



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Incidencias importantes a tener en cuenta en las aplicaciones de variadores de frecuencia

<b>Apellidos, nombre</b>	Pérez Cruz, Juan (juperez@die.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Ingeniería Eléctrica
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Valencia



## 1 Resumen

Dado que las aplicaciones de motores de inducción con regulación de velocidad son muy frecuentes, y para ello se utiliza los variadores de frecuencia, en este artículo **se hace un análisis de los inconvenientes y posibles problemas que genera la utilización de los variadores de frecuencia, algunos de ellos incluso con peligro para las personas e instalaciones.** Dicho análisis se apoya en una serie de ondas de tensión y corriente experimentales que aparecen tanto a la entrada como a la salida del variador de frecuencia, ondas con las que el alumno que vaya a emplear este equipo es conveniente que se familiarice.

## 2 Introducción

Con este trabajo se pretende acercar a los alumnos y lectores al equipo de regulación y control más utilizado en la industria eléctrica, y en general en los procesos de fabricación que precisen de regulación de velocidad variable, que es sin duda es el variador de frecuencia.

Este equipo es utilizado asimismo en el entorno domestico. Son ejemplo de este uso los ascensores de viviendas o de grandes almacenes y/o grandes superficies de tiendas, o las escaleras mecánicas (estaciones de metro, etc).

Por tanto como es un equipo con una amplia aplicación industrial y dado que normalmente los usuarios desconocen la repercusión que puede tener sobre las instalaciones y las máquinas donde se instalan, se ha considerado de vital importancia que los usuarios conozcan dichas repercusiones que pueden incidir incluso en riesgo de accidentes.

## 3 Objetivos

- Identificar las partes importantes de un variador de frecuencia y describir su funcionamiento básico.
- Describir las formas de onda (de tensión y corriente) tanto a la entrada como a la salida del variador de frecuencia y su repercusión en las instalaciones y en las máquinas alimentadas.
- Indicar una serie de actuaciones que permitan trabajar de modo seguro en las aplicaciones que intervengan los variadores de frecuencia.

## 4 Desarrollo

El trabajo a desarrollar se plantea desde varias perspectivas. En una de ellas se tratará de efectuar un análisis de la composición y funcionamiento de las etapas de potencia, de manera que permita la justificación básica del comportamiento de este tipo de equipos desde el punto de vista del motor asíncrono convencional que suelen alimenta, como la demanda de energía desde la red de alimentación. Otra apartado se dedica al análisis y las correspondientes consecuencias de las tensiones obtenidas desde el variador de frecuencia y aplicadas al motor.



## 4.1 Justificación de uso de un variador de frecuencia

Los variadores de frecuencia permiten modificar la frecuencia que se aplica a un motor eléctrico de inducción (también denominado como motor asíncrono, que en la práctica totalidad de aplicaciones se construyen con el rotor en jaula de ardilla). Son motores muy robustos, sin duda los más baratos del mercado y además requieren de un mantenimiento mínimo. Todos estos motivos son los que hacen de esta máquina la más utilizada en la industria. Sin embargo tiene la dificultad de que la velocidad de funcionamiento no es regulable, y viene fijada por la aplicación. La velocidad de giro es la que corresponde al punto en el que se igualan el par motor y el par resistente. Es fácil entender esta conclusión mediante un gráfico, ver figura 1.

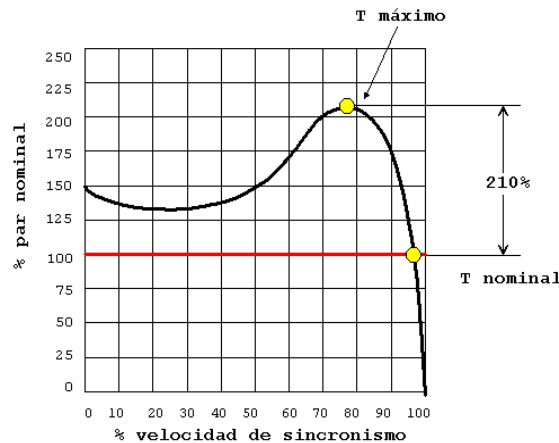


Figura 1.- Curva de par velocidad de un motor asíncrono

En la gráfica anterior (figura 1), mediante la línea horizontal se representa el posible par resistente de una máquina (constante, por ejemplo un ascensor). La otra curva representa el par de un motor asíncrono, siendo el punto de cruce de ambas el que determinaría la velocidad de funcionamiento del conjunto motor máquina. El valor 100% representaría la velocidad del campo magnético (conocida como velocidad de sincronismo) que es el que realmente "arrastra" al rotor para hacerlo girar, como se aprecia, a una velocidad cercana a la de sincronismo. La velocidad de sincronismo se calcula mediante la ecuación 1:

$$n_s = 60 \cdot f / p$$

Ecuación 1. Definición de la velocidad de sincronismo.

Donde " $n_s$ " es la denominada velocidad de sincronismo, " $f$ " la frecuencia de la red (en Europa vale 50 hercios), y " $p$ " es el número de pares de polos. Este número de pares de polos se determina mediante la distribución de las bobinas del motor y una vez el motor construido queda fijado.

Si se emplea un variador de frecuencia lo que se puede cambiar es esta velocidad de sincronismo, por lo que la respuesta de un motor industrial alimentado con un variador de frecuencia puede tener " $n$ ", curvas de par velocidad, ver figura 2

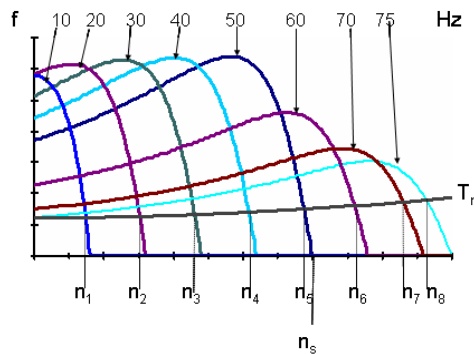


Figura 2.- Familia de curva de par velocidad de un motor asíncrono alimentado mediante un variador de frecuencia

Como se puede apreciar hasta la curva " $n_5$ " se puede ver que se trata de curvas prácticamente iguales, pero desplazadas en la escala de velocidades, por lo que se puede obtener diferentes velocidades de sincronismo. Para valores de frecuencias superiores a la de la curva " $n_5$ ", además de variar la velocidad de sincronismo se puede observar que el par disponible suele ser menor. En los apartados siguientes se justificará este efecto o posible problema. Para una curva " $T_r$ " que representa el par resistente, se puede observar que para valor de frecuencia se obtendría un valor de velocidad de funcionamiento diferente.

Se podría añadir que realmente el conjunto formado por un variador de frecuencia y un motor de inducción funciona relativamente bien a regulación de frecuencias cercanas a la de la red. Así se podría representar un gráfico (ver figura 3) del par motor en función de la frecuencia de salida del variador.

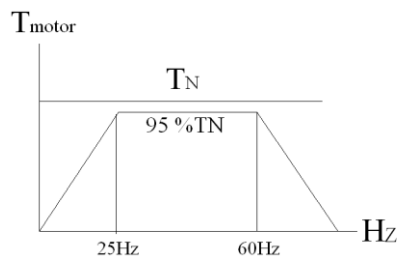


Figura 3. Par en un motor al estar alimentado a través de un variador de frecuencia

Es decir a frecuencias bajas se obtiene unos bajo rendimientos de par, a altas frecuencias también y en un tramo central, el par obtenido alcanzaría casi el que se dispondría si el motor se alimentase directamente desde la red.

## 4.2 Funcionamiento de la etapa de potencia de un variador de frecuencia.

En el funcionamiento básico de la etapa de potencia normal en un variador de frecuencia es el siguiente: este equipo toma energía de una red convencional (redes de alterna a 50 hercios) y la convierte en una red a corriente continua (para ello utiliza un puente rectificador). Una vez en continua se filtra el valor de la



tensión (para ello utiliza un condensador o grupo de condensadores), y por último desde la continua obtiene una nueva red de alterna (no senoidal) a frecuencia variable (para ello utiliza el inversor). Un ejemplo sencillo podría ser el de la figura 4. EL equipo representado mediante el esquema estaría alimentado desde una red monofásica.

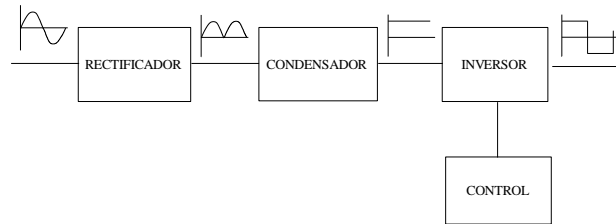


Figura 4.- Conjunto básico de las etapas de potencia de un variador de frecuencia

El inversor aplica la tensión del bus de continua a cada una de las fases alternando la polaridad de la misma a la frecuencia preestablecida. En el caso de una máquina trifásica, como el motor de inducción, se añade un decalaje temporal entre fases consecutivas igual a  $1/3$  del periodo de la onda de tensión. Para ello el inversor que se monta se repite tres veces (ver figura 5), es decir se repite un conjunto por cada fase.

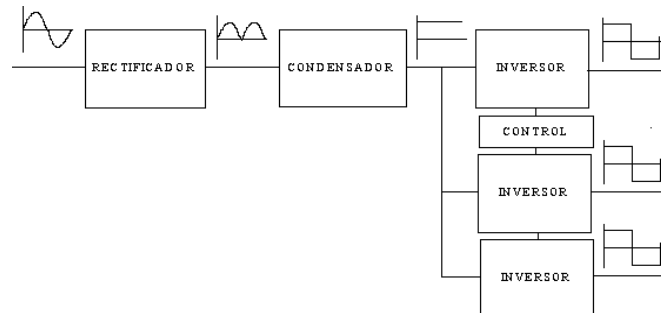


Figura 5.- Detalle de la salida trifásica de un variador de frecuencia

Solo añadir que en muchos equipos, las dos etapas primeras están configuradas de forma que se puedan obtener dos niveles de continua en la etapa de condensadores o en "bus de continua", por lo que a la salida se pueden obtener para cada una de las fases dos posibles niveles de tensión. No se considera oportuno profundizar en este concepto.

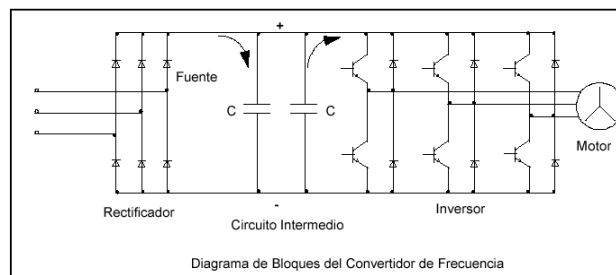


Figura 6.- Configuración de las etapas de potencia de un variador de frecuencia



Por último destacar que también aparece es ambos esquemas una etapa de control que suele estar formada por componentes electrónicos, incluso con la participación de una CPU. Esta etapa de control es la encargada de disparar a los semiconductores del "inversor" de forma adecuada para obtener el resultado previsto en función de una serie de parámetros que se le deben de ajustar, y de las medidas de los valores de tensión y corriente que esté aportando el variador de frecuencia. Esta etapa queda fuera del alcance de este texto.

### 4.3 Onda de tensión de salida del variador de frecuencia

La onda de salida del variador de frecuencia no se compone de dos semiondas cuadradas (positiva y negativa). En las máquinas eléctricas hay una importante relación entre el flujo y la tensión, indicada en la ecuación 2.

$$E = 4.44 \cdot f_1 \cdot N_s \cdot \theta_m \rightarrow \theta_m = \frac{1}{4.44 \cdot N_s} \cdot \frac{E}{f_1}$$

*Ecuación 2. Definición de la fuerza electromotriz de la máquina eléctrica.*

donde "E" es la fuerza electromotriz de la máquina, que prácticamente es similar a la tensión aplicada a la máquina, "Ns" es el número de conductores (espiras) de la bobina u grupo de bobinas que forman una fase, y una vez construido el motor es invariable; "Φ" es el flujo magnético, que establece el par nominal del motor, y que regimen permanente se debe de mantener prácticamente constante; y "f" es la frecuencia de la tensión aplicada. Por lo tanto si la tensión aplicada a un motor fuese constante (como ocurre al alimentar un motor desde una red convencional), si se variase la frecuencia se variaría el flujo, alterando el par.

Por lo tanto, si se modifica la frecuencia se debe OBLIGATORIAMENTE la tensión aplicada, por lo que un variador de frecuencia debe regular simultaneamente tanto la frecuencia como la tensión siguiendo la ecuación 2. Para ello, el variador de frecuencia lo que realiza es un "troceado" de la señal de salida, es decir en cada semionda realmente lo que se hace es dejar pasar solo parte de cada una de esas semiondas. Como resulta que la tensión eficaz que tiene una semionda es proporcional al area que queda encerrada dentro de la señal, si solo se deja pasar parte de la señal lo que realmente se está haciendo es ajustando el valor de la tensión de salida de forma que sea proporcional a el ajuste de la frecuencia. Así la onda teórica que debería generar el variador sería la de la figura 7.

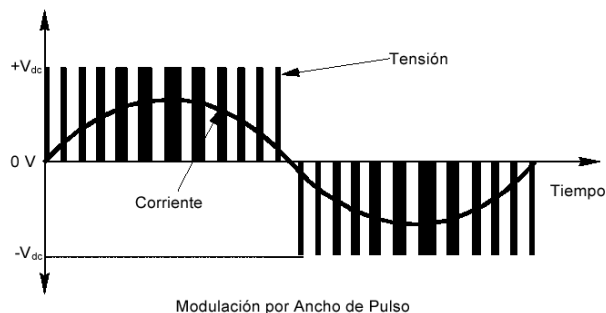


Figura 7.- Onda teórica de salida de un variador de frecuencia



Se puede apreciar que las zonas de conducción de cada uno de los pequeños tramos son diferentes: al inicio y al final de cada semiperiodo existe una menor tensión, siendo los tramos en conducción más amplios en el centro de cada semionda. Así se consigue minimizar el contenido de armónicos de la onda de corriente, mejorando el rendimiento del motor. Una imagen obtenida de la tensión y de la corriente que se presenta en un motor asíncrono alimentado mediante un variador de frecuencia es la de la figura 8.

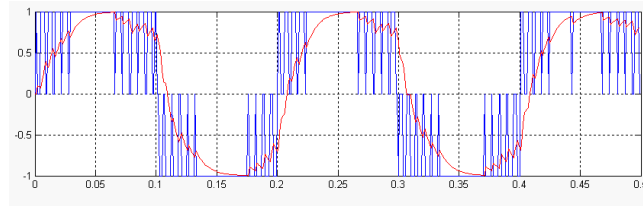


Figura 8.- Onda de tensión y corriente a la salida de un variador de frecuencia

Se aprecia que hay una onda (la de corriente, en rojo) que tiende a una senoidal y otra onda (la de tensión) que aparece como una onda cuadrada y troceada. A esto se le conoce como "modulación de ancho de pulso", que en muchas publicaciones se denota por las siglas en inglés "PWM".

Si recordamos en el apartado anterior (4.1) se observaba que los motores, a frecuencias altas se produce una bajada importante en el par entregado (ver figuras 2, y 3). La razón de esta bajada a altas frecuencias radica en que la regulación de tensión puede llegar a un máximo valor (dejar pasar toda la semionda cuadrada) y si se precisa subir la velocidad del motor más (subiendo aún más la frecuencia de salida), sin poder añadir más tensión se produce un debilitamiento del flujo y por tanto del par aportado (ver ecuación 1).

En el párrafo anterior, se ha denotado una importante carencia de los variadores de frecuencia. Vamos a analizar otras más de importante trascendencia:

- **Todas las pares metálicas de un motor eléctrico, e incluso partes metálicas cercanas al motor están sujetas al flujo creado por la tensión (ecuación 2), y como podemos apreciar como la regulación de tensión necesaria es a base de conexiones y desconexiones de la alimentación, realmente lo que se produce es una serie de armónicos de tensión de alta y muy alta frecuencia, que se solapan con el armónico fundamental, pero que tiene un efecto MUY PELIGROSO. En la ecuación (2) si aplicamos un armónico de alta frecuencia, es claro que a mayor frecuencia mayor "E" (que es la fuerza electromotriz o tensión que se induce o se crea en estas partes metálicas tanto del motor como otras partes metálicas cercanas), pudiendose mediar tensiones con valores mucho mayores de 50 voltios, que es la tensión máxima que denota que una instalación es segura. Es decir se pueden encontrar tensiones que pueden generar accidente con un alto riesgo. La única manera de evitarlo es la conexión a una muy buena puesta a tierra de todas las partes metálicas que puedan ser afectadas.**
- Una segunda consecuencia a considerar que justifica también lo representado en la figura 3, es que las pérdidas en los circuitos magnéticos son



proporcionales a la frecuencia de la tensión de alimentación. Si en el párrafo anterior ya se ha indicado que aparecen armónicos con frecuencia altas, es lógico pensar que estos armónicos tienden a generar flujos de alta frecuencia que generar unas pérdidas adicionales a las propias del motor, por lo tanto el rendimiento del motor baja con estos equipos.

Por último se exponen sendas gráficas en la figura 9, con el oscilografiado de un par de ejemplos que corroboren lo expuesto anteriormente.

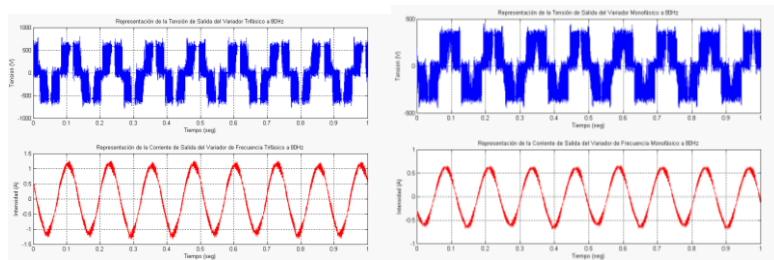


Figura 9.- Gráficas de dos puntos de funcionamiento de un variador de frecuencia

En las gráficas de la figura 9, las ondas superiores son las relativas a la tensión mientras que las inferiores son las de la corriente que prácticamente son senoidales, siendo esto debido al carácter de filtro de armónicos que supone el uso de bobinas, y como los motores son composición de grupos de bobinas, por eso aunque la tensión es de onda muy diferente a una senoide la bobina convierte la falta de senoidalidad a una casi senoide en la corriente.

#### 4.4 Onda de tensión y corriente a la entrada de salida del variador

La entrada de un variador de frecuencia, se realiza desde una red convencional de alterna (a 50 hercios en Europa). Esta red puede ser tanto monofásica como trifásica, la diferencia entre una y otra opción es la tensión máxima conseguida en el bus de continua, que en todo caso es la tensión eficaz aplicada por la raíz de 2 ( $U \cdot \sqrt{2}$ ). Para el caso de una red monofásica la tensión suele ser 230 voltios y en el caso de redes trifásicas suele ser de 400 V.

Se sabe que los puentes rectificadores lo que hacer es convertir los semiperiodos negativos en positivos, y esta tensión rectificada la tratan de mantener en su valor máximo de forma permanente los condensadores. Por ello el valor de la tensión en el bus de continua será sensiblemente diferente al obtenido desde un rectificador monofásico (cerca de los 320 V.), mientras que en la alimentación con una red trifásica se obtendría hasta unos 560 voltios.

El esquema de montaje y funcionamiento de un equipo con rectificador monofásico, es el de la figura 10.



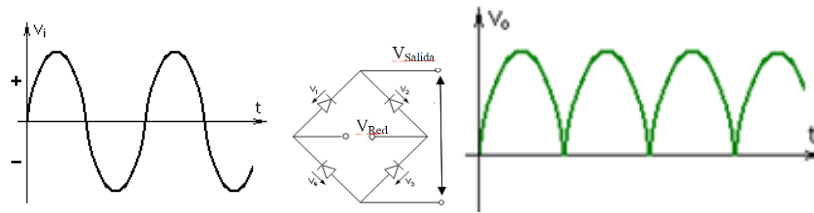


Figura 10.- Alimentación monofásica, rectificador y tensión de salida de rectificador

Para el caso del equipo alimentado desde una red de trifásica el esquema es el de la figura 11.

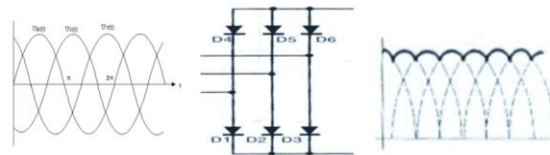


Figura 11.- Alimentación trifásica, rectificador y tensión de salida de rectificador

La utilización de un variador de frecuencia repercute en la red de alimentación. La principal repercusión es que como después del puente rectificador se encuentran la etapa es la de condensadores, que mantienen un valor alto de la tensión, en el bus de continua, entonces solo hay circulación de corriente a través de los diodos cuando la tensión aplicada pasa por sus valores máximos. En la figura 12, se puede apreciar los instantes en los que realmente se toma energía de la red para alimentar al conjunto motor variador, tanto para un equipo alimentado desde una red monofásica como desde una red trifásica.

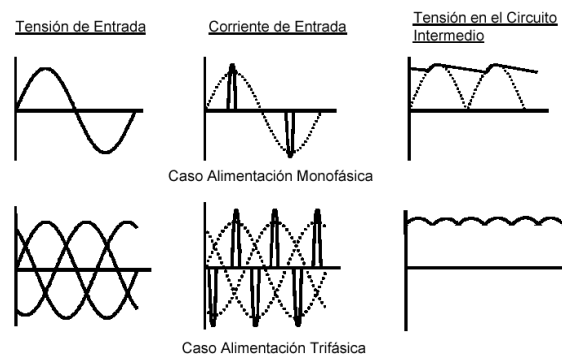


Figura 12.-Tensión y corriente a la entrada de los variadores de frecuencia

La tensión de entrada es prácticamente senoidal ya que esto lo impone la red de alimentación, pero la corriente solo circula durante una parte muy pequeña en cada semiperíodo. Este modo de funcionamiento genera una serie de armónicos en la red de alimentación que son muy perjudiciales para la calidad del suministro eléctrico. Este problema se tiene que remediar a base de filtros formados con la puesta en serie de bobinas apropiadas.

Una segunda repercusión que tienen estos equipos es que en el primer semiperiodo los condensadores se suelen encontrar descargados, y en el primer instante el pico de corriente demanda de la red (para la carga de los potentes condensadores situados en el bus de continua) puede tener un valor tan alto que puede hacer saltar las protecciones del equipo, como si se tratase de un cortocircuito. Por lo tanto en el diseño de las protecciones tiene que tener en cuenta este problema.

Por último, se tiene que considerar que la transmisión de potencia desde la red al convertidor, se produce en un espacio de tiempo muy corto (ver figura 12) dentro de cada semiperiodo. Esto genera valores de corriente de pico mucho mayores que en el caso de una corriente senoidal. Ahora bien, si que hay que hacer notar que la corriente demandada de la red no lleva la parte de energía reactiva que circula al motor, que ahora es proporcionada por los condensadores situados en el bus de continua. Por lo tanto en régimen nominal parte del efecto detectado en la figura 13 queda parcialmente compensado, siendo más efectiva esta compensación cuando el motor está trabajando en vacío o a muy poca carga ya que entonces la componente de reactiva de un motor es grande. Para ilustrar lo anteriormente comentado se aporta dos gráficas oscilografiadas a la entrada de sendos variadores de frecuencia.

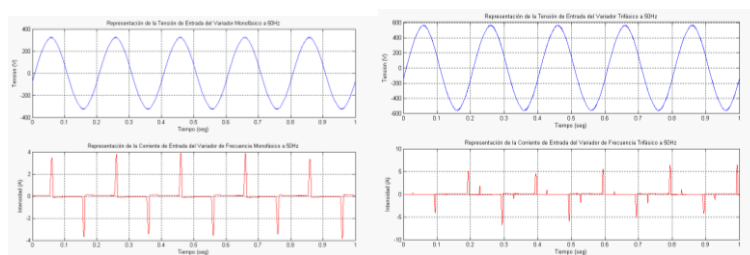


Figura 13.- Gráficas de tensión (superior) y corriente (la inferior) a la entrada de dos variadores de frecuencia

La gráfica de la figura de la izquierda se corresponde con la alimentación de un equipo desde una red monofásica, mientras que la de la derecha es de un equipo alimentado desde una red trifásica. En este último se puede observar que existe en cada ciclo un valor grande de pico de corriente y otros pequeños que son los de conmutación de las fases no oscilografiadas. En ambas figuras las señales superiores son las tensiones y las inferiores las corrientes.

## 5 Cierre

Se puede concluir diciendo que estos equipos son ampliamente utilizados en la industria, e incluso en entornos domésticos muy cercanos (ascensores, bombas de agua, escaleras mecánicas). Que aún siendo muy justificado su uso, no por ello hay que advertir que pueden ser realmente muy peligrosos cuando están funcionando, por lo que es necesario que siempre sean instalados y revisados periódicamente por personal especializado. Por último repasar en estas conclusiones las medidas a tomar y las incidencias más importantes atender en cuenta:



- **Obligatoriamente deben de estar conectados a unas buenas tomas de tierra que garanticen la seguridad de la instalación y fundamentalmente de los usuarios de las máquinas operadas con estos equipos.**
- Que hay que tener en cuenta en el diseño de la protección eléctrica los picos muy elevados de corriente que pueden aparecer en la corriente de línea.
- Que son equipos que generan un gran contenido de armónicos a la red y que incluso pueden generar corrientes parásitas de defecto que pueden influir en el disparo de los interruptores diferenciales.
- Que siempre se va a obtener un rendimiento del motor menor al que viene especificado en la placa de características del motor, si se encuentra alimentado mediante un variador de frecuencia.
- Que a frecuencias muy altas y muy bajas las reducciones de par son muy importantes. Incluso a bajas frecuencias la refrigeración del motor puede ser deficiente, si el motor es autoventilado, lo que puede dañarlo térmicamente.

## 6 Bibliografía

### 6.1 Libros:

- [1] Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M., Puche Panadero, R. "Aplicaciones Técnicas Industriales de Motores de Inducción". UPV. 2010.
- [2] Roger Folch, J., Riera Guasp, M., Roldán Porta, C. "Tecnología Eléctrica". Síntesis. 2010.
- [3] J.M. Merino Azcarraga. "Arranque Industrial de motores asíncronos", McGraw Hill. 1995.
- [4] Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M., Puche Panadero, R. "Introducción a las Instalaciones y Tecnología Eléctrica". UPV. 2009.
- [5] Martínez Román, JA, Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M. "Prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas". UPV. 2009.
- [6] Roger Folch, J., Riera Guasp, M., Pineda Sánchez, M., Pérez Cruz, J. "Prácticas de Laboratorio de Tecnología Eléctrica". UPV. 2011.

### 6.2 Referencias de fuentes electrónicas:

- [7] Catálogos de variadores de frecuencia. Ver páginas web de:

[http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/motion\\_and\\_drives/frequency\\_inverters/default.html](http://industrial.omron.es/es/products/catalogue/motion_and_drives/frequency_inverters/default.html)

[http://www.schneiderelectric.es/spain/es/productos-servicios/automatizacion-control/automatization-control-intermediate.page?f=F13%3AAutomatizaci%C3%B3n%20y%20Control%20Industrial~!NNM1:Variadores+de+Velocidad+%26+Arrancadores+progresivos&p\\_funcion\\_id=1e](http://www.schneiderelectric.es/spain/es/productos-servicios/automatizacion-control/automatization-control-intermediate.page?f=F13%3AAutomatizaci%C3%B3n%20y%20Control%20Industrial~!NNM1:Variadores+de+Velocidad+%26+Arrancadores+progresivos&p_funcion_id=1e)