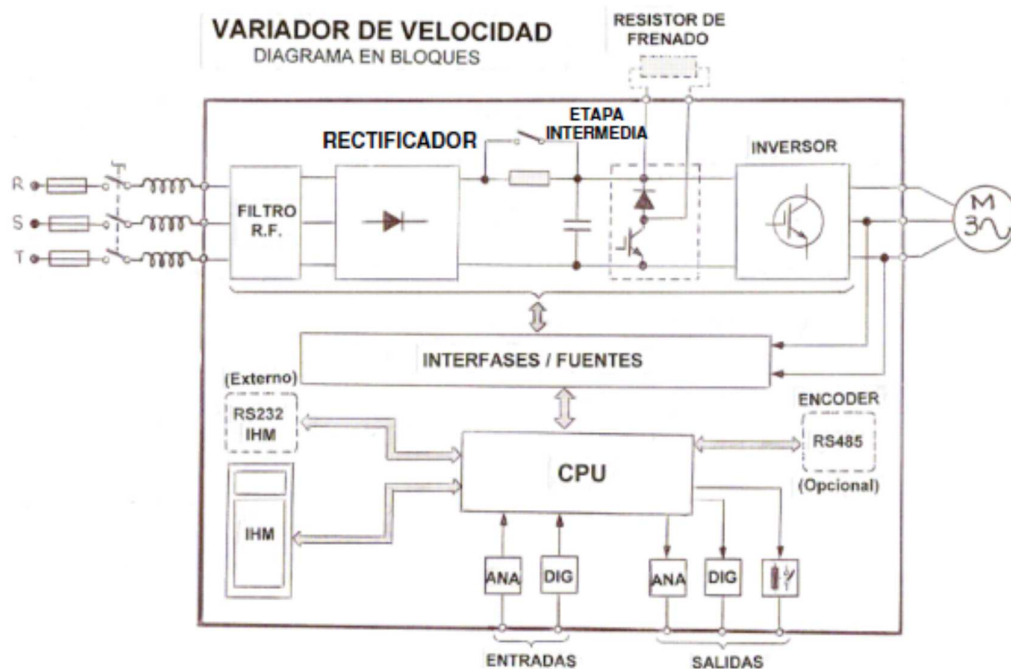
Desde el punto de vista del **control automático** constituye un elemento final de control. Esto es así cuando la variable manipulada $m(t)$ es un fluido líquido impulsado por una electrobomba, en este caso el costo de la asociación de electrobomba - variador es muy competitivo con su equivalente de válvula de control ya vista. Esta es la razón de poner nuestra atención en este dispositivo.

2. FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DE LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DE VELOCIDAD EN MOTORES.

Un regulador electrónico de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, **siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de tensión y frecuencia industrial en energía eléctrica de tensión y frecuencia variable.**

Estas variaciones se consiguen mediante tres etapas en serie:

1. Una primera etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua variable.
2. Una segunda etapa consistente en circuito intermedio de filtro.
3. Una tercera etapa inversora (u ondulator) que transforma la corriente continua en alterna



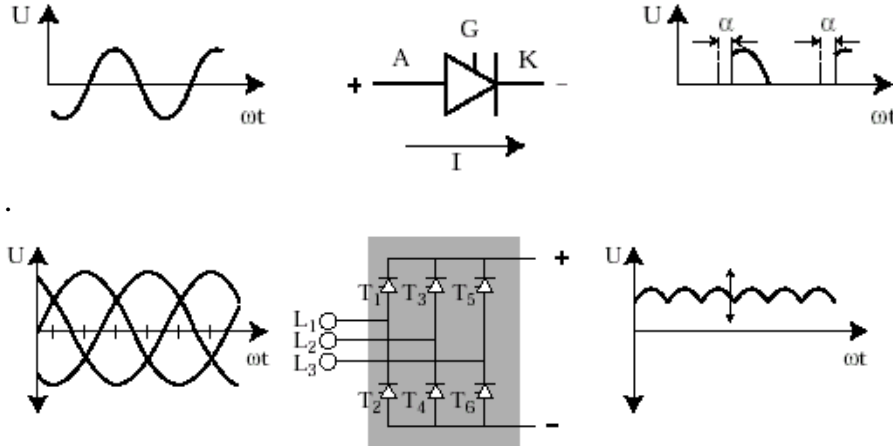
A la salida de la misma y como resultado de las tres etapas se obtiene una tensión variable que producirá mayor o menor par y una frecuencia variable que hará que el motor gire con velocidad también variable.

Los parámetros son configurados a partir de una unidad de control basada en microprocesador y que se ajustan a las necesidades de los distintos procesos como ya veremos.

A continuación una breve presentación de las etapas mencionadas:

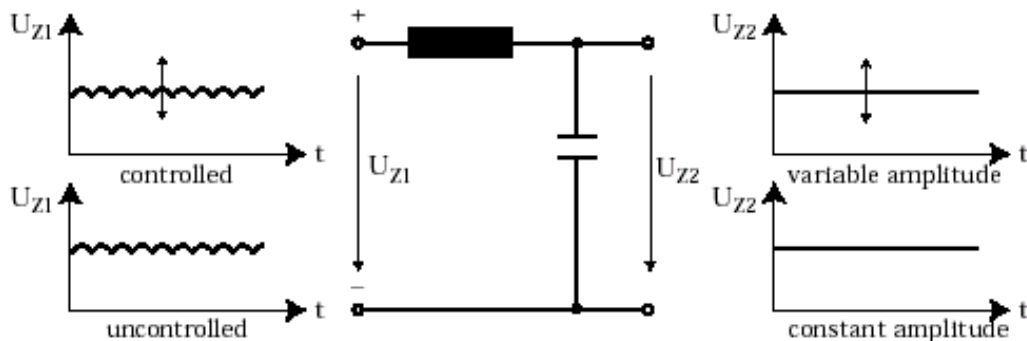
Primera etapa rectificadora:

Esta etapa puede ser un rectificador controlado (con tristores) o no controlado (con diodos) que transforma la corriente alterna en continua variable:



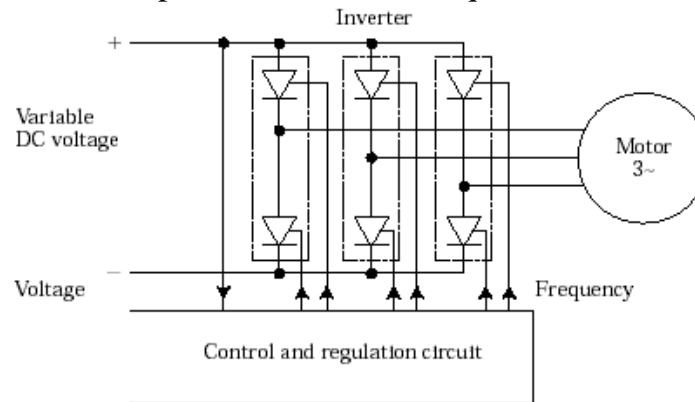
Segunda etapa: Filtro

Entre las funciones del circuito intermedio de filtro está la de desacoplar el rectificador del inversor, reducir armónicos y almacenado de energía durante pérdidas intermitentes de suministro desde el rectificador, lo que permite un filtrado adecuado. Existen varios circuitos y uno de los más comunes es el que se muestra en la Figura siguiente.



Tercera etapa: Inversor

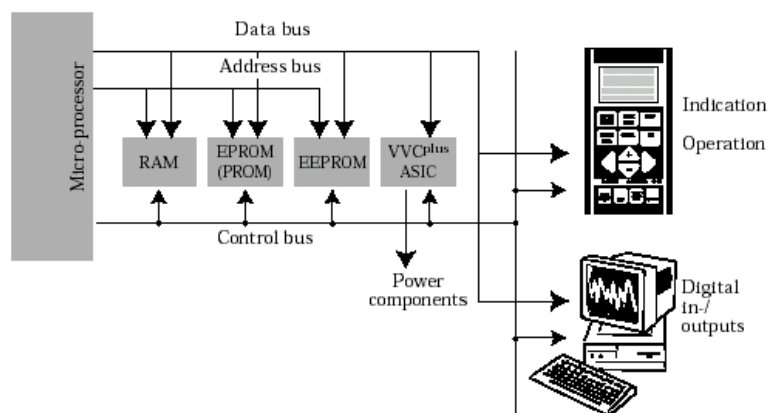
El inversor (u ondulador) que transforma la corriente continua en alterna (normalmente entre 1 a 315 Hz): es la última etapa de potencia de un variador de frecuencia y se compone básicamente de 6 elementos de conmutación independientemente del tipo de semiconductor que se use.



Circuito de control - sus funciones principales son:

- 1.- Control de la conmutación de los semiconductores de las etapas de rectificación y de inversión
- 2.- Manejo de las protecciones eléctricas del V F y del motor. (por ejemplo la protección por sobre intensidad) .
- 3.- Intercambio de datos entre el V F y otros dispositivos informáticos.
- 4.- **Incluye algoritmos de control como el P+I**

Este circuito de control está basado en un microprocesador y responde al esquema convencional mostrado en la Figura siguiente.



La corriente magnetizante y el Torque máximo:

Motor Asincrónico Trifásico operado con convertidor

- Control y variación de velocidad
- Cupla constante para todo el rango de velocidad

Como se logra ?

Con una relación constante entre voltaje y frecuencia



$$I_{\text{mag}} = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi \cdot f \cdot L} = \underbrace{\frac{1}{2\pi \cdot L}}_{\text{constante}} \times \underbrace{\frac{U}{f}}_{\text{variable}}$$

$I_{\text{magnetización}}$ debe permanecer constante y depende de la relación U/f

Asimismo, teniendo presente la expresión del Torque Máximo:

$$TEM_{\text{Max}} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_s \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2)^2} \right]}$$

Como :

$$X_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_1 ; X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_2$$

Reemplazando en la anterior:

$$TEM_{\text{Max}} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2}{4 \cdot \pi \cdot f_s \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_s)^2 (L_1 + L_2)^2} \right]} \quad \rightarrow \quad TEM_{\text{Max}} \cong K \cdot \left(\frac{U_1}{f_s} \right)^2$$

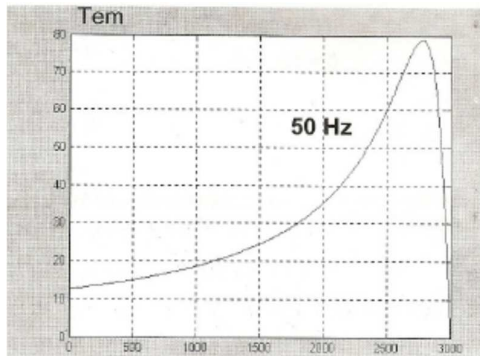
Supongamos tener un motor de 1 par de polos ($p=1$), cuando se lo alimenta con $U_1 = 380$ volts con f_{s1} de 50 Hz. La relación U_1 / f_{s1} será:

$$\frac{U_1}{f_{s1}} = 7,6$$

$$ns_1 = \frac{60}{p} \cdot fs_1 = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ rpm}$$

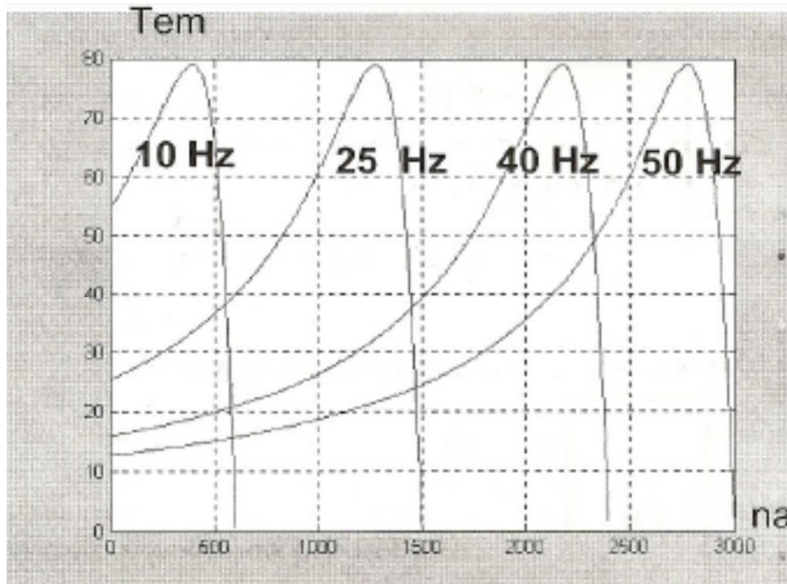
$$s = \frac{ns_1 - na}{ns_1} \rightarrow na = ns_1 (1 - s)$$

Para $\left\{ \begin{array}{l} s=0 \rightarrow n_a = n_{s1} = 3000 \text{ rpm} \\ s=1 \rightarrow n_a = 0 \text{ rpm} \end{array} \right.$

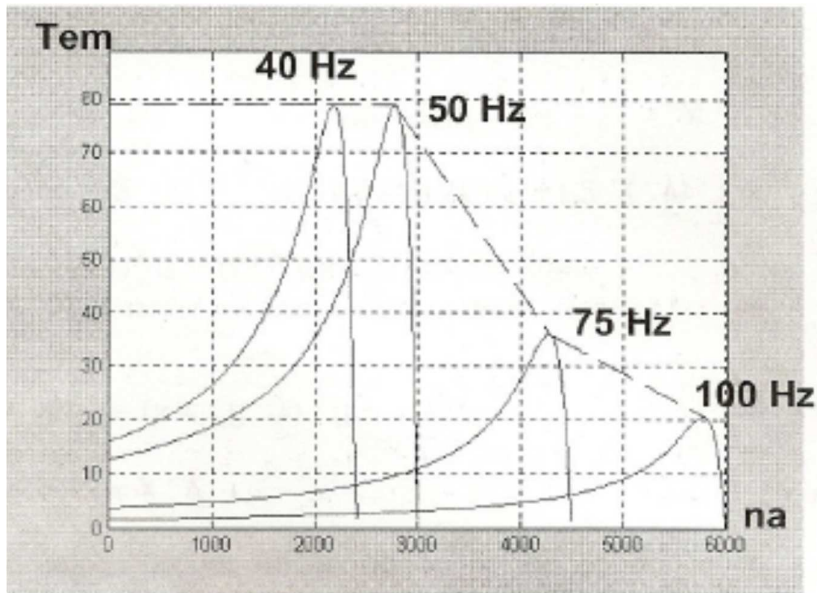


Si variamos la frecuencia manteniendo el torque electromagnético constante (relación $(V/f)^2$), podremos obtener una familia de curvas:

a.- Para frecuencias menores a 50 Hz:



b.- Para frecuencias mayores a 50 Hz:

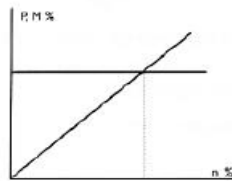


3. PROCESOS INDUSTRIALES Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Para un uso adecuado de la variación de frecuencia, la cual como dijimos se traduce en una variación de velocidad del rotor, asociada a la variación de tensión, la cual es la responsable de forzar mayor corriente a través de las espiras del estator y por lo tanto de producir mayor o menor par, es necesario conocer el proceso u equipo en el cual se va a emplear el motor.

Simplificamos este punto considerando estos tres casos principales:

PAR CONSTANTE



EN LA INDUSTRIA LA MAYOR PARTE DE LAS MÁQUINAS EMPLEADAS FUNCIONAN A PAR CTE.

EL PAR ES INDEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD

EN EL ARRANQUE EXISTE FRECUENTEMENTE UN SOBREPARE INICIAL MÁS ELEVADO QUE EL PAR NOMINAL

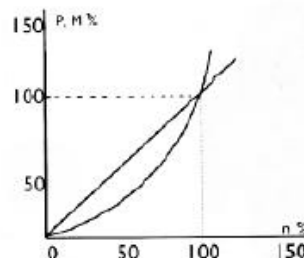


PAR CRECIENTE LINEALMENTE CON LA VELOCIDAD

EN ESTAS MÁQUINAS EL PAR VARÍA LINEALMENTE CON LA VELOCIDAD

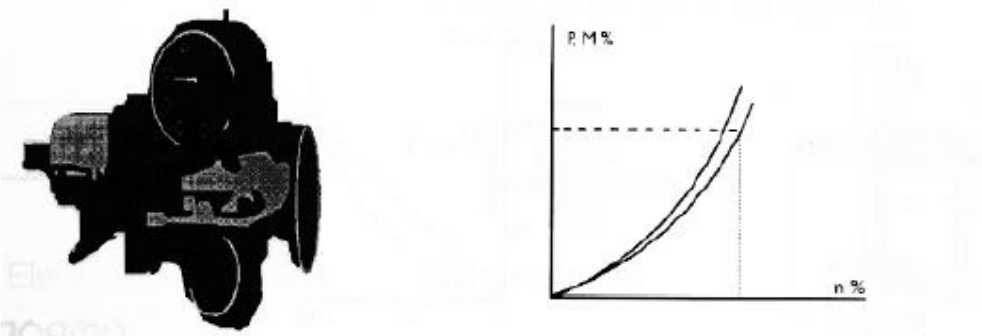
LA POTENCIA VARÍA CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD

EJEMPLOS: BOMBAS VOLUMÉTRICAS DE TORNILLO DE ARQUIMEDES Y MEZCLADORAS



PAR CRECIENTE CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD

- EN ESTAS MÁQUINAS EL PAR VARIA CON EL CUADRADO DE LA VELOCIDAD
- LA POTENCIA LO HACE CON EL CUBO DE LA VELOCIDAD
- ES EL CASO DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS Y LOS VENTILADORES



Profesor Adjunto: Ing. María Susana Bernasconi
JTP: Ing. Fernando Geli