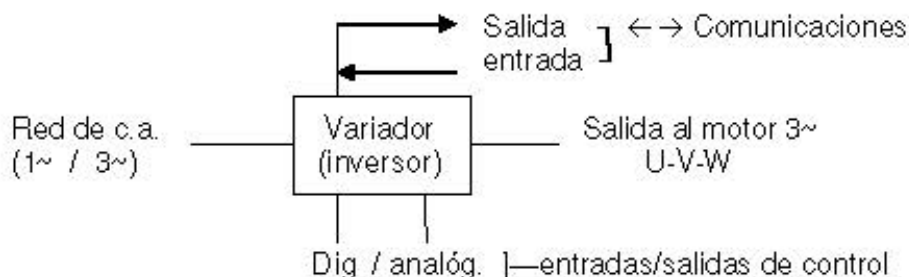




Variadores de frecuencia

Conceptos y definiciones básicas

Variadores de frecuencia: se trata de dispositivos electrónicos, que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción; los hay de c.c. (variación de la tensión), y de c.a. (variación de la frecuencia); los más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin bobinar (jaula de ardilla). También se les suele denominar *inversores* (inverter) o variadores de velocidad.



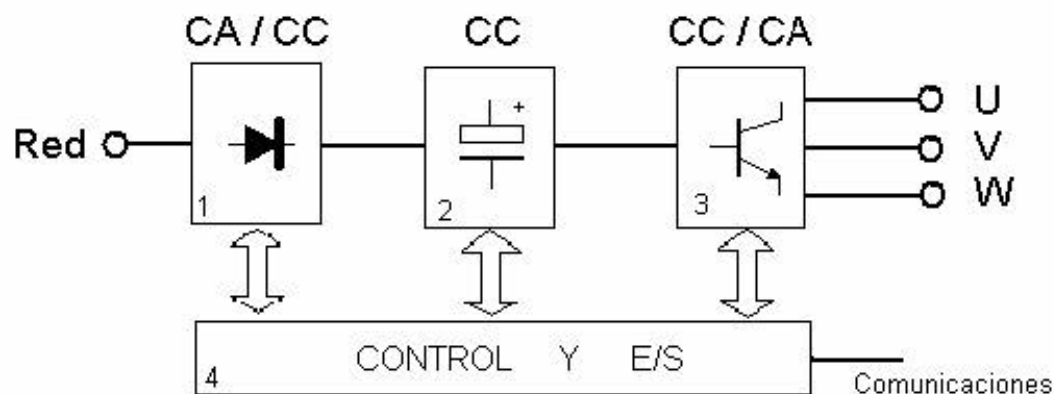
Red de suministro: acometida de c.a., monofásica en aparatos para motores pequeños de hasta 1,5 kw (2 C.V. aprox), y trifásica, para motores de más potencia, hasta valores de 630 kw o más.

Entradas y salidas (E/S ó I/O): diferentes conexiones de entradas y salidas de control; pueden ser digitales tipo *todo o nada* (contactos, pulsadores, conmutadores, contactos de relé...) o analógicas mediante valores de tensión (0...10 V o similares) e intensidad (4...20 mA o similares). Además puede incluir terminales de alarma, avería, etc.

Comunicaciones: estos dispositivos pueden integrarse en redes industriales, por lo que disponen de un puerto de comunicaciones, por ejemplo RS-232, RS-485, red LAN, buses industriales (Profibus...) o conexiones tipo RJ-45 o USB para terminales externos y ordenadores. Cada fabricante facilita el software de control, directo o mediante bus de comunicaciones. Que permitirá el control, programación y monitorización del variador (o variadores) en el conjunto de aparatos de control empleados.

Salida: conexión al motor, generalmente de tres hilos (U-V-W) para conexión directa en triángulo o estrella según la tensión del motor.

DIAGRAMA EN BLOQUES DE UN VARIADOR:





Taller Especialidad Electromecánica

Curso: 6 to Año "A y E"

1.- Rectificador: partiendo de la red de suministro de c.a., monofásica o trifásica, se obtiene c.c. mediante diodos rectificadores.

2.- Bus de continua: condensadores de gran capacidad (y a veces también bobinas), almacenan y filtran la c.c. rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable, y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.

3.- Etapas de salida: desde la tensión del bus de continua, un *ondulador* convierte esta energía en una salida trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. Como elementos de conmutación, se usan principalmente transistores bipolares (BJT), CMOS o similares, IGBT, tiristores (SCR), GTO... etc. Las señales de salida, se obtiene por diversos procedimientos como *troceado*, mediante ciclo convertidores, o señales de aproximación senoidal mediante *modulación por anchura de impulsos* PWM.

4.- Control y E/S: circuitos de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación... y entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además se incluye el *interfaz* de comunicaciones con buses u otros dispositivos de control y usuario.

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE VARIADORES PARA MOTOR TRIFÁSICO

Velocidad (n): la velocidad en el eje de un motor asíncrono en rpm, depende del número de polos magnéticos del motor, y la frecuencia f (Hz), de la red de suministro:

$$n = 60 \frac{f}{2p}$$

donde: n = velocidad en rpm
 f = frecuencia de la red en Hz
 $2p$ = número de pares de polos del motor

Ejemplo, para red de 50 Hz:

$2p = 1$; $n = 3000$ rpm $2p = 2$; $n = 1500$ rpm $2p = 3$; $n = 1000$ rpm...etc.

La velocidad *real* de giro siempre es menor que la expresada, al ser motores *asíncronos*. La diferencia entre n_{SINCRONA} y $n_{\text{ASINCRONA}}$, se denomina *deslizamiento*, (σ ó s) que se expresa en porcentaje de rpm o en valor absoluto:

$$\left. \begin{array}{l} n_{\text{SINCRONA}} = 1500 \text{ rpm} \\ n_{\text{ASINCRONA}} = 1440 \text{ rpm} \end{array} \right\} \text{deslizamiento: } \sigma = 4\% \text{ ó } 60 \text{ rpm}$$

Los motores se fabrican para una velocidad nominal o de trabajo determinada, pero mediante el variador de frecuencia dicha velocidad puede controlarse de manera progresiva. Por ejemplo, un motor de 50 Hz y 1500 rpm (4 polos), podría girar, con variación de frecuencia entre 5 y 120 Hz a velocidades comprendidas entre:

$$\begin{aligned} n &= (60 \cdot 5) / 2 = 150 \text{ rpm} \\ \text{y} \\ n &= (60 \cdot 120) / 2 = 3600 \text{ rpm} \end{aligned}$$

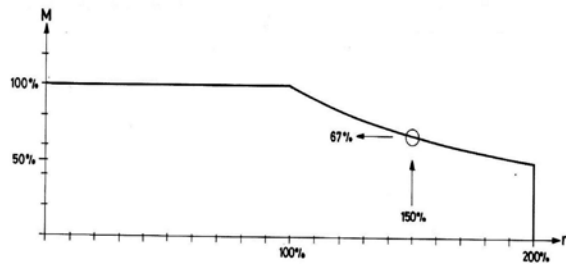




Taller Especialidad Electromecánica

Curso: 6 to Año "A y E"

Sobre-velocidad: el variador puede proporcionar frecuencias de salida superiores a la de trabajo del motor, lo que le hace girar a mayor velocidad que la nominal. La curva de par, para velocidad de trabajo mayor de la nominal, disminuye, de manera que con velocidad doble (200%) el par cae a la mitad del nominal. La sobre velocidad es útil en aplicaciones que no requieren mucho par, como por ejemplo sierras de disco, pero si altas velocidades. En estos casos es importante tener en cuenta las características de par y temperatura de trabajo del motor.



Par transmitido por el eje (par motriz): la fuerza de tracción del motor a través del eje, depende principalmente de las expresiones siguientes:

$$T = 9550 \frac{P}{n}$$

$$T = K \left(\frac{U}{f} \right)^2$$

donde: T = par motriz (también suele usarse M o Mm)
 K y 9550 = constantes
 U = tensión aplicada al inductor (estator)
 f = frecuencia en Hz
 P = potencia del motor en kW
 n = velocidad (real) de giro del motor en rpm



Por otro lado, el flujo magnético en los polos del motor (Φ), depende de la tensión:

$$U = K \cdot \Phi \cdot f \Rightarrow \text{el flujo magnético: } \Phi = K \left(\frac{U}{f} \right)$$

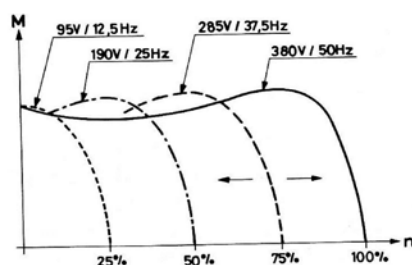
Es decir, el par depende *directamente* del flujo magnético, por lo que para obtener el control del par, hay que operar sobre este parámetro; por ello, si tenemos en cuenta las relaciones de par y velocidad:

Par constante = flujo constante, en consecuencia: $\frac{U}{f} = cte$

El factor $\frac{U}{f}$ tiene especial importancia en la forma de configurar un variador, ya que de ahí dependerá el par motriz desarrollado por el motor, sin importar la velocidad de giro.

Además, de la primera expresión de T, vemos que el par es proporcional a U^2 , de manera que si U/f es constante, el par dependerá de manera directa de la tensión: $T \propto U^2$

Ejemplo de curvas par-velocidad para par constante:



Motor de 380V y 50 Hz, para diferentes velocidades:

$$380/50 = 7,6$$

$$285/37,5 = 7,6$$

$$190/25 = 7,6$$

$$95/12,5 = 7,6$$

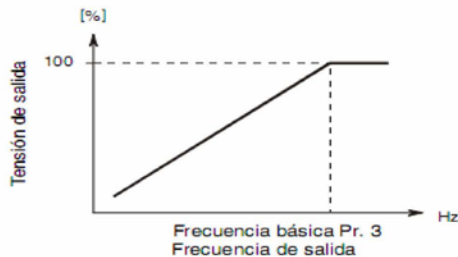
$$\left. \begin{array}{l} 380/50 = 7,6 \\ 285/37,5 = 7,6 \\ 190/25 = 7,6 \\ 95/12,5 = 7,6 \end{array} \right\} (U/f) = \text{constante}$$



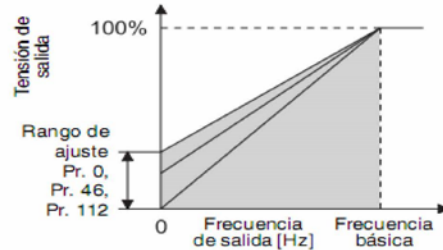
Taller Especialidad Electromecánica

Curso: 6 to Año "A y E"

Tensión de arranque inicial: en el arranque de un motor con carga, es necesario aplicar un cierto par inicial mínimo, para garantizar que el motor empiece a girar. Esto se consigue, iniciando la marcha con un valor de tensión determinado U_{INI} , de acuerdo a las relaciones (U/f) y T_{INI} vistas en el apartado anterior:



$U/f = \text{constante}$ ($U_{INI} = 0$)



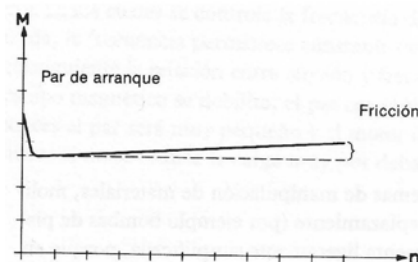
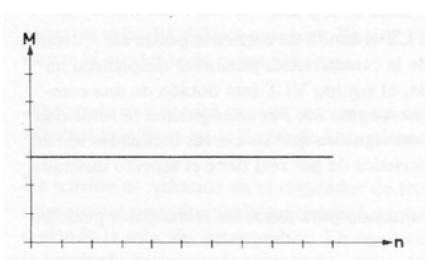
Arranque con $U_{INI} > 0$ (T_{INI})

La variación del par debe ser cuidadosa, para no exceder las características del motor ni sobrecargar el propio variador, especialmente en el arranque, ya que podría circular una intensidad de corriente elevada, y eso no lo permite el variador.

Cuando el motor gira en las dos direcciones, el control del par puede ser igualmente importante, como por ejemplo un montacargas en subida y bajada con carga. En el primer caso, el control del par permite el arranque e inicio de la marcha, y en el segundo, hace la función de retención de la carga evitando el embalamiento del motor en la caída. (En cualquier caso, el variador no puede realizar las funciones de freno-motor; debiéndose instalar un freno-motor, de retención mecánica tipo magnético, disco, zapata, etc.)

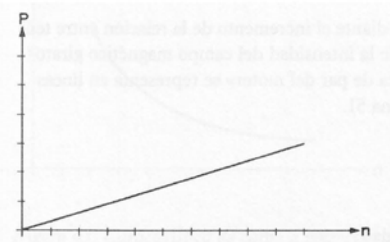
Características de carga típicas:

- i) Par de carga constante: $T = \text{cte}$; se da en sistemas que tienen siempre (o aproximadamente) el mismo par resistente, como molinos, bombas de pistón, transportadoras en carga (cintas, elevadores, sinfines...). Las curvas de par-velocidad (teórica y real) pueden ser las siguientes:



En el arranque (real) puede ser necesario un sobre par para vencer la fuerza de rozamiento del sistema, parado con carga. (El sobre par debe programarse de acuerdo a las necesidades y posibilidades del variador, ya que puede incrementar excesivamente el valor de I_N)

La potencia necesaria aumenta proporcionalmente a la velocidad, por lo que se produce una aceleración lineal hasta lograr la velocidad nominal o de trabajo.

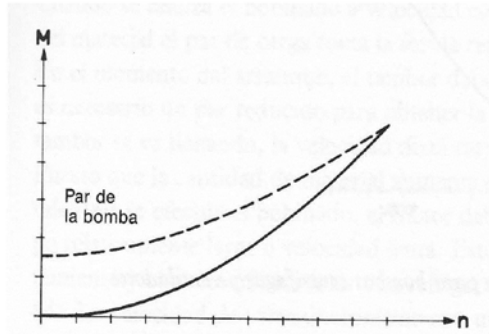




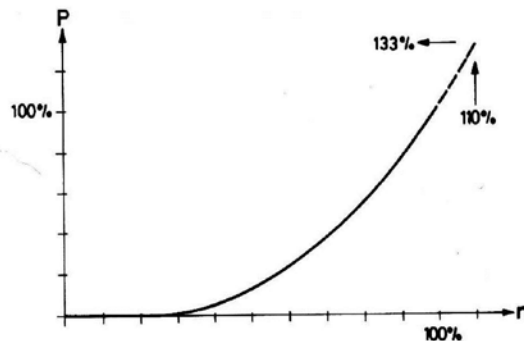
Taller Especialidad Electromecánica

Curso: 6 to Año "A y E"

ii) Par de carga cuadrático: $T \propto n^2$; el par es proporcional al cuadrado de la velocidad. Es decir, inicialmente muy bajo, va creciendo de forma cuadrática al aumentar la velocidad. Esta característica se da en ventiladores, motores de bombas centrífugas, etc.



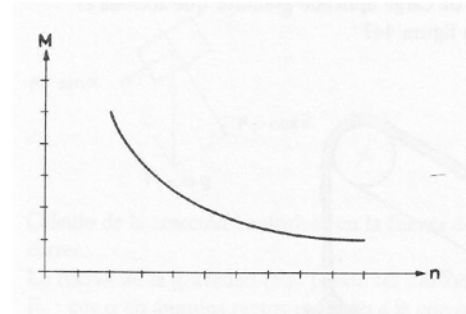
Par de carga cuadrático (bomba)



Demanda de potencia (bomba)

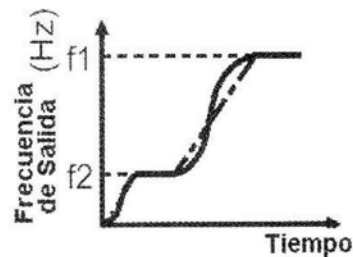
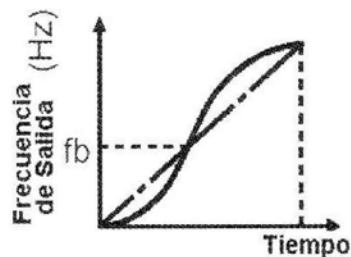
iii) Potencia constante: ($P = M \cdot \omega \rightarrow \text{cte}$); al contrario que antes, el par disminuye al aumentar la velocidad, para mantener la potencia constante.

Este tipo de demanda, se da en máquinas herramienta (corte), bobinadoras, laminación, etc. A veces se aprovechan las características de sobre-velocidad para mejorar las posibilidades del proceso, si el par necesario no es alto.



Otros parámetros y características:

Variación de la frecuencia tipo S y doble S: se combina una variación proporcional-lineal en 1 ó dos pasos, de modo que primero la frecuencia de salida aumenta de forma progresiva, y después de manera mas rápida. El punto de inflexión de la "s" se da la máxima aceleración:



Golpe de ariete: se da en sistemas de elevación de agua o fluidos, mediante bombas. Si durante la marcha normal, se produce el paro repentino del motor (electrobomba), la columna de agua o fluido en ascenso, tiende a "caer", comprimiendo al resto de fluido del tubo y produciendo un efecto de compresión-expansión (tipo yo-yo) que puede deformar o agrietar el tubo o los componentes. La manera de evitarlo mediante un variador, es aplicando un arranque y parada controlados (aceleración-deceleración lineales) para que la presión ejercida sobre la columna de fluido, varíe suavemente. En caso de avería, falta de tensión o parada inesperada, es conveniente que el sistema disponga de otros tipos de protección de seguridad (válvulas de asiento o similares).

Taller Especialidad Electromecánica
Curso: 6 to Año “A y E”

Protección del motor y variador

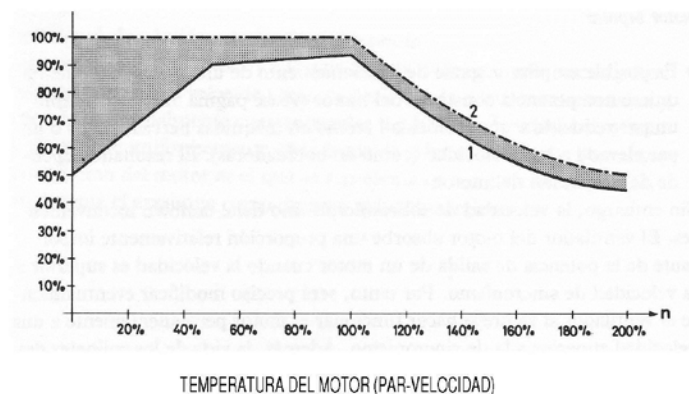
- Los variadores proporcionan un valor de intensidad nominal I_N en condiciones de trabajo normales, y permiten una cierta sobrecarga de breve duración. No se producen *picos* o *puntas* de arranque elevadas. (Consultar la documentación del variador).

Ejemplo: Valor de I_N ; sobrecarga: 200 % ($t \leq 0,5$ s)
150 % ($t \leq 60$ s)

- Se incluyen las funciones del relé térmico de sobrecarga y propias del variador: falta de fase, temperatura interna, frenado, ventilador... etc. (Configurables)
- Dispone de señales de alarma (contactos o salidas analógicas), y detecta los fallos de fase, inversión, sobre tensión... etc.
- Externamente, es necesario instalar junto al variador un interruptor automático magnético, apropiado a la intensidad nominal a manejar. En los manuales del variador se indica el calibre de la protección, incluidos los fusibles, si se usaran.
- El variador dispone de toma de tierra. Esta toma de tierra, no debe estar en contacto con bornes *comunes* de las entradas o salidas, analógicas y/o digitales. (Observar los esquemas de conexión y advertencias, en los manuales).

Temperatura de trabajo del motor

- Los motores llevan incorporado un ventilador, que refrigera al motor en condiciones normales; al estar instalado en el propio rotor, el ventilador gira a su velocidad; cuando mediante el variador, el motor gira velocidades reducidas, el ventilador pierde eficacia, y en consecuencia, la temperatura del motor puede aumentar excesivamente:



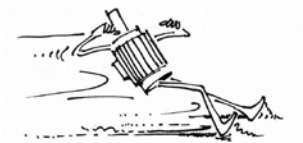
- Cuando la relación par-velocidad se mantiene dentro de la zona 1, la temperatura del motor permanece en valores aceptables; en cambio cuando se le hace trabajar en la zona 2 (par de trabajo mayor del 50%) la temperatura aumenta y debe haber refrigeración suplementaria desde el exterior.
- Algunos motores disponen en su interior de sondas de temperatura (resistencias PTC o similares), que pueden ser usadas con el variador en combinación de los sistemas de detección adecuados, para una protección total del motor.
- Por otro lado, en caso de sobre velocidad, el ventilador interno del motor no es eficaz, ya que aumenta la resistencia por rozamiento con el aire, y tiende a provocar un sobreesfuerzo del propio motor, de manera que se necesitaría refrigeración externa.



Taller Especialidad Electromecánica

Curso: 6 to Año "A y E"

Frenado: el frenado del motor, consiste en el descenso controlado de su velocidad, reduciendo la frecuencia aplicada. Se establece en unidades de tiempo, teniendo en cuenta que el par aplicado, sea constante o variable. Algunos casos de frenado:



- Rampa lineal de parada: se ajusta el tiempo (en s) que debe durar la parada. Generalmente válido a motores con poca carga resistente a la velocidad (detención sin carga resistente o poca inercia).
- Frenado regenerativo: la inercia de la carga, tiende a hacer girar el motor más rápido que la frecuencia establecida por el variador (velocidad hipersíncrona), por lo que el motor actúa como *generador*. La energía que retorna al variador, se disipa mediante una resistencia o un dispositivo de frenado externo (no incluido con el variador).
- En sistemas de gran potencia (tren, grandes grúas de pórtico...), este efecto puede aprovecharse para recuperar parte de la energía, que es devuelta a la red, mediante variadores específicos con recuperación.
- Inyección de c.c.: el variador, puede inyectar durante un breve periodo de tiempo, cierto valor de c.c., que provoca el frenado rápido del motor.
- El bloqueo inesperado del motor (por bloqueo del rotor o fuerte sobrecarga), provocará una intensidad muy elevada, y la parada por sobrecarga del variador, con la activación de alarmas. El restablecimiento podrá ser manual o automático (según programación).
- El frenado o bloqueo del motor una vez parado, debe conseguirse mediante otro procedimiento externo al variador: freno magnético, zapata, disco, etc.

Sentido de giro: el variador puede hacer girar el motor en ambos sentidos; inicialmente si se conecta la secuencia L1-L2-L3 en fase al motor, girará a la derecha; algunos variadores disponen de entradas por contacto (todo-nada) para seleccionar el sentido (STF = start forward, STR = start reverse). También puede hacerse mediante programación, o control externo, sea por pulsadores, autómatas, analógico... etc. El cambio de sentido nunca será brusco, sino mediante rampas de deceleración, parada y aceleración controladas.

Instalación: deben consultarse los manuales de instalación, para alojarlo en armarios, conectar mangueras y cableados, etc. El fabricante, indica las opciones posibles de acuerdo a la aplicación y tipo de variador, desde juegos de cables y terminales, a unidades externas de filtro, frenado, ventilación, consola de programación, comunicaciones... etc.

Manejo y configuración:

- Manual en el propio variador: dispone de una pequeña pantalla (display) y teclas de operación (PU = *programming unit*), que permiten acceder a diferentes menús de configuración, establecer valores o modos de funcionamiento, etc. Muchos parámetros solo pueden configurarse o modificarse, con el motor parado.
- Consola de configuración: es un dispositivo auxiliar, dotado de pantalla y teclado, que permite acceder a todas las funciones del variador. La consola se conecta al variador mediante una toma propia o de comunicación (RJ45, RS485, USB...), una vez realizada la programación, se desconecta y el variador queda configurado para trabajo autónomo.
- Operación fija externa (EXT): se configuran determinadas entradas y salidas, y se instalan en el armario pulsadores, interruptores, selectores o potenciómetros para activar funciones fijas (marcha, paro, velocidades ...) configuradas internamente. Así el operador o técnico responsable, no accede al variador, sino a los controles externos.



Taller Especialidad Electromecánica

Curso: 6 to Año "A y E"

- Panel de operador: consiste en una pantalla (alfanumérica o gráfica) tipo *táctil*, que enlazada con el variador, permite su control total o parcial, de acuerdo a la programación establecida. Por otro lado, en funcionamiento normal, algunos tipos de panel gráfico, pueden ofrecer determinada información, velocidad, par, intensidad o mostrar figuras, diagramas del sistema, etc. (Depende del sistema y especialmente de las comunicaciones y *software*)



- Mediante bus industrial: el variador puede estar conectado a un bus industrial (similar a una red). De manera remota, un ordenador puede ejercer el control, y monitorear las condiciones de trabajo normales y de avería. Se evita la necesidad de un operario que lo manipule y se integra en el proceso industrial de manera automática. El software de control y programación, suele ser facilitado por el fabricante del variador, y en general será compatible, con los buses industriales más utilizados (Profibus...etc.), o sistemas de control automatizado, tipo *scada*.
- De acuerdo con la marca y modelo de variador, los menús y funciones de configuración que presenta, pueden ser:
 - o *Funciones con valores* de configuración (ALTIVAR de telemecánica...)
 - o *Parámetros numerados*, en lugar de nombres de función, a los que se asigna un *valor*
- Inicialmente, el variador viene configurado con todos los parámetros *de fábrica* o *por defecto (default)*, que es necesario revisar antes de la puesta en marcha de una aplicación. Existe la posibilidad de volver de nuevo a los valores de fábrica, en caso de error de configuración o reinicio del variador.

Funciones o parámetros más importantes:

- Red de suministro de alimentación. Potencia del variador.
- Señales de salida: tensión e intensidad adecuada al motor.
- Frecuencias de salida mínima y máxima.
- Tiempo de aceleración y de parada.
- Control del par inicial.
- Protección térmica. Intensidad nominal, sobrecarga y rearme.
- Visualización: indicaciones de la pantalla (frecuencia, intensidad, etc.)
- Señales de alarma y monitoreo
- Entradas/Salidas de control (todo o nada y analógicas)
- Elementos de control (pulsadores, terminales, potenciómetro...)
- Funciones avanzadas
- Ajuste de características del motor (*auto tune*)
- Control de par
- Calibración
- Borrado y reinicio de funciones y parámetros
- Comunicaciones
- Control mediante bucle PI, PID, etc.
- Operación sobre varios motores

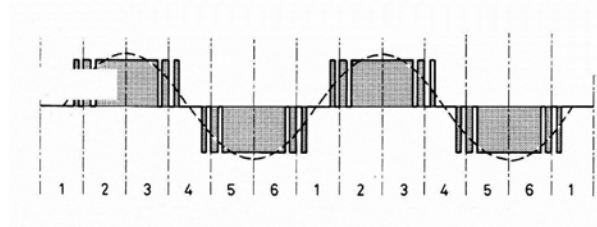


Taller Especialidad Electromecánica

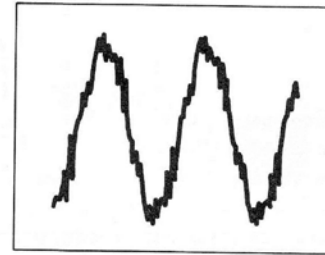
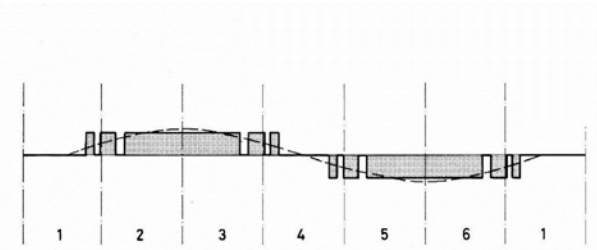
Curso: 6 to Año "A y E"

Señales de salida (formas de onda)

El variador produce tres fases de salida, mediante "troceado" de la continua; para eso se usan transistores o dispositivos de potencia que actuando como interruptores, generan las señales de salida, con valores de tensión y frecuencia variables, según la regulación:



<- señal de salida tipo PWM (*pulse width modulation* o modulación de la anchura de pulso)

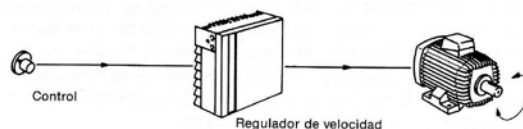


forma de onda *senoidal* de la *intensidad eficaz*

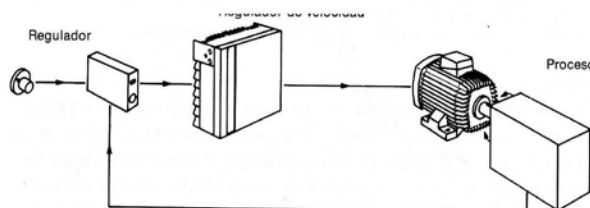
Los diferentes pulsos de la salida, son *fragmentos* de onda rectangular, (con valores positivos y negativos respecto al eje), generan una señal equivalente o tensión *eficaz*, de forma *senoidal*; análogamente la intensidad eficaz es *casi* senoidal. Las frecuencias del *troceado* se pueden ajustar, para reducir ruidos e interferencias producidas por motor y variador. Las casas comerciales suministran, como opción, filtros que pueden instalarse entre en variador y la red de suministro, para evitar que las señales de *ruido* puedan salir a la red y afecten a otros aparatos.

Regulación en lazo abierto o cerrado:

El conjunto variador-motor, se conectan directamente, y el propio variador, basándose en las señales que recibe (intensidad, fases, velocidad, respuesta del motor...) regula todo el proceso según los parámetros fijados. Otra forma de control, es tomando una muestra real del motor (mediante captadores tipo encoder o similares) y realizar el control mediante lazo o bucle cerrado tipo PI, PID etc., que se denomina *servosistema*:



<- Variador motor
(lazo abierto)



<- servosistema
(lazo o bucle cerrado)



Taller Especialidad Electromecánica

Curso: 6 to Año "A y E"

Ventajas de uso del variador (frente al resto de arranques)

- Evita picos o puntas de intensidad en los arranques del motor. (Muy pronunciados en el arranque directo, en estrella-triángulo y medios con arrancadores progresivos).
- El par se controla totalmente a cualquier velocidad, lo que evita saltos o bloqueos del motor ante la carga. (En un arrancador progresivo la regulación del par es difícil, ya que se basa en valores de tensión inicial).
- No tiene factor de potencia ($\cos \phi = 1$), lo que evita el uso de baterías de condensadores y el consumo de energía reactiva (ahorro económico).
- Comunicación mediante bus industrial, lo que permite conocer en tiempo real el estado del variador y el motor, así como el historial de fallos (facilita el mantenimiento).
- Los arranques y paradas son controlados, y suaves, sin movimientos bruscos.
- Protege completamente el motor, el variador y la línea.
- El consumo energético se adapta a la exigencia del motor (ahorro de energía).
- Mediante contactores externos de *bypass* (puente) se puede utilizar un solo variador para el control secuencial de varios motores, tanto en arranque como en parada.

Desventajas:

- La instalación, programación y mantenimiento, debe ser realizada por personal cualificado.
- Si no está bien aislado (con filtros) o instalado, puede derivar ruidos e interferencias en la red eléctrica, que podrían afectar a otros elementos electrónicos cercanos.
- Para aplicaciones sencillas puede suponer mayor inversión, que un sistema simple (contactor-guardamotor), si bien a la larga se amortiza el gasto suplementario, por el ahorro energético y de potencia reactiva que aporta el variador.
- Las averías del variador, no se pueden reparar *in situ* (hay que enviarlos a la casa o servicio técnico). Mientras tanto debe disponerse de otro variador equivalente, o dejar la instalación sin funcionamiento.

