

# ***VARIACIÓN DE VELOCIDAD EN CORRIENTE ALTERNA***

Agradecemos a los Sres. Luis Mazzeo y Fernando Bertolotti, alumnos de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires por habernos permitido utilizar su trabajo final de Ingeniería Electricista referido a aplicación de variadores de velocidad como base para la confección de este apunte

## 1. LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

### 1.1. Definición

Las *máquinas eléctricas* transforman la energía mecánica en eléctrica o viceversa, mediante el acoplamiento inductivo de dos circuitos eléctricos a través de un campo magnético. Según el tipo de conversión de energía que realizan se clasifican en:

- *Transformadores*: transforman energía eléctrica en energía eléctrica
- *Motores*: transforman energía mecánica en energía eléctrica.
- *Generadores*: transforman energía mecánica en eléctrica

Los motores y generadores se denominan *máquinas eléctricas rotativas*, pues constan de una parte fija (*estator*) y una parte móvil (*rotor*) a la cual se acopla el eje de rotación. Además, puesto que el acoplamiento entre las partes se produce a través del campo magnético, siempre hay una parte de la máquina en la que se produce un campo a través de la alimentación eléctrica (*inductor*) y otra en la que se utiliza ese campo para producir el efecto deseado (*inducido*).

Existen diferentes tipos de máquinas rotativas según el tipo de tensión eléctrica aplicada y obtenida y el principio de funcionamiento. Los tipos principales son:

- Máquina de CC (CC en estator y rotor)
- Máquinas sincrónicas (CC en rotor y CA trifásica en estator)
- Máquinas asincrónicas (CA polifásica en rotor y estator)
- Máquinas monofásicas (CA monofásica en estator y variable en rotor).

### 1.2. Potencia

En una máquina eléctrica siempre hay dos tipos de potencia involucradas: eléctrica y mecánica.

La potencia eléctrica (*Pelec*) se expresa como:

$$P_{elec} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Para circuitos monofásicos

$$P_{elec} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Para circuitos trifásicos

y se mide en watt [w] o kilowatt [kw].

La potencia mecánica (*Pmec*) depende del par y la velocidad y suele expresarse para el caso de un eje giratorio, de la siguiente forma:

## 1.

## LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

$$P_{mec} = T \times \Omega$$

Donde:

$T$ : es el par mecánico en el eje, que se mide en N.m (Newton . metro)

$\Omega$ : es la velocidad angular en radianes por segundo.

De acuerdo a esta fórmula la  $P_{mec}$  resulta en watt. Sin embargo, es frecuente en la práctica encontrar otras unidades, tales como HP (Horse Power) o CV (Caballo Vapor):

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W}$$

$$1 \text{ CV} = 735 \text{ W}$$

Es común que para el caso de motores la selección se haga en estas unidades.

Es frecuente expresar la velocidad en r.p.m. (revoluciones por minuto) en cuyo caso se la denomina con la letra  $n$ : La relación entre la velocidad en radianes y la velocidad en r.p.m. está dada por la fórmula:

$$\Omega = n \cdot \frac{2\pi}{60}$$

En toda máquina eléctrica existen pérdidas de distinto tipo entre ellas:

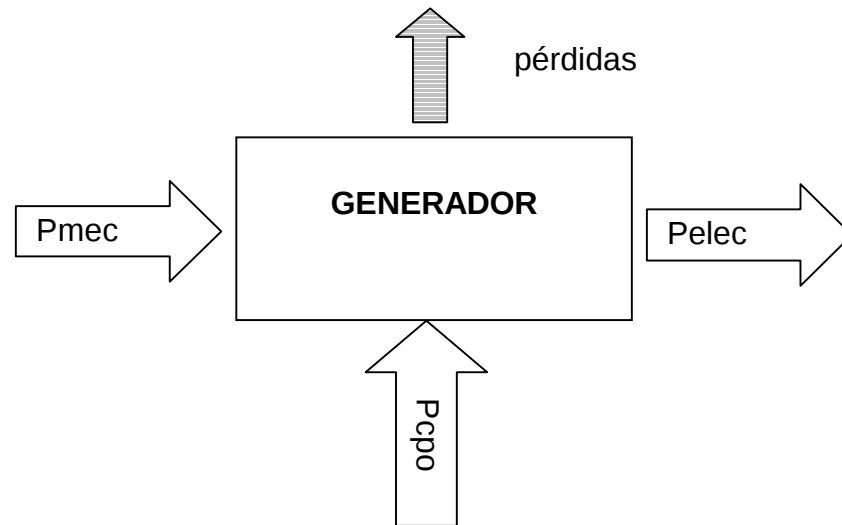
| Tipo       | pérdida              | Lugar                              |
|------------|----------------------|------------------------------------|
| Eléctricas | Efecto Joule         | Bobinados                          |
| Magnéticas | Histéresis           | Núcleos magnéticos                 |
|            | Corrientes parásitas | Materiales magnéticos no laminados |
| Mecánicas  | Fricción             | Acoplamientos mecánicos            |
|            | Ventilación          | Partes rotantes                    |

Estas pérdidas hacen que la potencia obtenida sea menor que la potencia entregada, resultando el rendimiento que se obtiene como el cociente entre lo que se obtiene respecto a lo que se entrega para obtenerlo:

$$\eta = \frac{\text{Potencia obtenida}}{\text{Potencia entregada}}$$

### 1.3. Los generadores eléctricos

Un generador se alimenta con energía mecánica a fin de obtener energía eléctrica. Hay que suministrarle también una pequeña cantidad de energía eléctrica ( $P_{cpo}$ ) para que pueda generar el flujo magnético que luego producirá inducción de f.e.m. (fuerza electromotriz).



**Figura 1-Flujo de potencia en un generador**

El rendimiento resultará en este caso:

$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{mec}}$$

El par mecánico que hace funcionar al generador puede provenir de distintas fuentes, (turbina hidráulica, turbina de gas, ciclo térmico, nuclear). Para pequeñas aplicaciones se puede hacer mover el eje mediante un motor (de CC, Diesel, etc.).

La “carga” en el caso del generador, será la carga eléctrica conectada a la red que es alimentada por el generador.

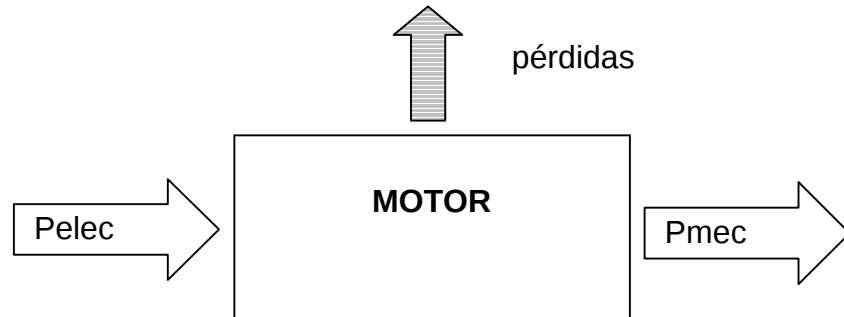
Los generadores eléctricos más comunes son los de CC y los de CA trifásica (sincrónicos). Las *centrales eléctricas* utilizan cierta cantidad de generadores sincrónicos para suministrar energía eléctrica a la red pública.

## 1.4. Los motores eléctricos

### 1.4.1. Descripción General

Un motor tiene como función suministrar energía de rotación (en forma de cupla mecánica) a una carga mecánica que debe moverse.

Para poder generar el par, el motor debe ser alimentado ( $P_{elec}$ ) desde la red de energía eléctrica:



**Figura 2- Flujo de potencia en un motor**

En este caso el rendimiento resulta:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elec}}$$

### 1.4.2. Tipos de motores

Los tipos de motores más frecuentes en aplicaciones industriales son:

- El motor de Corriente Continua
- El motor asincrónico trifásico (MAT)

El motor de corriente continua es un motor ampliamente utilizado, en particular para aplicaciones en las cuales se requiere variar la velocidad. Actualmente, debido a la existencia de los variadores de velocidad para MAT, está siendo reemplazado en muchas aplicaciones. Sin embargo, sigue utilizándose en tracción, laminado, conformado de metales, textiles, papeleras, y cualquier otro tipo de aplicación que requiera de un posicionamiento preciso. Es un motor que requiere un frecuente mantenimiento.

Se compone de un estator de polos salientes y un rotor liso. El bobinado del estator (inductor) se alimenta con CC para obtener un campo magnético principal. El rotor se alimenta también con CC originando otro campo magnético. Puesto que el rotor gira, no es posible realizar esta conexión en forma directa y debe utilizarse un anillo conductor (anillos rozantes) sobre el que hacen contacto dos pequeñas piezas conductoras (escobillas). A todo

el sistema de lo denomina colector. Los campos magnéticos generados tienden a alinearse, buscando la configuración de mínima energía y generando entonces un par mecánico. Para aumentar este par se colocan en el rotor varias bobinas distribuidas a lo largo de la periferia (bobinado). Al quedar las escobillas fijas la posición del campo del rotor no varía por lo que el par generado mantiene su valor. El estator es el que provoca el flujo magnético que hace funcionar al motor, por lo que se lo denomina inductor, excitación o campo. En cambio en el rotor se inducen tensiones, por lo que se lo denomina inducido o armadura.

El motor asíncrono trifásico será descrito en detalle en otro capítulo

También se utilizan para potencias bajas motores monofásicos o bifásicos. Su descripción esta fuera del alcance de este curso.

### 1.4.3. Curvas características de un motor

Para caracterizar completamente el comportamiento de un motor es necesario conocer como se comporta este tanto respecto a la red eléctrica como respecto a la carga (mecánica) que mueve en la medida en que varía su velocidad. Este comportamiento se describe mediante dos curvas características: curva de corriente absorbida en función de la velocidad (curva  $I/n$ ) y curva de par entregado en función de la velocidad (curva  $T/n$ ). La forma de estas curvas depende del tipo de motor y de los parámetros de diseño de cada motor en particular.

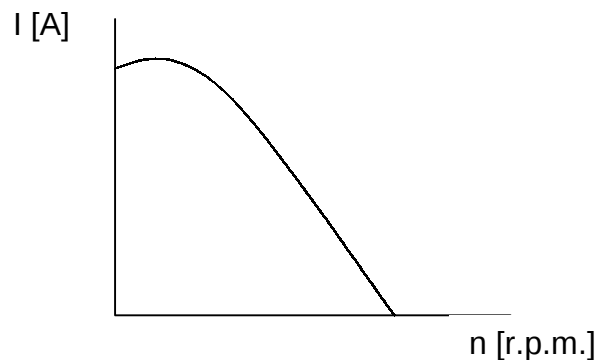


Figura 3- Curva típica  $I/n$  para un MAT

La corriente absorbida por el motor da la medida de la potencia que el motor absorbe de la red. La corriente absorbida es mayor para bajas velocidades, en particular es muy alta en el arranque. Los picos de corriente pueden producir caídas de tensión y otros efectos en usuarios conectados a la misma red eléctrica por lo que es de fundamental importancia tenerlos en cuenta. Además, la corriente es el parámetro de diseño de muchos de los elementos de la instalación eléctrica, tales como cables, protecciones, etc. Por lo tanto, es importante asegurar que los valores normales de corriente no superen los límites establecidos.

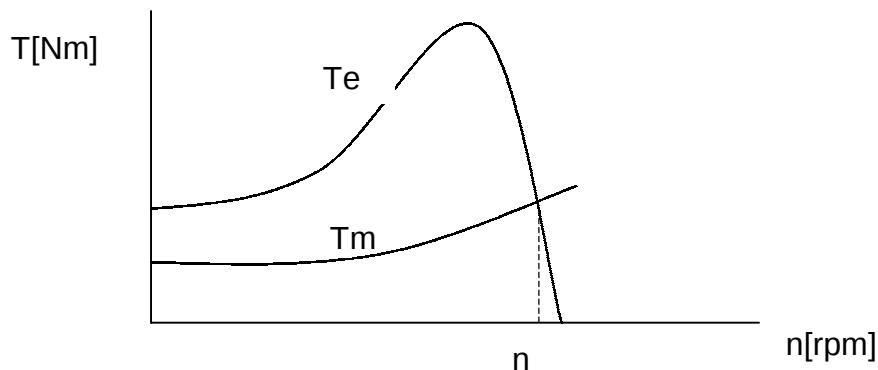
La característica par – velocidad es la que determina a que velocidad va a estar funcionando el motor, al acoplarse cierta carga mecánica.

#### 1.4.4. Determinación de la velocidad de funcionamiento

El par generado eléctricamente ( $T_e$ ) debe ser utilizado para vencer el par requerido por la carga a determinada velocidad ( $T_m$ ) y acelerar la carga de momento de inercia  $I$ . Despreciando las pérdidas, la ecuación mecánica resulta:

$$T_e - T_m = I \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

La velocidad de régimen  $n$  resultará cuando no haya aceleración, por lo que resulta  $T_e = T_m$ . El punto de funcionamiento en régimen puede obtenerse de la intersección de las curvas correspondientes.



**Figura 4- Obtención de la velocidad de régimen (n)**

Comparando  $T_e$  y  $T_m$ , obtenemos las siguientes conclusiones:

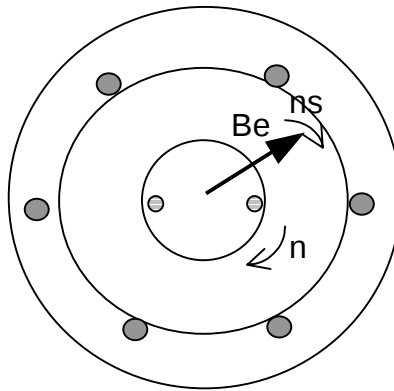
- Si  $T_e > T_m$  la aceleración es positiva aumentando entonces la velocidad. A mayor diferencia entre las curvas, mayor será la aceleración por lo que el motor aumentará más rápido su velocidad. El motor acelera hasta alcanzar su velocidad de régimen ( $n$ )
- Si  $T_e < T_m$  la aceleración será negativa, el motor tenderá a bajar su velocidad.
- Si cuando la velocidad es nula o sea en el arranque, el  $T_e < T_m$  el motor no podrá arrancar pues su velocidad no aumenta.

## 2. EL MOTOR ASINCRONICO TRIFASICO

### 2.1. Principio de funcionamiento

El motor asincrónico trifásico consta de un estator bobinado de dos o más polos por fase y de un rotor constituido por chapas de hierro silicio, que puede tener un bobinado (rotor bobinado) o puede tener barras longitudinales unidas entre sí (jaula de ardilla). En este último caso el motor tiene el rotor en cortocircuito.

Cuando se conectan a una red trifásica balanceada (de frecuencia  $f_1$ ) tres bobinas desplazadas  $120^\circ$  mecánicos entre sí (distribuidas en el estator), se genera un campo magnético ( $B_e$ ) de amplitud constante pero que gira a una velocidad  $n_s$  denominada de sincronismo.



**Figura 5-Obtención de un campo giratorio**

El valor de la velocidad sincrónica es:

$$n_s = \frac{60 f_1}{p} \left[ \frac{\text{rev.}}{\text{min}} \right]$$

Donde:

$p$  es el número de pares de polos por fase del arrollamiento( se repite  $p$  veces la distribución de bobinas del estator).

Si en el rotor hay una espira, el campo magnético rotativo concatenado por dicha espira es variable (pues cambia su dirección al girar el campo), induciéndose una f.e.m.. En el caso del rotor en jaula de ardilla, por tratarse de bobinas de muy baja resistencia óhmica (barras metálicas de cobre, bronce o aleaciones similares) y de reactancia inductiva variable, se generará una corriente eléctrica importante. Esta corriente, en acción conjunta con el campo magnético rotativo, creará cuplas distribuidas a lo largo de cada barra haciendo que el rotor gire en el mismo sentido que el campo giratorio ( $B_e$ ), con una velocidad  $n$ . La velocidad de giro del rotor nunca puede alcanzar a la de giro del campo pues en ese caso no habría

## 2.

## EL MOTOR ASINCRONICO TRIFASICO

variación del flujo concatenado por el bobinado del rotor y por lo tanto no habría f.e.m., ni corriente en el rotor. En condiciones nominales de carga el motor gira a una velocidad  $n < n_s$ . Esta diferencia, expresada en relación a la velocidad de sincronismo, se denomina deslizamiento o resbalamiento  $s$ .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

de donde:

$$n = (1 - s) \cdot n_s$$

La frecuencia de las tensiones inducidas en las barras del rotor ( $f_2$ ) vendrá dada por:

$$f_2 = (n_s - n_r) \frac{p}{60} = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \frac{n_s p}{60} = s f_s$$

### 2.2. Característica cupla-velocidad

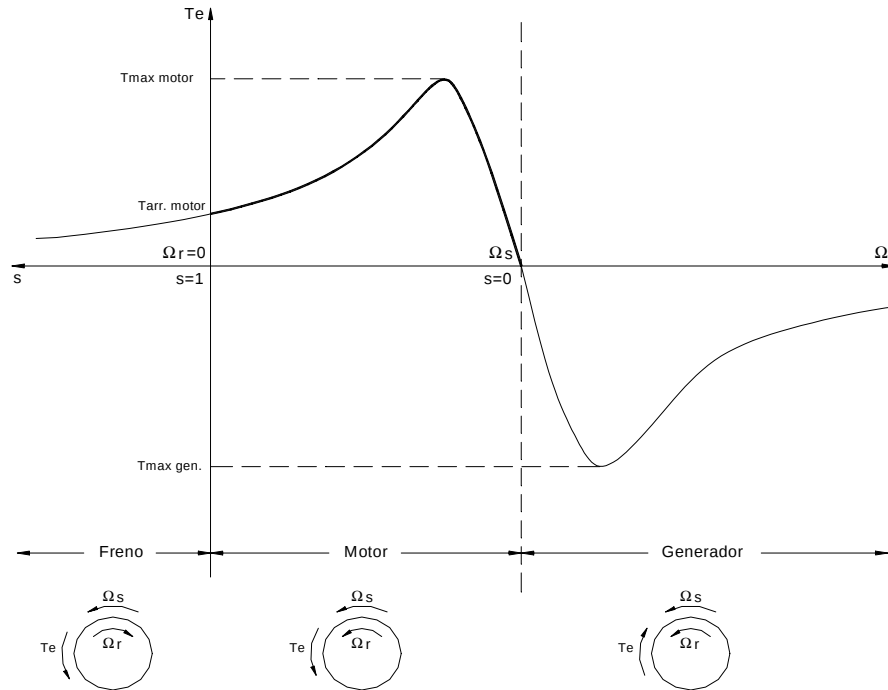
Si se asume que el flujo magnético en el entrehierro es constante, la f.e.m. inducida en el rotor será proporcional al deslizamiento. Cuando el motor gira a una velocidad cercana a la de sincronismo,  $f_2$  es muy baja y la reactancia de las barras es pequeña frente a su resistencia óhmica. En este caso resulta una característica cupla velocidad similar a la de un motor de corriente continua con excitación independiente, esto es una variación lineal de la cupla en función de la velocidad.

Cuando el deslizamiento aumenta, también lo hace la reactancia de las barras y por ende la corriente en ellas comienza a sufrir un desfase respecto a la f.e.m. y una disminución de amplitud como consecuencia del aumento de impedancia. Este fenómeno reduce la cupla neta en el eje del motor dando como resultado una curva característica cupla-velocidad tal como se muestra en la figura 6. Siendo:

$\Omega_s$  : velocidad de sincronismo (en rad. geométricos/s)

$\Omega_r$  : velocidad del rotor

$T_e$  : cupla electromagnética



**Figura 6- Característica cupla-velocidad de un motor de inducción a tensión y frecuencia constante.**

siendo:

$\Omega_s$  : velocidad de sincronismo

$\Omega_r$  : velocidad del rotor

$T_e$  : cupla electromagnética

Un análisis más profundo del funcionamiento del motor de inducción permite demostrar que la misma máquina es capaz de generar energía eléctrica a frecuencia  $f_1$  si se la impulsa a una velocidad superior a la de sincronismo. Esta característica es la que se usa en el frenado regenerativo de grandes masas tales como motores de tracción ferroviaria.

### 2.3. Circuito equivalente

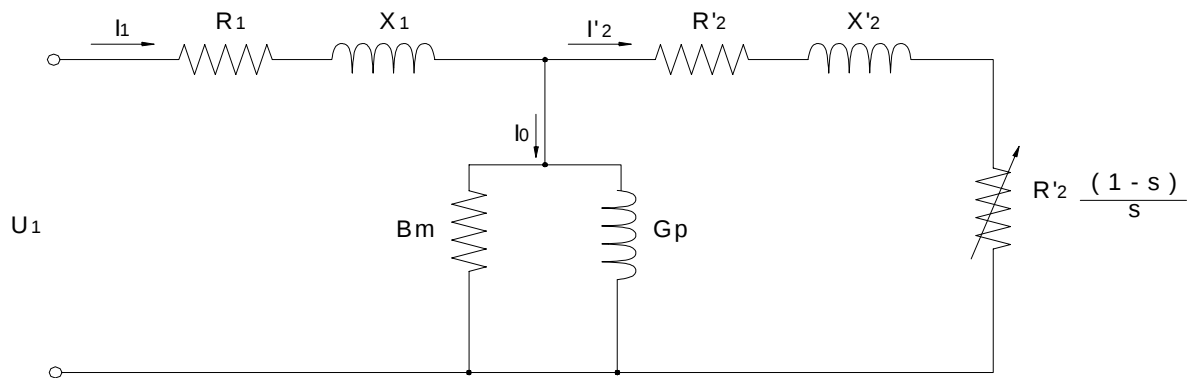
El circuito equivalente de un motor de inducción es muy similar al de un transformador pues su principio de funcionamiento también lo es: el motor puede asimilarse a un transformador con un arrollamiento secundario rotativo.

El arrollamiento primario crea dos flujos, uno que se cierra a través del rotor (flujo concatenado) y otro (de dispersión) que sólo se cierra en el estator. El efecto de este último se puede representar en un circuito equivalente como si fuese una inductancia, o una (reactancia inductiva  $X_1$ ). La resistencia óhmica de cada fase del devanado primario la representamos por  $R_1$ . El flujo concatenado entre el estator y el rotor produce una f.e.m., y

## 2.

## EL MOTOR ASINCRONICO TRIFASICO

por ende una corriente rotórica, que generara a su vez una fuerza magneto-motriz que, al igual que en un transformador, hará incrementar la corriente del arrollamiento estatórico (para mantener el flujo concatenado). Esta similitud con el transformador hace que el modelo equivalente del circuito secundario sea análogo, salvo que en el motor el arrollamiento secundario está en cortocircuito y la frecuencia de operación es distinta a la del estator.



**Figura 7- Circuito equivalente por fase de un motor de inducción**

Donde:

$U_1$  : tensión de fase de alimentación del arrollamiento estatórico.

$R_1$  : resistencia del arrollamiento primario.

$L_1$  : inductancia del arrollamiento primario.

$X_1$  : reactancia inductiva del arrollamiento primario.

$G_p$  : Conductancia representativa de las pérdidas en el hierro.

$B_m$  : Susceptancia representativa de la magnetización en el hierro.

$R'_2$  : Resistencia del arrollamiento secundario referida al primario.

$L'_2$  : Inductancia del arrollamiento secundario referida al primario.

$X'_2$  : Reactancia inductiva del arrollamiento secundario referida al primario.

$I_1$  : Corriente estatórica.

$I'_2$  : Corriente rotórica referida al estator.

$I_0$  : Corriente de vacío del motor.

$R'_2 (1-s)/s$  : Resistencia equivalente a la carga mecánica.

### 2.4. Cupla, potencia y rendimiento

Del circuito equivalente se puede obtener la potencia que se transfiere de estator a rotor a través del entrehierro (potencia de campo) está dada por:

$$P_c = 3 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$$

Las pérdidas rotóricas están dadas por:

$$P_{cu2} = 3 I_2'^2 R_2'$$

La potencia electromecánica transferida al eje del motor resulta:

$$P_{em} = 3 I_2'^2 R_2' \frac{(1-s)}{s}$$

Además se sabe que la potencia de salida es función de la cupla y la velocidad angular del rotor ( $\Omega_r$ ):

$$P_{em} = T_e \times \Omega_r$$

Por lo tanto, la cupla electromagnética será:

$$T_e = \frac{P_{em}}{\Omega_r}$$

Reemplazando ,resulta:

$$T_e = 3 \frac{I_2'^2}{\Omega_r} R_2' \frac{(1-s)}{s}$$

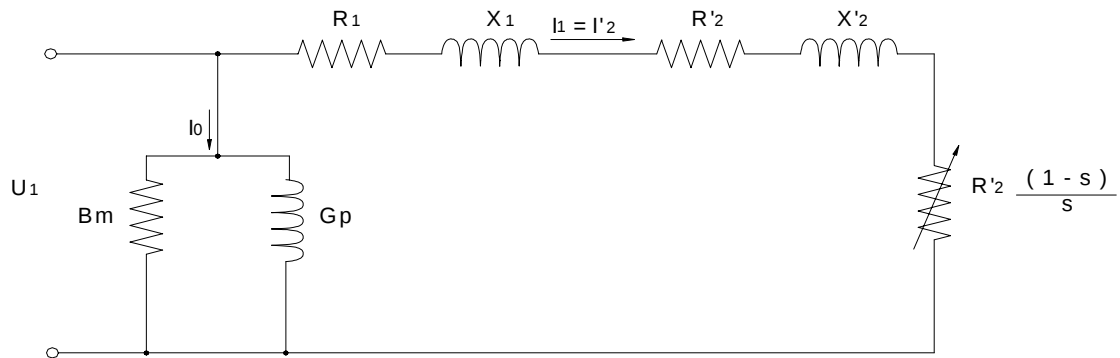
Pero de la expresión para velocidades angulares es:

$$\Omega_r = \Omega_s(1-s)$$

Reemplazando tenemos:

$$T_e = 3 \frac{I_2'^2}{\Omega_s} \frac{R_2'}{s}$$

Si se desprecia la componente de caída de tensión primaria producida por la corriente  $I_0$  , se obtiene un circuito simplificado:



**Figura 8- Circuito equivalente simplificado**

Del mismo obtenemos:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

La expresión final de la cupla electromagnética resulta:

$$T_e = \frac{3 \frac{R_2'}{s}}{\Omega_s} \frac{U_1^2}{\left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2\right]}$$

A partir de esta última expresión podemos graficar **Te = f (s)** o **Te = f (Ωr)**.

La cupla de arranque se obtiene para **s=1**:

$$T_{arr} = \frac{3 R_2'}{\Omega_s} \frac{U_1^2}{\left[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2\right]}$$

Derivando respecto a **s** e igualando a cero, encontraremos el resbalamiento para el cual la cupla motora es máxima:

$$s_{max} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

El signo “+” corresponde a motor y el signo “-” a generador.

Para motor resulta:

$$T_{max\ motor} = \frac{3 U_1^2}{2 \Omega_s \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}$$

Esta fórmula se puede reducir aún más teniendo en cuenta que bajo condiciones normales de operación  $(X_1 + X_2') \gg R_1$ :

$$T_{max\ motor} \cong \frac{3 U_1^2}{8 \pi^2 f_1^2 (L_1 + L_2')} \times p$$

De esta ecuación, se puede ver que para un motor dado (esto es  $L_1$ ,  $L_2$  y  $p$  fijos) la **Tmax** sólo depende de la relación entre la tensión y la frecuencia de alimentación, es decir  $U_1/f_1$ . Si se varían la tensión y frecuencia de manera de mantener constante esta relación, no habrá variaciones del valor máximo de cupla.

Haciendo el cociente entre la potencia útil entregada al eje del motor y la potencia activa total disipada en el rotor, se obtiene el rendimiento  $\eta$ :

$$P_{Util} = 3 I_2'^2 R_2' \frac{(1-s)}{s}$$

$$P_{Total} = 3 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}$$

$$\eta = \frac{P_{Util}}{P_{Total}} = 1 - s$$

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

#### 3.1. Aplicación de la variación de velocidad

La velocidad variable es una necesidad en todos los sectores de la industria, pues permite el control de la producción de un proceso o de un sistema con el gasto mínimo de energía y de materia prima. También es útil en aplicaciones de domótica, tales como el control de calderas, ventilación y aire acondicionado.

Hasta hace algunos años, cuando se necesitaba variar velocidad de accionamientos, se recurría a sistemas mecánicos o a motores de corriente continua. Los avances de la electrónica y su abaratamiento fueron desplazando los sistemas mecánicos, por el costo de su mantenimiento, en favor del motor de corriente continua controlado electrónicamente. Sin embargo este tipo de motor requiere mantenimiento periódico, como el cambio de escobillas y rectificación de colector, que insume costo y tiempo afectando fuertemente los procesos industriales continuos tales como petroquímicas, siderúrgicas, etc.

Sin duda el motor más barato y confiable de la industria es el motor de inducción. Al acoplársele un sistema electrónico de control de velocidad, se obtienen las mismas prestaciones de un motor de corriente continua, esto es, control de cupla de arranque, velocidad, aceleración y posibilidad de realizar frenado regenerativo. Las enormes ventajas del motor de inducción con rotor en cortocircuito sumadas a la confiabilidad del controlador electrónico asociado hicieron que los costos de utilización fueran reduciéndose, resultando, en la actualidad, competitivos.

#### 3.2. Descripción de las técnicas utilizadas

Recordemos que la velocidad del motor se puede obtener de la expresión:

$$n = n_s \cdot (1 - s)$$

Por lo tanto para variar la velocidad se puede proceder de dos formas :

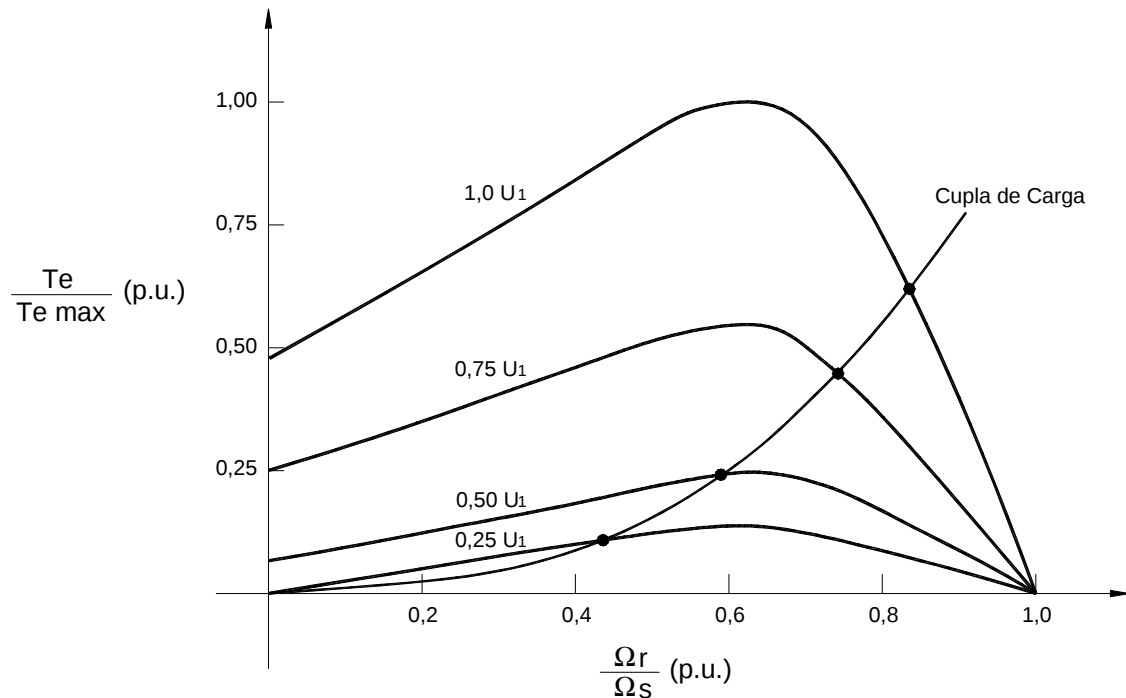
- Cambiar la curva de par- velocidad a fin de variar el deslizamiento.
- Variar la velocidad sincrónica

Para variar la forma de la curva T-n se puede actuar sobre los parámetros del motor (resistencia estática, resistencia rotórica, inductancia rotórica) o sobre la tensión de alimentación. Hoy en día estas técnicas se utilizan fundamentalmente para el control durante el arranque del motor.

Para variar la velocidad sincrónica se utilizaba la variación en la cantidad de pares de polos, mediante un devanado con conexiones conmutables. Actualmente se utiliza la variación de frecuencia a través de los variadores de velocidad. A continuación pasamos a describir estas técnicas.

### 3.3. Variación en la tensión de alimentación

A partir de la expresión de la cupla podemos graficar las curvas de cupla en función de velocidad para distintos valores de  $U_1$ :



**Figura 9- Control de velocidad por variación de tensión**

Se observa que variando solamente la tensión  $U_1$  se puede variar la velocidad de un motor jaula de ardilla, pero el inconveniente (además del aumento de las pérdidas) es que a medida que  $U_1 < U_n$  (nominal) la cupla máxima decae considerablemente y como  $P = T \times \Omega$ , no se podrá obtener la plena potencia del motor.

Además este método sólo puede aplicarse a cargas mecánicas cuya característica de cupla sea creciente con el aumento de velocidad, como es el caso de los ventiladores o bombas.

### 3.4. Control de frecuencia con flujo constante

La velocidad sincrónica  $n_s$  es directamente proporcional a la frecuencia aplicada, por lo que una forma de conseguir variar la velocidad es con una fuente de frecuencia variable.

La cupla máxima  $T_{\max}$  permanece invariable si la relación  $U_1 / f_1$  permanece constante. Es decir, la cupla máxima que se puede obtener a cualquier frecuencia es idéntica a la que se obtendría si  $U_1 = U_n$  y  $f_s = f_n$  (nominales).

Para todo circuito magnético alimentado por tensión alterna se cumple que:

$$U_1 = k f_s N \Phi_{max} \quad (4.2.1)$$

donde:

$U_1$  : tensión de alimentación

$k$  : constante de la máquina

$f_1$  : frecuencia de la tensión de alimentación

$N$  : número de espiras, sometidas a la tensión  $U_1$

$\Phi_{max}$  : flujo máximo de operación del núcleo

El valor de  $\Phi_{max}$  para el cual se dimensiona una máquina determina su tamaño físico, por lo que toda variación de frecuencia (con vistas a cambiar la velocidad del rotor) traerá aparejado un cambio en las condiciones magnéticas del núcleo, salvo si se mantiene  $U/f$  constante:

$$\frac{U_1}{f_1} = k N \Phi_{max} = cte.$$

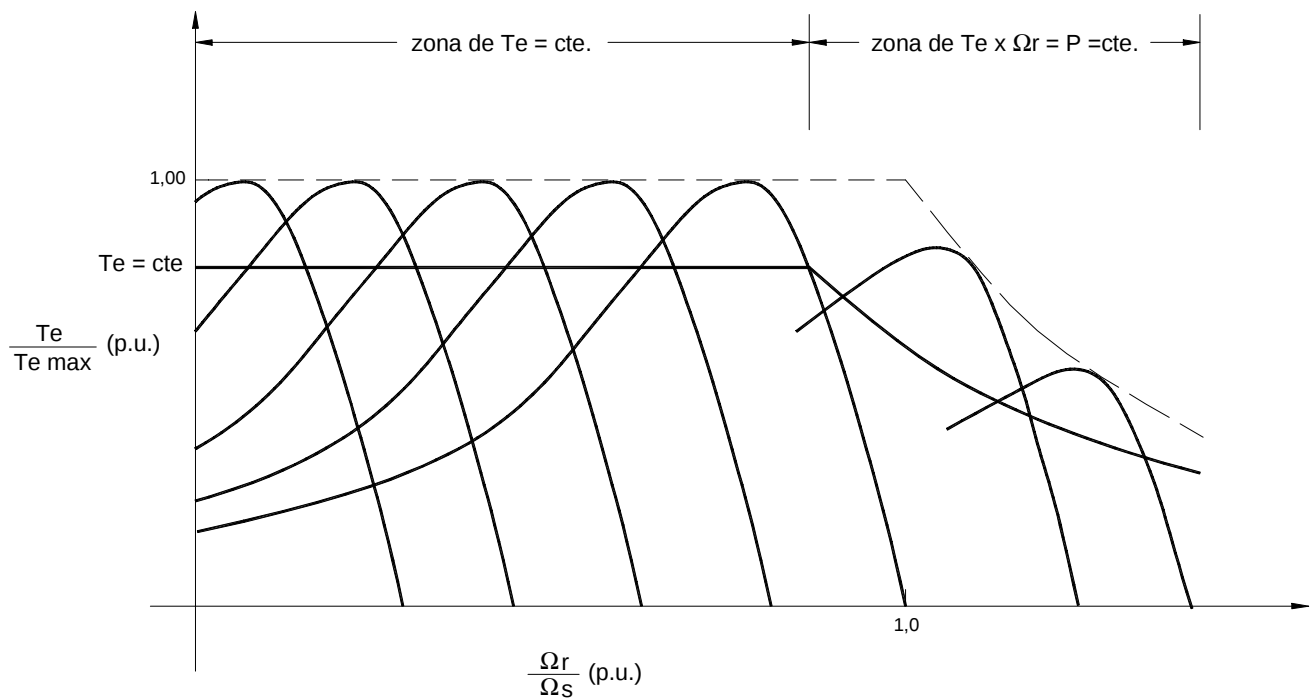
La variación conjunta de  $U_1$  y  $f_1$  provoca desplazamientos horizontales de la característica cupla-velocidad del motor. No cambian ni la forma ni las dimensiones de la curva de cupla, pero si varía su posición, como se observa en la figura 10. De esta forma se logra el máximo aprovechamiento de la cupla del motor en todo el rango de velocidad.

En la parte útil de la característica cupla-velocidad se obtiene una familia de rectas sensiblemente paralelas, lo que corresponde, desde el punto de vista técnico, a una buena regulación de velocidad con un rendimiento prácticamente similar al que correspondería al funcionamiento a velocidad nominal.

Cada curva característica posee un punto de equilibrio entre el par motor y el par resistente de la máquina accionada, denominado punto de funcionamiento del motor. Si unimos los distintos puntos de funcionamiento obtenemos una gráfica en la cual se distinguen por lo menos dos regiones perfectamente definidas: de par constante y de potencia constante.

El par motor permanece constante sólo desde bajas velocidades hasta la velocidad nominal del motor. Las razones por las cuales no se puede obtener par constante en todo el rango pueden describirse así:

- En bajas velocidades (menores al 10% de la nominal), las corrientes necesarias para producir un par elevado provocarían un calentamiento del motor imposible de disipar por la propia ventilación del motor, haciendo que el motor se “queme”. No obstante existe una solución que es la de ventilar al motor en forma externa.
- Cuando la frecuencia sobrepasa la nominal del motor, para mantener  $U / f = cte.$  sería necesario aumentar la tensión de entrada por encima de la tensión de red. Puesto que esto no es posible, se limita  $U$  a su valor nominal, perdiéndose flujo magnético, con lo que se pierde potencia.
- Para frecuencias bajas ( $< 5$  Hz) , para mantener  $U / f = cte.$  sería necesario disminuir la tensión de entrada a valores muy bajos en los que se pierde la ley de mantenimiento del flujo magnético, con la consecuente parada de la máquina. Por lo tanto, la tensión de alimentación  $U_1$  no se reduce nunca a menos del 15 % de su valor nominal, produciéndose cambios en el valor máximo de la cupla.



**Figura 10- Característica cupla-velocidad para un motor alimentado con  $U/f = \text{cte.}$**

Un motor de inducción usado de esta manera tiene características semejantes a las de un motor de corriente continua excitación independiente, con el flujo constante y la tensión de inducido variable (en la zona de par constante) y debilitamiento de flujo en la zona de potencia constante.

## 4. TÉCNICAS ELECTRONICAS DE VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA

### 4.1. Los convertidores

En un capítulo anterior se han descrito diferentes estrategias para controlar la velocidad de los motores de inducción. El dispositivo que permite llevar a cabo dichas estrategias es el *convertidor de frecuencia*.

Existen varias posibilidades técnicas para realizar un convertidor:

- Convertidor de frecuencia con modulación por amplitud de pulsos (PAM)
- Convertidor de frecuencia con modulación por anchura de pulsos (PWM)
- Inversor de corriente (CSI)

Estas dos partes se encuentran unidas a través de un circuito intermedio de tensión continua donde se disponen los elementos pasivos de alisamiento tales como capacitores o inductores. La magnitud característica del circuito intermedio que alimenta al ondulator es una tensión independiente de la carga.

#### 4.1.1. Rectificador

Uno de los rectificadores más utilizados para convertidores es el trifásico del tipo B6 (seis diodos), en la conexión conocida como puente de Graëtz.

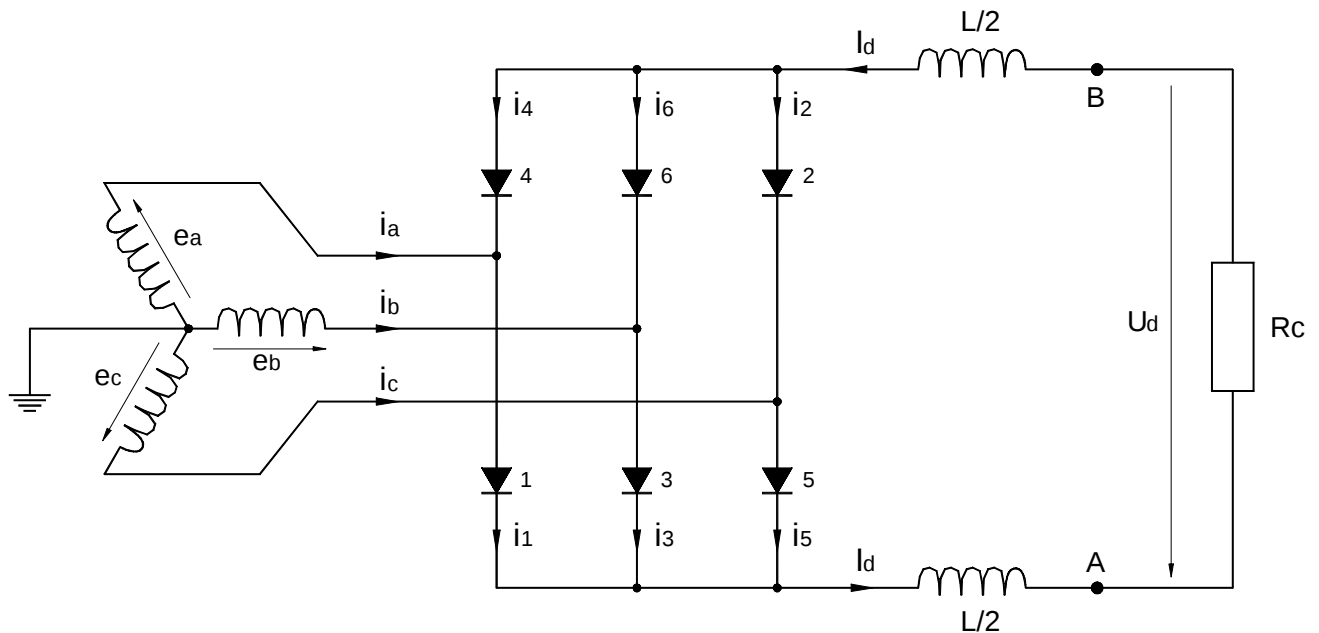
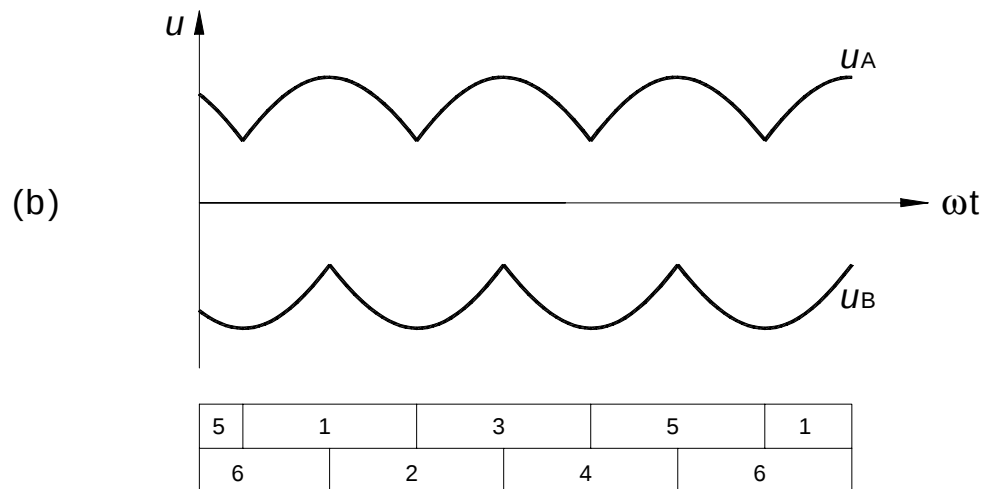


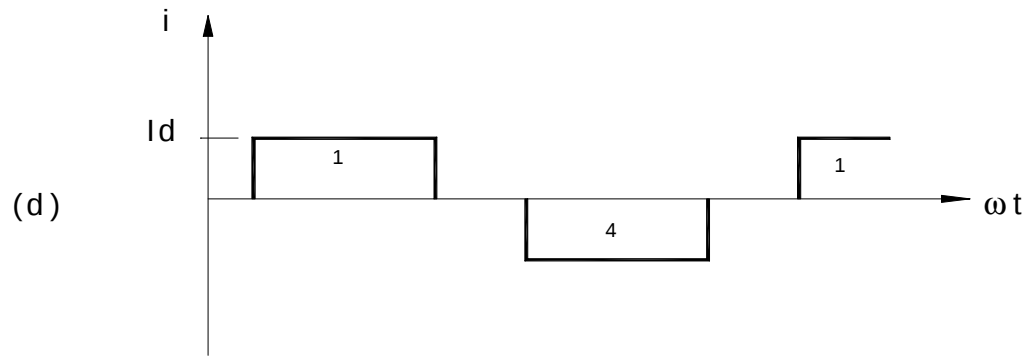
Figura 11- Rectificador

Aunque este puente se puede utilizar en una red de alterna sin transformador, para realizar el estudio teórico resulta práctico representar un transformador con secundario en estrella a fin de que las tensiones  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$  estén desfasadas  $120^\circ$  eléctricos entre sí. Cuando la carga es atravesada por una corriente continua  $I_d$ , el potencial del punto **A** es el mismo que el de la fase que conduce, y por lo tanto es igual a la tensión más elevada que haya en el instante  $t$  considerado. De igual manera, el potencial del punto **B** es idéntico al de la fase que asegura el retorno de la corriente, por lo que es igual a la tensión más negativa que haya en el instante considerado. En consecuencia, la tensión rectificada  $u_d$  es en todo momento la diferencia entre las envolventes superior e inferior de las dos tensiones  $u_A$  y  $u_B$ . El número de pulsos de un rectificador es el número de ciclos de ripple de la tensión continua por ciclos de la tensión alterna. Se ve entonces que este rectificador trifásico de dos vías es de 6 pulsos. La tensión  $u_1$  en bornes del diodo **1** es nula cuando este diodo conduce, ya que se ha supuesto ideal, mientras que cuando está bloqueado vale  $e_b - e_a$  cuando conduce el diodo 3 o  $e_b - e_c$  cuando conduce el diodo 5.



**Figura 12- Tensiones en el rectificador**

Suponiendo la inductancia de alisado infinita y la inductancia de dispersión del transformador despreciable, la corriente de la carga tiene un valor constante ( $I_d = U_d/R_c$ ), mientras la corriente  $i$  por cada hilo de línea está representada por dos ondas rectangulares alternativamente positivas y negativas.



**Figura 13- Corriente en la carga del rectificador**

Se puede calcular que :

$$U_d = 1,35 U_L$$

#### 4.1.2. Circuito intermedio

Lo constituyen los elementos de filtrado de la tensión y corriente que entrega el rectificador. Un capacitor, conectado en paralelo con el rectificador/ondulador reduce ostensiblemente el efecto de ripple de la tensión continua del rectificador.

Las inductancias de alisamiento se utilizan como acumuladores inductivos de energía. Reducen el rizado de la corriente de salida cuando no es suficiente la inductancia del circuito de carga.

#### 4.1.3. Ondulador con modulación de anchura de pulso

Cada fase de un ondulador con modulación de anchura de pulso está formado por dos troceadores, uno para cada polaridad. Tr1 y Tr4 pueden ser tiristores o transistores que se comportan como llaves y permiten que sobre la carga haya aplicada una tensión  $+E/2$  ó  $-E/2$  respectivamente durante el tiempo de conducción de los mismos, determinado por el circuito de control. Los diodos D1 y D4 forman parte del rectificador trifásico, y se utilizan para devolver energía al ondulador. Así, la tensión de salida está formada por una sucesión de ondas rectangulares de amplitud igual a la tensión continua de alimentación y duración variable según la ley de modulación escogida (el control de cebado/polarizado de Tr1 y Tr4). Cuando la carga presenta una constante de tiempo elevada, como es el caso de un motor, la ondulación de la corriente de carga es pequeña, y en consecuencia la corriente de carga sólo cambia de polaridad cada semiperíodo. Si, en estas condiciones, se controlan los dos troceadores siguiendo un modelo senoidal, la tensión fundamental de salida y la corriente de carga se aproximan a una senoidal.

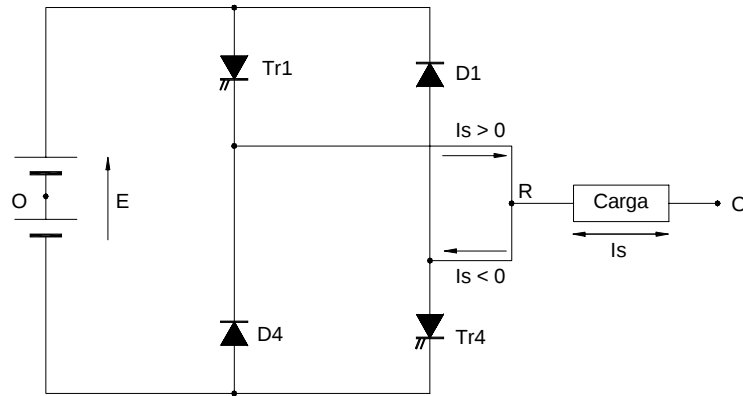


Figura 14- Fase del ondulator

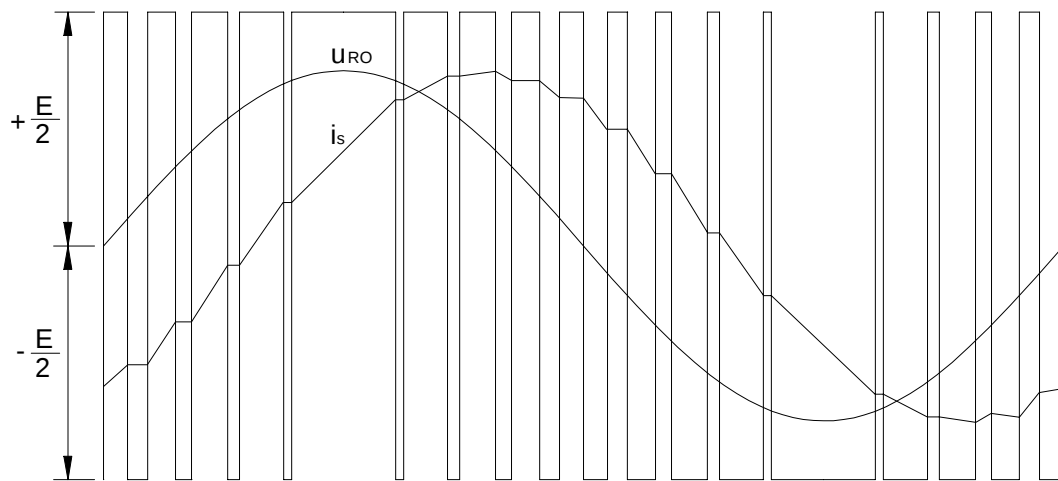


Figura 15 Formas de onda teórica de un ondulator PWM

Las leyes de modulación (son las que determinan el instante de conmutación de conducción de los troceadores) se implementan con microprocesadores incorporados al convertidor. Las más difundidas comparan, en general, tensiones de referencia, que son imagen de la tensión de salida buscada, a una señal triangular simétrica cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia de la onda fundamental. Esta señal triangular se denomina **“portadora”**.

Los ondulatorios PWM pueden estar constituidos por tiristores o transistores. Para motores de inducción a jaula, y en el rango de las bajas y medias potencias (hasta aproximadamente 500 kW), se utiliza la tecnología de los Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (IGBT) o Transistores de Efecto de Campo (MOSFET). Estos tienen un tiempo de conmutación en el orden de un microsegundo y la frecuencia de conmutación inferior está en el orden de los 16 kHz, por encima del rango audible, de manera que los componentes magnéticos no producen ruidos acústicos objetables. Existe la ventaja adicional que el inversor exhibe entonces una amplia banda de control. Los tiristores se emplean en el rango de 500 kW en adelante.

**4.1.4. Ventajas de los convertidores PWM**

Por concepción, el ondulator PWM es reversible, ya que la corriente puede cambiar de signo. Se puede optar por frenado con recuperación o con disipación de energía. Para poder operar con recuperación de energía, se debería colocar en antiparalelo con el puente rectificador de diodos, un puente de tiristores que funciona como ondulator no autónomo, para devolver a la red la energía de frenado recuperada. Esta solución es interesante para las medianas y grandes potencias, e incluso para pequeñas potencias (si la carga mecánica arrastra con frecuencia al motor). Para pequeñas potencias, la resistencia se puede insertar en el circuito a través de un transistor. El transistor puede conducir, ya sea mediante una señal procedente de la regulación e indicando que la máquina funciona como generador, o bien mediante un detector de nivel colocado en la tensión continua y que interviene cuando ésta alcanza un determinado valor.

La inversión de la velocidad se hace actuando sobre la electrónica de control, lo que evita cualquier discontinuidad a nivel del campo giratorio (y por lo tanto del par), contrariamente a lo que pasa cuando se permutan dos fases con un contactor.

## 5. LOS VARIADORES DE VELOCIDAD

### 5.1. Familias de productos

Hoy en día, existen infinidad de marcas que ofrecen variadores de velocidad para utilizaciones industriales. En general presentan una familia completa de productos con diferentes prestaciones de acuerdo a la potencia. Para motores de bajas potencias (hasta 3 kW, dependiendo de la marca) se utilizan aparatos con un mínimo de prestaciones, de tamaño similar al de un contactor y que se montan sobre riel DIN tal como cualquier otro elemento del tablero. Tal el caso del variador de la figura:



**Figura 16- Variador Allen Bradley 160SSC**

Para potencias mayores los modelos son de mayor tamaño con montaje sobre perfil, y las prestaciones van aumentando. Para motores de grandes potencias pueden requerirse variadores con sistema de ventilación incorporada.

Hoy en día la mayoría de los variadores incorporan el control vectorial de flujo y la mayoría permite la incorporación de hardware específico para aplicaciones particulares.

Es frecuente también que los variadores de baja potencia se alimenten con tensión monofásica, generando en su interior la alimentación trifásica para el motor. Esto constituye una importante ventaja, pues permite utilizar motores asíncronos trifásicos aún cuando no está disponible la alimentación trifásica.

## 5.2. Composición de un variador de velocidad

Un variador de velocidad se compone básicamente de dos placas electrónicas:

- Placa de control
- Placa de potencia.

Estas placas están separadas pues manejan distintos niveles de potencia, debiendo utilizar protecciones separadas. Puede reemplazarse a cualquiera de ellas en forma individual. Las conexiones para ambas placas se realizan en forma separada.

La placa de potencia se alimenta desde la red eléctrica y entrega potencia al motor. Contiene los dispositivos electrónicos de potencia tales como transistores de potencia, IGBT, tiristores. Esta placa varía con la potencia del motor a controlar. Incluye las borneras para alimentación y conexión del motor y puede incluir las necesarias para colocar elementos de potencia adicionales (tales como resistencias de frenado).

La placa de control incluye todos los circuitos que realizan el control de la frecuencia y/o la tensión, enviando los pulsos de control al circuito de potencia. Contiene switches para setear parámetros y se comunica con el panel frontal o el elemento de diálogo. Sobre ella puede ir montada una tercera placa, correspondiente al panel de dialogo o port de comunicación. Su bornera incluye todas las conexiones de control.

## 5.3. Comando, Ajuste y configuración

Cualquier equipo de automatización incluye distintos tipos de funciones de diálogo con el usuario. Se entiende por usuario tanto el operador que comanda manualmente como otro sistema automatizado (PLC, red industrial, otro variador, sistema de supervisión, etc.) que dialoga a distancia.

En el caso de los variadores de velocidad estas funciones son:

- El *comando* se refiere a todas las *órdenes* necesarias para el funcionamiento normal tales como marcha, parada, inversión de giro, el valor de la velocidad, cambio a consigna preseleccionada, frenado regenerativo, etc.
- El *ajuste* se refiere al cambio de las variables durante el funcionamiento del equipo como por ejemplo la ley tensión- frecuencia, la selección del tipo de frenado, los tiempos de aceleración y desaceleración, las consignas máxima y mínima de velocidad.
- La *configuración* se refiere al cambio de parámetros de funcionamiento fijos que, en general, no deben ser cambiados en operación, como por ej. la velocidad máxima admitida, el tiempo de aceleración máximo, la forma de la ley tensión frecuencia, la tensión de la red, la selección de las funciones de bornes configurables, etc.
- La *señalización* permite conocer el estado de las variables del equipo.

En la tabla adjunta presentamos las distintas formas del dialogo hombre-máquina y máquina-máquina, disponibles para variadores.

| Forma de Diálogo                                     | Función                 | Ejemplos                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Entradas y salidas de las cartas electrónicas</i> | Control                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Marcha/Parada</li> <li>- Cambio de consigna</li> <li>- Frecuencia de funcionamiento</li> <li>- Inversión de sentido de giro</li> </ul>                                    |
| <i>Panel frontal incorporado al variador</i>         | Ajuste<br>Configuración | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad máxima y mínima</li> <li>- Ley tensión frecuencia</li> <li>- Límite protección térmica</li> <li>- Tiempo de frenado</li> <li>- Tiempo de aceleración</li> </ul> |
| <i>Selectores de las cartas electrónicas</i>         | Configuración           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Habilidad protección térmica incorporada</li> <li>- Selección de tensión</li> </ul>                                                                                       |
| <i>Terminal de programación de mano</i>              | Ajuste<br>Configuración | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Todas</li> </ul>                                                                                                                                                          |
| <i>Soft para PC</i>                                  | Control                 |                                                                                                                                                                                                                    |
| <i>Comunicación en red industrial</i>                |                         |                                                                                                                                                                                                                    |

Las primeras formas de diálogo existen en prácticamente todos los modelos, mientras que las tres últimas funciones pueden no estar disponibles en algún modelo de variador

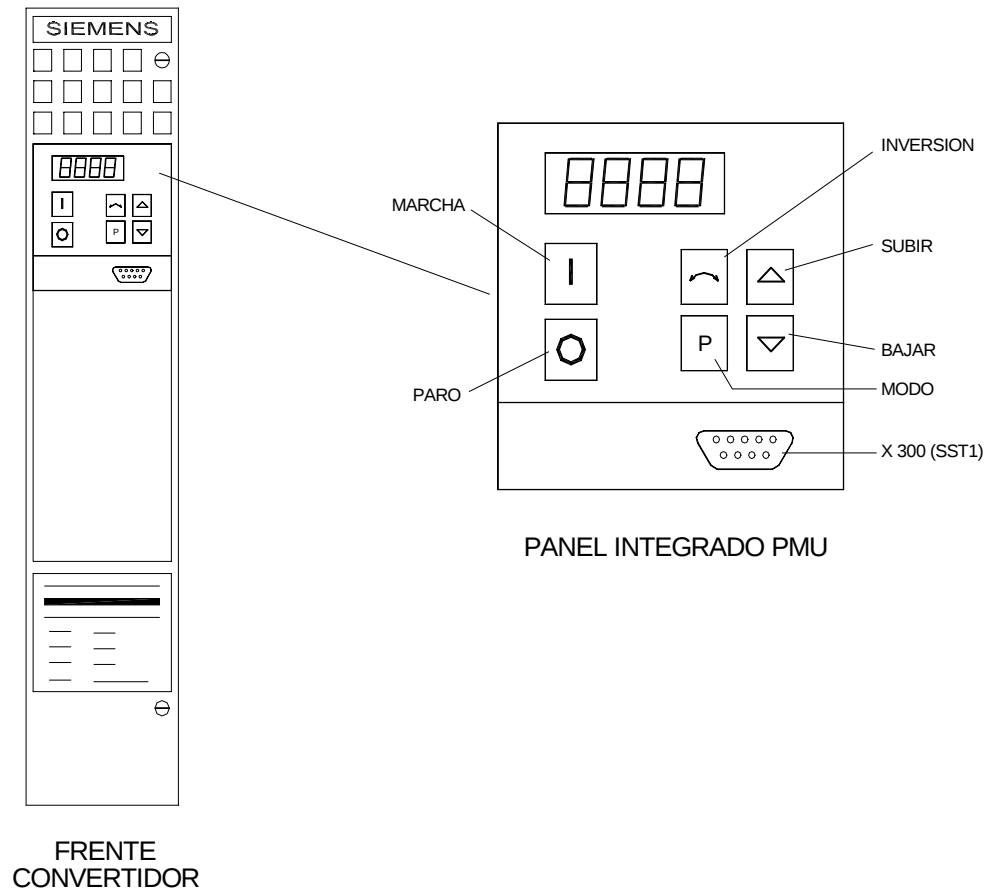
Es común que la configuración se realice por parametrización, asignando valores a palabras internas disponibles. Esto depende de cada marca y modelo y de la capacidad de comunicación del variador.

Para la comunicación en red industrial existen varias alternativas. Las más frecuentes como opciones incorporadas son la comunicación en Modbus y en alguna red propietaria de cada marca. Actualmente muchos variadores traen incorporadas interfases para *buses de campo industriales* tales como Fieldbus Foundation, Device-Net, Profibus o Fip.

A continuación mostramos como ejemplo el manejo y visualización para un convertidor Simovert. El convertidor puede manejarse y visualizarse directamente en el equipo o desde elementos exteriores:

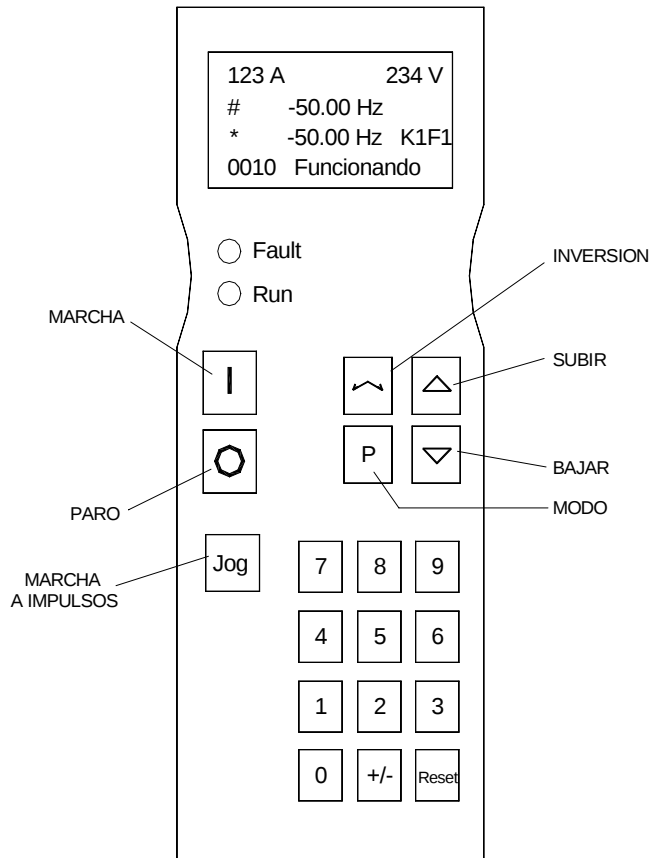
El variador incluye un Panel operador integrado PMU:, montado en el frente del equipo; que incluye las siguientes funciones:

- Puesta en servicio del convertidor.
- Comando: marcha/paro, subir/bajar consigna; conmutación sentido de giro
- Visualización de consigna y valores reales.
- Visualización y cambio de parámetros.
- Visualización de estados del convertidor.
- Visualización de mensajes de alarma y fallo



**Figura 17- Panel integrado en un variador**

El panel integrado posee un conector de 9 pines (X 300) con interfase RS485 ó RS232. En eses port puede conectarse una terminal de operación manual que se monta en un equipo o armario. Puede también conectarse a través de un cable de 5 m de longitud. Con una fuente de alimentación separada de 5 V admite longitudes de cable de hasta 200 m. Esta terminal de mano realiza funciones idénticas alas del panel frontal incorporado.



**Figura 18- Terminal de mano**

Un programa para PC, SIMOVIS permite ajustar, manejar y visualizar el variador a través de una interfase gráfica en pantalla. Integra entre otras las siguientes funciones:

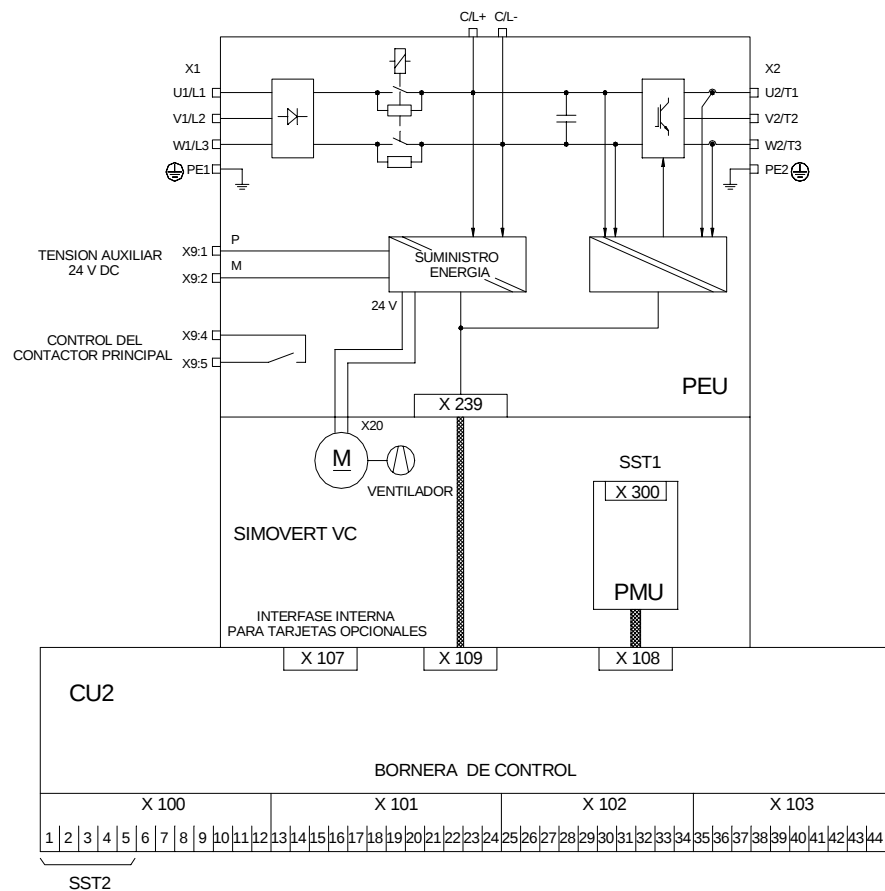
- Puesta en servicio por menús
- UPREAD/DOWNLOAD de juegos de parámetros
- Ajuste y visualización de todos los parámetros
- Comando y forzado de los equipos (por ejemplo consignas, órdenes de mando)
- Evaluación de fallos y alarmas

La conexión entre la PC y el variador se realiza punto a punto (RS232) sobre el conector del panel integrado.

El variador se puede comandar también desde la bornera de mando de la tarjeta de control. Por ejemplo vía entradas / salidas binarias y analógicas de un PLC. En este caso sólo son posibles órdenes de comando, selección de consignas y juegos de datos, pero no es posible la parametrización del equipo.

### 5.4. Conexiones

A título de ejemplo mostramos el esquema de conexiones de un variador Simovert 6SE7. Las conexiones que se muestran son típicas de la mayoría de los variadores comerciales.



**Figura 19- Esquema de conexiones de un variador Simovert**

La alimentación al equipo se realiza a través de los bornes de entrada U1/L1, V1/L2, W1/L3; la conexión al motor parte de los bornes de salida U2/T1, V2/T2, W2/T3.

Algunos variadores pueden requerir una alimentación auxiliar externa de 24 V DC para la electrónica del equipo (X9:1 y X9:2).

Puede existir también un conector (X 107) para la conexión de tarjetas adicionales que permiten ampliar el convertidor base en numerosas funciones tecnológicas asociadas al accionamiento.

En todo variador se dispone (en la tarjeta de control) de entradas binarias (X101) y puede que también de salidas binarias (X 100).

Las entradas binarias suelen utilizarse para las siguientes funciones de mando:

- Marcha/Parada
- Selección de consignas pre establecidas
- Selección entre conjuntos de datos
- Sentido de giro
- Habilitación de funciones especiales

Las salidas binarias suelen utilizarse para señalización y alarma de, por ej.:

- Funcionamiento
- Listo
- Alarma
- Baja tensión de red
- Desviación del valor real del de consigna
- Sobretemperatura convertidor
- Imagen térmica motor

También suelen existir entradas analógicas(bornera X 102) y salidas analógicas(X103) que se pueden elegir de 0 a  $\pm 10V$  ó 0 a  $\pm 20$  mA. Las entradas analógicas se utilizan para:

- consigna principal
- consigna adicional
- Realimentación de velocidad
- Límite de par
- Consigna de par, etc.

Las salidas analógicas se utilizan para cualquier magnitud observable tal como velocidad, intensidad en el motor, tensión de salida, potencia activa, corriente activa, etc.

### **5.5. Recomendaciones para la instalación**

Es necesario colocar un elemento que aisle galvánicamente de la red (interruptor o seccionador-fusible). Durante el funcionamiento normal, la conexión y desconexión del equipo se efectúa a través de un contactor principal, cuya bobina se debe conectar en serie con un contacto de aviso de funcionamiento correcto del variador ( X9:4 y X9:5). Ante una orden de “Marcha” en el convertidor, este contacto se cierra y permite la energización del equipo.

Es conveniente realizar la protección contra cortocircuitos con fusibles ultrarrápidos para proteger tanto los conductores como los semiconductores del convertidor, y disminuir el nivel de cortocircuito.

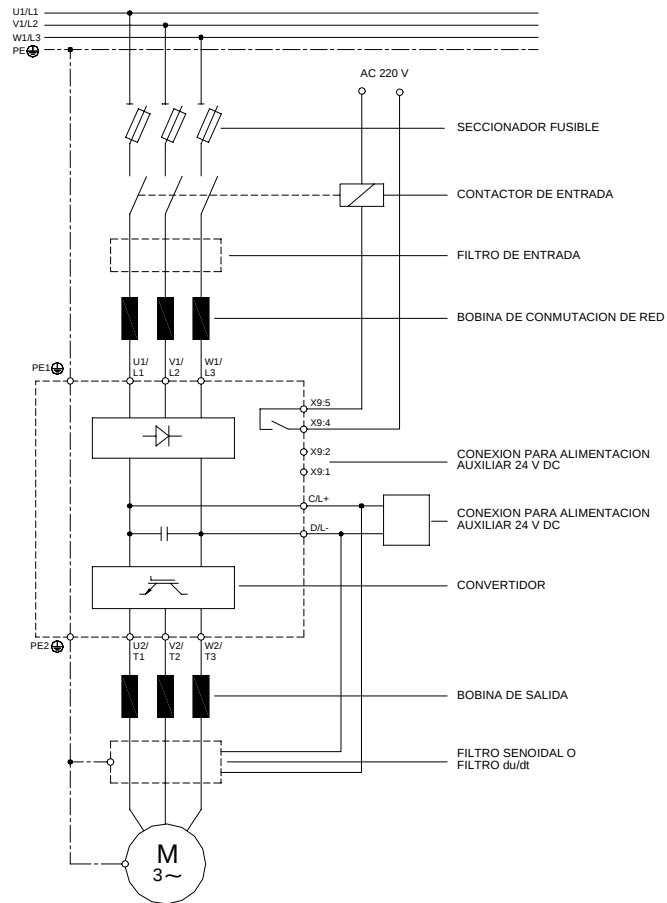
Es importante tener una buena conexión a tierra, pues el convertidor genera ruido de radiointerferencia, el cual debe tener un camino de dispersión de la menor resistencia óhmica posible.

Se recomienda, además, utilizar cable blindado para alimentar al motor y también para los cables de control. El blindaje debe ser conectado a tierra en ambos extremos.

Si el nivel de emisión de ruido es importante, se debe utilizar el Filtro de Entrada que suprime las radiointerferencias y debe ser instalado lo más cerca posible del equipo.

Cuando el cable que une el convertidor con el motor es de gran longitud, el convertidor debe suministrar el pico de corriente que consumen las capacitancias del cable; además la aislación del motor sufre picos de tensión transitoria causada por reflexión de la onda de tensión, que pueden dañar prematuramente la aislación del motor.

Presentamos como ejemplo, uno de los circuitos recomendados por los fabricantes:



**Figura 20- Esquema de conexión convertidor-motor**

La Bobina de Salida reduce los picos de corriente capacitiva y la velocidad de cambio de la tensión en los terminales del motor, pero no reduce los picos de tensión en dichos terminales.

El Filtro du/dt reduce los picos de corriente y de tensión.

El Filtro Sinusoidal, además de reducir los picos de tensión y de corriente, permite que una corriente puramente senoidal llegue al motor, disminuyendo las pérdidas y el ruido en el mismo.

## 5.6. Funciones disponibles

### 5.6.1. Controles de la velocidad disponibles

Los variadores de velocidad trabajan, en general, con dos métodos diferentes de regulación de velocidad ó par según la aplicación:

- a) Por variación de la frecuencia, manteniendo la característica  $U/f$
- b) Por regulación vectorial de flujo.

### **5.6.2. Control por variación de frecuencia**

Existen varias formas de controlar la frecuencia y la ley  $U/f$ :

1. Característica  $U/f$  para aplicaciones generales.

Esta es la característica descrita en capítulos anteriores. Se utiliza cuando no hay grandes requisitos de respuesta dinámica. Por ejemplo: bombas, ventiladores, accionamientos de traslación simples.

2. Con realimentación por tacogenerador.

Se utiliza cuando se requiere compensación del deslizamiento para lograr una precisión de velocidad suficiente. La señal de velocidad real procedente de un tacómetro analógico se evalúa a través de una entrada analógica del variador. Si se dispone de un emisor de impulsos de 2 canales se puede: colocar una tarjeta adicional en el convertidor que transforme la señal de pulsos en una señal analógica o realizar la transformación externamente, por ejemplo a través de un PLC.

3. Característica  $U/f$  para aplicaciones particulares:

En casos especiales, por ejemplo aplicaciones textiles, se puede requerir una resolución muy alta de la velocidad. En estos casos la ley  $U/f$  debe modificarse de acuerdo a una función preestablecida. Para esto se adiciona al variador un carta electrónica opcional o una memoria EEPROM con el juego de parámetros necesarios

### **5.6.3. Regulación vectorial:**

Este tipo de regulación permite obtener una respuesta dinámica equiparable a la de un accionamiento de corriente continua. Esto se logra determinando exactamente las componentes de la corriente que producen el par y el flujo. Este tipo de regulación vectorial permite mantener el par preseteado y limitarlo con gran eficacia.

Dentro del margen de variación de velocidad 1:10, la regulación vectorial no precisa tacogenerador y no depende de parámetros del motor.

El tacogenerador es necesario sólo cuando se requiere:

- alta respuesta dinámica
- regulación de par en margen de velocidad  $> 1:10$
- velocidades reducidas
- muy alta precisión de velocidad.

Existen varios modos de regulación vectorial:

1. Por regulación de frecuencia sin tacogenerador.

Para aplicaciones con altos requisitos de respuesta dinámica, por ejemplo accionamientos de traslación y elevación , extrusores.

2. Por regulación de velocidad con tacogenerador.

Para aplicaciones con altos requisitos de respuesta dinámica (incluso a bajas velocidades) y alta precisión de velocidad, por ejemplo accionamientos de ascensores y de posicionamiento.

3. Por regulación de par con tacogenerador.

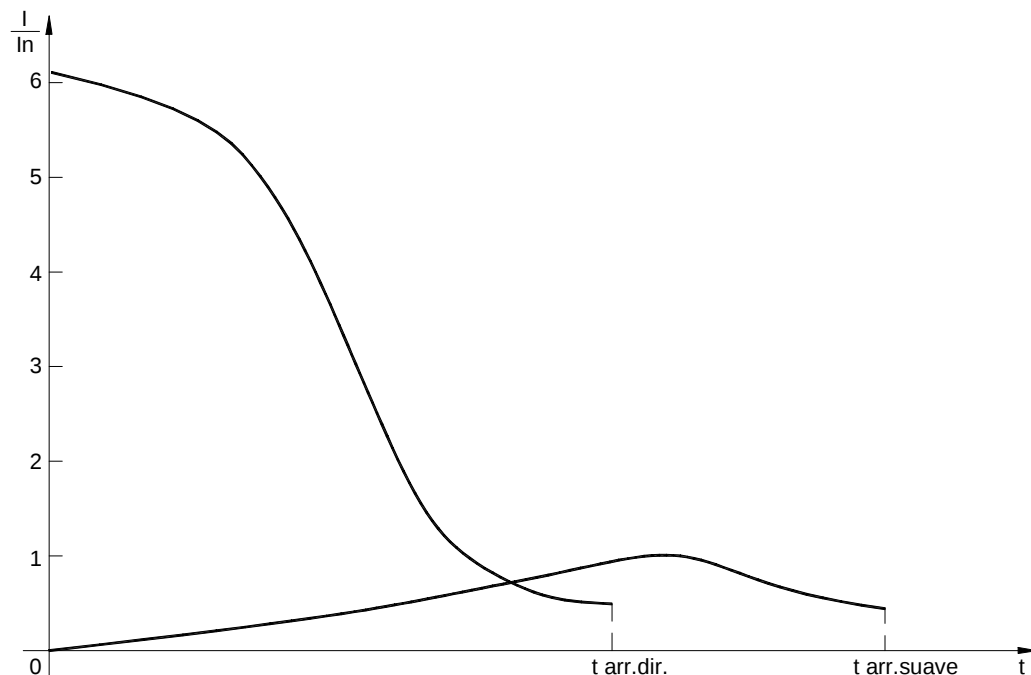
Para aplicaciones con altos requisitos de respuesta dinámica y cuando el par deba ajustarse en proporción a un valor de consigna, por ejemplo accionamientos de bobinadoras, accionamientos con regulación de tiro y accionamientos maestro-esclavo.

#### 5.6.4. Arranque suave del motor

Los convertidores de frecuencia brindan un método de arranque denominado “arranque suave”.

Los variadores suministran un valor eficaz de tensión de salida que crece linealmente con el tiempo, partiendo de un valor inicial no nulo  $U_0$  que tiene en cuenta la denominada compensación  $I \times R$ , hasta llegar al valor nominal  $U_n$ . Esta rampa de tensión hace que el arranque se produzca de manera progresiva. Una de las variables a ajustar en el variador, es el tiempo para este arranque.

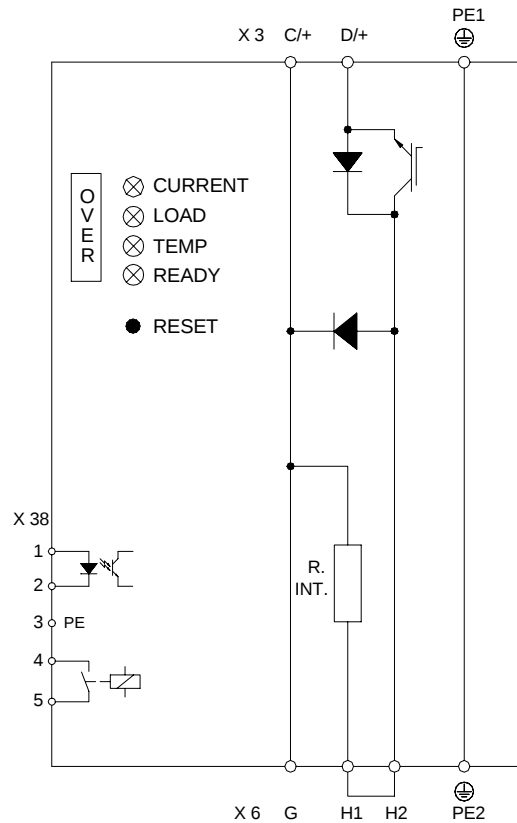
Esta variación de la tensión lleva a que la corriente no varíe en forma brusca como en u arranque directo del motor, sino que vaya alcanzando su valor nominal en forma progresiva.



**Figura 21- Comparación de la corriente de arranque para arranque suave y arranque directo.**

### 5.6.5. Unidad de frenado

Para permitir el frenado regenerativo muchos variadores necesitan adicionar un dispositivo de frenado. Estos dispositivos constan, en la etapa de potencia, de un chopper y una resistencia de carga interna. Para aumentar la potencia de frenado se conecta una resistencia de carga externa. En general se dispone de una entrada digital para bloquear la unidad de frenado.



**Figura 22- Dispositivo de frenado**

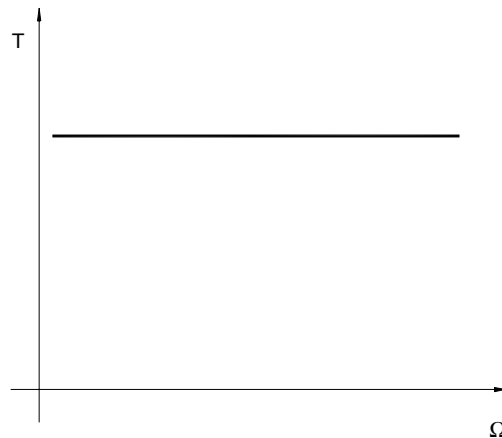
## 6. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE CONVERTIDORES DE FRECUENCIA

### 6.1. Análisis de cargas mecánicas típicas

El proceso de selección de la potencia de un convertidor y su motor asociado está ligado al análisis del tipo de carga mecánica que deberá accionar. Este análisis se basa en conocer la característica cupla-velocidad de la carga y el momento de inercia de sus componentes. Existen tres grandes grupos de cargas:

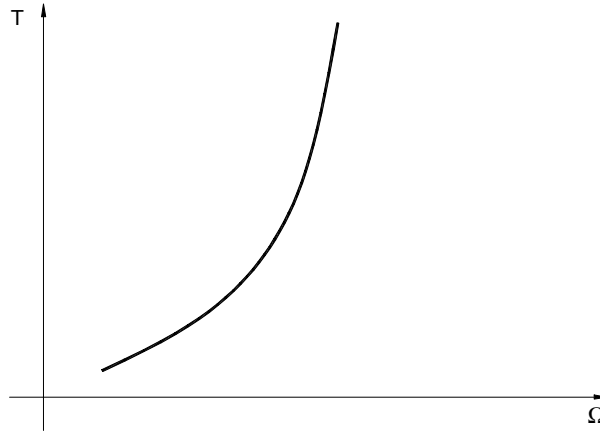
- Cargas que requieren cupla constante en función de la velocidad.
- Cargas que requieren cupla variable cuadráticamente con la velocidad.
- Cargas con cupla que varía en forma inversa a la velocidad, caso comúnmente llamado de potencia constante.

Las cargas de cupla constante son el grupo más numeroso en la industria, pues la cupla se origina básicamente en fuerzas de fricción como es el caso de cintas transportadoras, máquinas extrusoras, aparejos, máquinas de imprenta y algunos compresores.



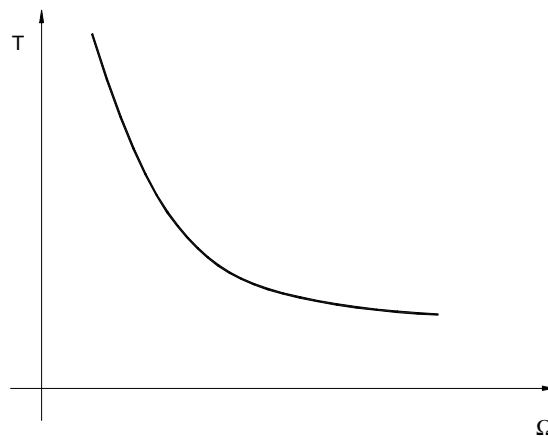
**Figura 23- Cargas de par constante**

Las cargas de cupla cuadrática requieren un cupla que se incrementa con el cuadrado de la velocidad y por ende la potencia que insumen varia con el cubo de la misma. Esta relación cupla/potencia - velocidad es común en bombas centrífugas, ventiladores y sopladores.



**Figura 24- Cargas de par cuadrático**

Las cargas de potencia constante requieren grandes cuplas para moverse, pero una vez en movimiento la cupla decae linealmente con la velocidad, o dicho de otra manera la cupla y la velocidad varían en forma inversa. Ejemplo de cargas de este tipo se encuentran en los tornos (baja velocidad para grandes cortes, y alta velocidad para pulido), bobinadoras de cables y algunas rectificadoras.



**Figura 25- Cargas de potencia constante**

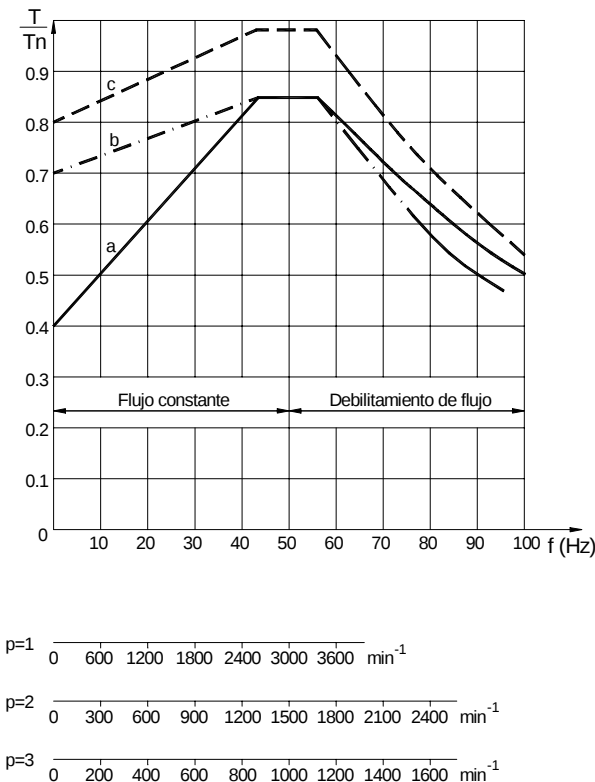
Existen varios casos particulares que no pueden encuadrarse dentro de los grupos antes mencionados tales como cargas que requieren una gran cupla de arranque (como son las bombas de líquidos que pueden congelarse), las que requieren cuplas que varían en función de la posición del eje de la máquina (compresores a pistón y balancines), cargas que varían rápidamente en función del tiempo (rectificadoras, fresadoras de superficies rugosas, sierras de corte, etc.). El tratamiento de estos casos requerirá siempre un análisis térmico para determinar las potencias del convertidor y motor.

## 6.2. Capacidad térmica del conjunto convertidor-motor

De acuerdo con la capacidad térmica de un motor operando a frecuencia variable se puede optimizar la selección del conjunto convertidor-motor.

Un motor standard puede funcionar a velocidad variable es posible pero requiere siempre un análisis térmico. La capacidad de disipación de calor se ve reducida considerablemente a medida que el motor gira a velocidades inferiores a las de diseño. Además, las pérdidas que generan calor se incrementan porque las formas de onda de la alimentación no son sinusoidales.

Los grandes fabricantes realizan ensayos de sus motores para determinar curvas de carga en función de la frecuencia de alimentación, de tal forma que se pueden generalizar en una familia de curvas universales de diseño para motores de  $P_n \geq 4$  kW.



**Figura 26- Capacidad de carga para motores de inducción conectados a convertidores de frecuencia por modulación de ancho de pulso: a- motor autoventilado, b- motor con ventilación separada de 2 ó 3 pares de polos, c- ídem b pero con 3 ó 4 pares de polos.**

Tal como puede apreciarse en estas curvas, la capacidad de carga del motor depende de la velocidad de operación y del número de pares de polos del motor siendo más adecuados para operar a bajas velocidades, los de mayor número de polos.

Si la característica  $T-\Omega$  de la carga está por debajo de la correspondiente curva de límite térmico, el motor podrá accionarla en forma continua. Si se utiliza ventilación independiente

la capacidad térmica del motor se incrementa para bajas velocidades. El efecto inverso ocurre a velocidades superiores a la velocidad nominal donde, además, las pérdidas se vuelven más significativas por el aumento de frecuencia y generalmente de la distorsión armónica.

Los motores de baja potencia tienen corrientes poco dependientes del estado de carga y la relación resistencia/reactancia de su armadura es tal que su rendimiento térmico es inferior al de grandes motores. Requieren, por lo general, una fuerte ventilación forzada cuando se usan en aplicaciones de baja velocidad de giro.

Siempre conviene seleccionar el motor de forma que la mayor parte del tiempo trabaje a frecuencia nominal o mayor.

Es conveniente evitar sobredimensionar los motores pues los convertidores son equipos que operan con conmutación forzada y ésta está limitada por valores pico de corriente. Un motor más grande accionando la misma carga demandará la misma potencia de la red que uno correctamente dimensionado, sin embargo, el primero absorbe picos de corriente mucho más significativos exigiendo esfuerzos mayores a los circuitos de conmutación forzada.

### **6.3. Selección del motor y convertidor**

La selección del convertidor-motor requiere los siguientes pasos:

- a) Determinar el rango de variación de velocidad requerido por el sistema.
- b) Calcular la potencia que insume la carga a máxima velocidad.
- c) Estimar la cupla máxima necesaria para el arranque.
- d) Si existen especificaciones de respuesta dinámica (típica en aplicaciones donde el motor es un servo controlador) determinar tiempos de aceleración requeridos y momentos de inercia de la carga referidos al eje del motor.
- e) Preseleccionar un motor en base a la potencia mecánica necesaria y verificar si la cupla requerido por la carga cae por debajo de las curvas de capacidad térmica. Recordar que es conveniente que cuando la velocidad requerida sea máxima el motor trabaje mas allá de la frecuencia nominal. Evitar exceder en mucho la velocidad nominal pues pueden aparecer problemas de balanceo dinámico y desgaste de rulemanes.
- f) Verificar que el motor seleccionado pueda arrancar la carga, esto es  $T_{max}$  del motor  $>$   $T$  arranque de la carga. En caso negativo existen dos posibles soluciones: agregar un reductor (multiplicador de torque) o aumentar la potencia del motor.
- g) Estudiar la conveniencia de dotar al motor seleccionado de ventilación forzada para satisfacer requerimientos de trabajo a elevadas cuplas y bajas revoluciones.
- h) Determinar la máxima corriente que consume el motor seleccionado y elegir un convertidor capaz de suministrarla.

En caso de tratarse de un control de posición es necesario verificar la necesidad de frenado dinámico (regenerativo, resistivo o por inyección de corriente continua).

#### **6.3.1. Ejemplo de aplicación**

Se desea seleccionar convertidor y motor para una cinta transportadora, con un rango de velocidad de 700 a 1600 rpm. La cupla requerida por la cinta es constante en ese rango de velocidades e igual a 1200 Nm. La máxima cupla de arranque se estima en 1700 Nm y el momento de inercia de la carga referido al eje del motor, es de 30 Kgm<sup>2</sup>. La aceleración máxima requerida es de 15 segundos para pasar de 700 a 1600 rpm.

Para seleccionar el motor se debe calcular la potencia, elegir el número de pares de polos, y el sistema de ventilación.

Si se aplican las fórmulas clásicas de potencia se llega a:

$$P_{necesaria} \geq T_n \frac{60f}{p} \frac{2\pi}{60} = 1200 \times \frac{3000}{2} \times \frac{2\pi}{60} = 188 \text{ kW}$$

lo que implicaría especificar un motor de al menos esta potencia afectada por el rendimiento energético.

Si se adopta un motor autoventilado (Curva "a" de capacidades de motores), resulta que para un motor de dos pares de polos alimentado desde un convertidor de frecuencia se tendrá una relación de cupla de 63% a 700 rpm y 85% para 1600 rpm. Se deduce que la cupla necesaria será:

$$T_n > \frac{1200}{0,63} \text{ Nm}$$

que corresponde a un motor de:

$$P \geq 1900 \frac{60 \times 50}{2} \frac{2\pi}{60} = 298 \text{ kW}$$

Si se cambia la especificación y se acepta usar ventilación externa, (curva "b") se ve que la relación de cupla varía de 77% a 85% para ambos extremos de velocidad, esto conduce a:

$$T_N > \frac{1200}{0,77} = 1558 \text{ Nm}$$

Y con esta consideración la potencia quedará:

$$P \geq 1558 \frac{60 \times 50}{2} \frac{2\pi}{60} = 245 \text{ kW}$$

que correspondería a un motor de 250 kW.

Los resultados calculados anteriormente varían si en lugar de un motor de dos pares de polos se selecciona uno de tres. Para 3 pares de polos y el mismo rango de variación de velocidad, para la versión blindada autoventilada se tendrá (curva "a") una relación de cupla del 75% y 63% respectivamente para 700 y 1600 rpm, entonces:

$$T_N > \frac{1200}{0,63} = 1900 \text{ Nm}$$

$$P > 1900 \frac{3000}{3} \frac{2\pi}{60} = 198 \text{ kW}$$

Para un motor con ventilación separada se obtiene de la curva "c" los valores de 95% para 700 rpm y 67% para 1600 rpm, que resulta en:

$$T_N \geq \frac{1200}{0,67} = 1790 \text{ Nm}$$

$$P > 1790 \frac{3000}{3} \frac{2\pi}{60} = 187 \text{ kW}$$

lo que conduce a especificar un motor de 200 kW y 3 pares de polos. Obsérvese que en este caso también un motor de dos pares de polos e igual potencia podría funcionar, sin embargo, es siempre preferible especificar el de mayor número de polos pues a igualdad de otros parámetros, presenta mayor par de arranque.

Sin variación electrónica de velocidad, para girar a 1600 rpm se tienen dos opciones: un motor de 4 polos (1470 rpm) más un acoplamiento a correas o engranaje o un motor de 2 polos (2940 rpm) y reducción. La potencia del motor debería ser de 201 kW más el rendimiento del conjunto motor acoplamiento que se puede considerar en el orden del 85 % resultando un motor de 250 kW.

Si se incorpora variación electrónica de velocidad y se adecua al motor un sistema de enfriamiento externo (por ejemplo soplador centrífugo de 2 kW) se puede elegir un motor de menor potencia tal como el de 200 kW, 3 pares de polos, 990 rpm de velocidad nominal. Observando las características T-Ω para este motor resulta que  $T_{\max}$  es mayor de 1700 Nm por lo que el motor podrá arrancar sin problemas.

Resta verificar si el motor de 200 kW será capaz de acelerar la cinta de 700 a 1600 rpm en 15 segundos. Para este fin aplicamos la fórmula de cupla dinámica, conociendo que  $J_{\text{motor}} = 10,5 \text{ kgm}^2$  y  $J_{\text{carga}}$  referida al motor  $30 \text{ kgm}^2$ , lo que resulta:

$$\Delta T = \frac{2\pi}{60} J \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{2\pi}{60} (10,5 + 30) \frac{(1600 - 700)}{15} = 254 \text{ Nm}$$

y este valor debe ser adicionado a la cupla de carga nominal (1200 Nm) cada vez que se quiera acelerar la carga de 700 a 1600 rpm. El motor elegido, por lo tanto, debe satisfacer  $T_{\max} \geq (1200 + 254) \text{ Nm}$ .

## 7. TABLA DE CONTENIDO

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 1. Las máquinas eléctricas                                    | 2  |
| 1.1. Definición                                               | 2  |
| 1.2. Potencia                                                 | 2  |
| 1.3. Los generadores eléctricos                               | 4  |
| 1.4. Los motores eléctricos                                   | 5  |
| 1.4.1. Descripción General                                    | 5  |
| 1.4.2. Tipos de motores                                       | 5  |
| 1.4.3. Curvas características de un motor                     | 6  |
| 1.4.4. Determinación de la velocidad de funcionamiento        | 7  |
| 2. El motor asincronico trifasico                             | 8  |
| 2.1. Principio de funcionamiento                              | 8  |
| 2.2. Característica cupla-velocidad                           | 9  |
| 2.3. Circuito equivalente                                     | 10 |
| 2.4. Cupla, potencia y rendimiento                            | 11 |
| 3. Control de velocidad del motor asincrónico trifásico       | 15 |
| 3.1. Aplicación de la variación de velocidad                  | 15 |
| 3.2. Descripción de las técnicas utilizadas                   | 15 |
| 3.3. Variación en la tensión de alimentación                  | 16 |
| 3.4. Control de frecuencia con flujo constante                | 16 |
| 4. Técnicas electronicas de variación de la frecuencia        | 19 |
| 4.1. Los convertidores                                        | 19 |
| 4.1.1. Rectificador                                           | 19 |
| 4.1.2. Circuito intermedio                                    | 21 |
| 4.1.3. Ondulador con modulación de anchura de pulso           | 21 |
| 4.1.4. Ventajas de los convertidores PWM                      | 23 |
| 5. los variadores de velocidad                                | 24 |
| 5.1. Familias de productos                                    | 24 |
| 5.2. Composición de un variador de velocidad                  | 25 |
| 5.3. Comando, Ajuste y configuración                          | 25 |
| 5.4. Conexiones                                               | 29 |
| 5.5. Recomendaciones para la instalación                      | 30 |
| 5.6. Funciones disponibles                                    | 31 |
| 5.6.1. Controles de la velocidad disponibles                  | 31 |
| 5.6.2. Control por variación de frecuencia                    | 32 |
| 5.6.3. Regulación vectorial:                                  | 32 |
| 5.6.4. Arranque suave del motor                               | 33 |
| 5.6.5. Unidad de frenado                                      | 34 |
| 6. Criterios para la selección de convertidores de frecuencia | 35 |
| 6.1. Análisis de cargas mecánicas típicas                     | 35 |
| 6.2. Capacidad térmica del conjunto convertidor-motor         | 37 |
| 6.3. Selección del motor y convertidor                        | 38 |
| 6.3.1. Ejemplo de aplicación                                  | 38 |
| 7. Tabla de contenido                                         | 41 |