

Artículo 6. Resplandor luminoso nocturno, luz intrusa o molesta.

Con la finalidad de limitar el resplandor luminoso nocturno y reducir la luz intrusa o molesta, las instalaciones de alumbrado exterior se ajustarán, particularmente, a los requisitos establecidos en la ITC-EA-03.



Fig.235. Luminarias de alumbrado vial.

Artículo 7. Niveles de iluminación.

Se cumplirán los niveles máximos de luminancia o iluminancia, y de uniformidad mínima permitida, en función de los diferentes tipos del alumbrado exterior, según lo dispuesto en la ITC-EA-02.

Artículo 8. Régimen de funcionamiento.

1. Los sistemas de accionamiento garantizarán que las instalaciones de alumbrado exterior se enciendan y apaguen con precisión, cuando la luminosidad ambiente lo requiera.

2. Para obtener ahorro energético en casos tales como instalaciones de alumbrado ornamental, anuncios luminosos, espacios deportivos y áreas de trabajo exteriores, se establecerán los correspondientes ciclos de funcionamiento (encendido y apagado) de dichas instalaciones, para lo que se dispondrá de relojes astronómicos o sistemas equivalentes, capaces de ser programados por ciclos diarios, semanales, mensuales o anuales.

3. Las instalaciones de alumbrado exterior con excepción de túneles y pasos inferiores, estarán en funcionamiento como máximo durante el periodo comprendido entre la puesta de sol y su salida o cuando la luminosidad ambiente lo requiera.

4. Cuando se especifique, los alumbrados exteriores tendrán dos niveles de iluminación de forma que en aquellos casos del periodo nocturno en los que disminuya la actividad o características de utilización, se pase del régimen de nivel normal de iluminación a otro con nivel de iluminación reducido, manteniendo la uniformidad.

5. Se podrá variar el régimen de funcionamiento de los alumbrados ornamentales, estableciéndose condiciones especiales, en épocas tales como festividades y temporada alta de afluencia turística.

6. Se podrá ajustar un régimen especial de alumbrado para los acontecimientos nocturnos singulares, festivos, feriales, deportivos o culturales, que compatibilicen el ahorro energético con las necesidades derivadas de los acontecimientos mencionados.

7. Corresponde a las Administraciones Locales regular el tiempo de funcionamiento de las instalaciones de alumbrado exterior que se encuentren en su ámbito territorial y que no sean de competencia estatal o autonómica.

Artículo 9. Documentación de las instalaciones.

Con la finalidad de justificar el cumplimiento de las exigencias establecidas en este reglamento, toda instalación de alumbrado exterior deberá incluir la documentación, en forma de proyecto o memoria técnica de diseño, según se establece en la ITC-EA-05.

Artículo 10. Ejecución y puesta en servicio de las instalaciones.

Las instalaciones de alumbrado exterior están sometidas al procedimiento general de ejecución y puesta en servicio que determina el artículo 18 del Reglamento electrotécnico para baja tensión, aprobado por Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto.

La documentación de las instalaciones y el manual de instrucciones para el usuario, así como la revisión y, cuando proceda, la inspección inicial, deberán complementarse con lo dispuesto en el presente reglamento, en particular siguiendo lo indicado en la ITC EA-05.

Artículo 11. Información a los titulares de la instalación.

Como anexo al certificado de instalación que se entregue al titular de la instalación, la empresa instaladora deberá confeccionar unas instrucciones para el correcto uso, así como para el mantenimiento de la misma de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 12 y con lo especificado en la ITC-EA-05.

Asimismo, la empresa instaladora deberá aportar la etiqueta energética de la instalación según lo especificado en la ITC-EA-01.

Dicha etiqueta se adjuntará en la documentación del proyecto, junto con la relación de receptores y lámparas.

Cualquier modificación o ampliación requerirá la elaboración de un complemento a lo anterior, en la medida que sea necesario.

Artículo 12. Mantenimiento de la eficiencia energética de las instalaciones.

1. Los titulares de las instalaciones deberán mantener en buen estado de funcionamiento sus instalaciones, utilizándolas de acuerdo con sus características y absteniéndose de intervenir en las mismas para modificarlas.

2. La gestión del mantenimiento de las instalaciones exigirá el establecimiento de un registro de las operaciones llevadas a cabo, que se ajustará a lo dispuesto en la ITC-EA-06.

3. Todas las instalaciones deberán disponer de un plan de mantenimiento que comprenderá fundamentalmente las reposiciones masivas de lámparas, las operaciones de limpieza de luminarias y los trabajos de inspección y mediciones eléctricas. La programación de los trabajos y su periodicidad, se ajustarán al factor de mantenimiento adoptado, según lo establecido en la ITC-EA-06.

4. Al objeto de disminuir los consumos de energía eléctrica en los alumbrados exteriores, el titular de la instalación llevará a cabo, como mínimo una vez al año, un análisis de los consumos anuales y de su evolución, para observar las desviaciones y corregir las causas que las han motivado durante el mantenimiento periódico de la instalación.

5. En las instalaciones de alumbrado exterior será necesario disponer de un registro fiable de su componentes incluyendo las lámparas, luminarias, equipos auxiliares, dispositivos de regulación del nivel luminoso, sistemas de accionamiento y gestión centralizada, cuadros de alumbrado, etc.

Artículo 13. Inspecciones y verificaciones.

Sin perjuicio de la facultad que, de acuerdo con lo señalado en el artículo 14 de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, posee la Administración Pública competente para llevar a cabo, por sí misma, las actuaciones de inspección y control que estime necesarias, según lo previsto en el artículo 12.3 de dicha Ley, el cumplimiento de las disposiciones y requisitos de eficiencia energética establecidos en el presente Reglamento deberá ser comprobado en todos los casos mediante una verificación inicial previa a la puesta en servicio de la instalación, realizada por un instalador autorizado

en baja tensión y, además, según la potencia instalada, mediante inspección inicial y verificaciones o inspecciones periódicas, llevadas a cabo de acuerdo con lo indicado en la ITC-EA 05.

Artículo 14. Excepciones.

Cuando, por motivos de seguridad o interés público, y con carácter de excepcionalidad, no se puedan cumplir determinadas prescripciones de este reglamento, el titular de la instalación deberá presentar, ante el órgano competente de la Administración

Pública, previamente al procedimiento contemplado en el artículo 10, una solicitud de excepción, exponiendo los motivos de la misma e indicando las medidas de eficiencia alternativa que se propongan.

El citado órgano competente podrá denegar la solicitud, requerir la modificación de las medidas alternativas o conceder la excepción, siempre de manera expresa.

Artículo 15. Normas de referencia.

1. Las instrucciones técnicas complementarias podrán establecer la aplicación de normas UNE u otras reconocidas internacionalmente, de manera total o parcial, a fin de facilitar la adaptación al estado de la técnica en cada momento.

2. Cuando una o varias normas varíen su año de edición con respecto a las vigentes en el momento de la aprobación de este reglamento, o se editen modificaciones posteriores a las mismas, deberán ser objeto de actualización, mediante resolución del centro directivo competente en materia de seguridad industrial del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, en la que deberá hacerse constar la fecha a partir de la cual la utilización de la nueva edición de la norma será válida y la fecha a partir de la cual la utilización de la antigua edición de la norma dejará de serlo, a efectos reglamentarios.

A falta de resolución expresa, se enten-

derá que también cumple las condiciones reglamentarias la edición de la norma posterior a la que figure en la ITC, siempre que la misma no modifique criterios básicos.

Artículo 16. Infracciones y sanciones.

Las infracciones a lo dispuesto en el presente reglamento se sancionarán de acuerdo con lo dispuesto en el Título V de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria.

LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA



Fig.236. Polígono industrial.

Seguimos avanzando y hemos recalado en un polígono industrial.

Presentimos que en este ámbito hay muchas posibilidades de mejorar la eficiencia energética.

Adelante:



Vamos a iniciar otro capítulo en nuestra búsqueda de mejorar la eficiencia energética y ahora corresponde indagar en la industria donde, sin duda, sospechamos que existen muchos cabos sueltos.

Haremos, primero, un análisis general de todos los puntos débiles para luego profundizar en ellos.

Aspectos generales.

La humanidad debe ser capaz de conseguir un desarrollo sostenible, garantizando que las necesidades del presente se satisfagan, sin poner en peligro la capacidad de futuras generaciones de satisfacer las suyas.

El ahorro de energía que logremos, es energía disponible para que la usen otros.

El consumo de energía primaria en el mundo, en los últimos años y según fuentes estadísticas del consejo mundial de energía, podemos apreciarlo en la gráfica siguiente:

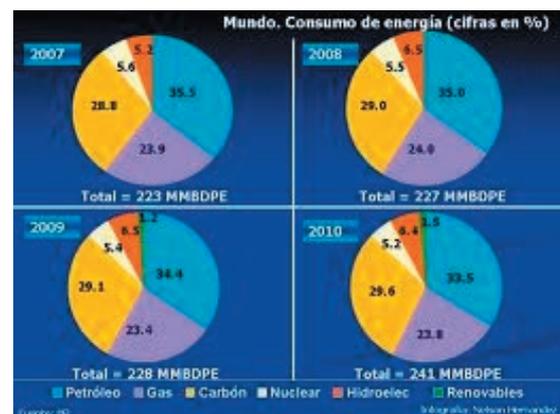


Fig.237. Consumo de energía en el mundo.

Sabemos que una de las consecuencias más dañinas del uso de combustibles fósiles es el efecto invernadero, como consecuencia del alto contenido de dióxido de carbono CO₂ en la atmósfera.

Existe un desequilibrio mundial entre la emisión y absorción del CO₂, y esto incrementa el contenido de este gas en la atmósfera.



Medidas más efectivas para reducir el efecto invernadero:

A) Implementar programas de eficiencia energética, con la finalidad de racionalizar el consumo

y de esta manera reducir las emisiones ambientales que inevitablemente se producen cuando se genera energía.

B) Utilizar energías alternativas limpias, como las renovables, para ir sustituyendo progresivamente las fuentes de energía que funcionan con combustibles fósiles.

C) Fomentar los programas de forestación y reforestación a fin de aumentar la capacidad de absorción de la vegetación del planeta.



Fig.238. Energías alternativas.



Fig.239. Planta de destilación de petróleo.

Sabemos que la temperatura del planeta durante los últimos 100 años viene aumentando debido al efecto invernadero.

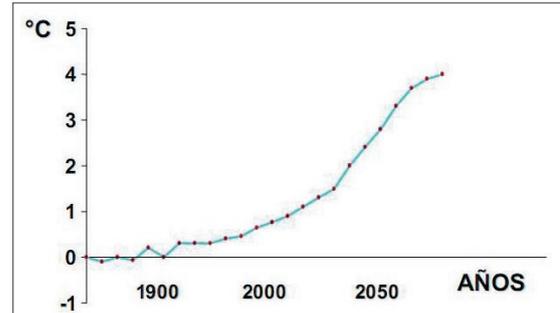


Fig.240. Ascenso de la temperatura del planeta con los años.

Al ser conscientes debemos trabajar para detener ese avance fruto, sin duda, del efecto invernadero.

¿Cómo?

En el campo industrial el ahorro de energía se traduce en menores costos operativos y por lo tanto mayor eficiencia, lo que ayuda a una mayor competitividad, sobre todo en estos tiempos de globalización de los mercados.

Cualquier reducción de los costos de energía que se quiera lograr debe partir con tener, primero, la manera de medir y registrar nuestros consumos.

Debemos tener la capacidad de evaluar numéricamente nuestros consumos históricos.

Cada área, dentro de la empresa, debe ser informada de los componentes de su propio costo de energía, y debe ser capaz de ver los resultados de los esfuerzos de ahorrar energía.

En las plantas industriales tenemos gran cantidad de consumidores, y un gran porcentaje de los consumos de éstos se debe a malos hábitos y/o desperfectos de los equipos, es decir tenemos involucrados al factor humano y al factor equipo eléctrico.

La energía se administra desde el punto de vista del logro de objetivos concretos de reducción de consumos, por lo que es necesario poder evaluar numéricamente el desempeño de todas las áreas de la empresa involucradas en la tarea de ahorro.

La tarea de ahorro de energía en las plantas industriales debe implicar a todo el personal de la empresa porque gran parte de los desperdicios eléctricos se deben a malas costumbres de estos.

En prácticamente cualquier área de una planta industrial se emplea la energía, lo que a primera vista hace difícil el proceso de registro de datos energéticos.

Por ello es importante seguir un camino estructurado y no perderse en detalles al principio de un análisis.

Los métodos usuales para el control de demanda son:

Manuales de monitoreo y de control automático.

A continuación estableceremos los métodos manuales más simples que nos ayudan a controlar la demanda máxima.

A) Eliminación de cargas que funcionan a deshora.

Sistemas de bandas transportadoras, bombas de abanico, contribuyen en gran medida en crear picos de carga.

Estos elementos muchas veces trabajan ocasionalmente en tiempos críticos de mucha carga.

Por lo tanto es recomendable apagarlos, siempre y cuando sea posible.

La iluminación, también puede ser reducida, ya que aunque no contribuye en alto grado, si afecta.

B) Reprogramar las cargas.

De baterías y otras operaciones similares no rutinarias.

Pueden ser programadas en horas que no afecte a las horas pico.

Por ejemplo, al punto de la mañana o tarde, por la noche.

Las autoclaves y hornos, por ejemplo, pueden trabajar fuera de los turnos de trabajo.

C) Interrumpir temporalmente las cargas.

Los sistemas de ventilación y aire acondicionado pueden interrumpirse usualmente por varios minutos, sin causar pérdidas en el confort.

La calefacción, aunque no tan usada, puede ser otro factor.

D) Programación de arranque.

Casi todos los motores en un proceso arrancan a un mismo tiempo y crean un gran pico de demanda, sobre todo en grandes motores de arranque lento.

También se puede programar la entrada de los motores o retardar el encendido de los mismos.

Métodos de control de demanda máxima.

Cómo optimizar el consumo energético

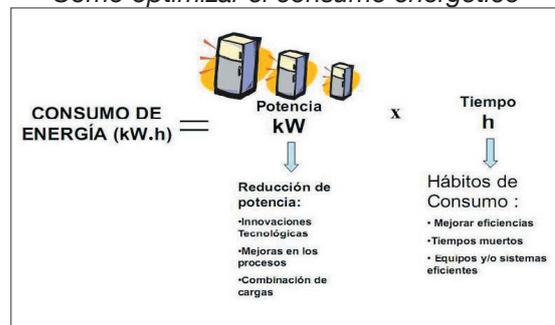


Fig. 241

Áreas de uso de energía en la empresa

PRODUCCIÓN	TECNOLOGÍAS INTERSECTORIALES Y SERVICIOS	OTROS
Todos los aparatos que pertenecen directamente al proceso productivo. Por ejemplo: Motores, Hornos, ventiladores, elevadores, etc...	Calderas, refrigeración, compresores, iluminación, aire acondicionado, redes de transporte (tuberías de aire, agua, vapor, etc...)	Equipo eléctrico de oficina, equipo de laboratorios, taller mecánico, eléctrico, etc...

Fig. 242

Circuitos energéticos eficientes.

Entendemos por circuito energético eficiente aquel que aprovecha al máximo la energía contenida en él y evita desperdicios

de masa y energía del sistema.

Podemos encontrar dentro de una fábrica diferentes tipos de estos circuitos energéticos:

Circuito eléctrico, circuito de vapor, circuito de gas, circuito de agua, circuito de aire comprimido, etc.

El objetivo es rediseñar nuestros circuitos actuales con el fin de hacerlos más eficientes y lograr la reducción en nuestros costos por concepto de electricidad, vapor (agua, combustible) y otros.

Iluminación y ahorro de energía.

Se ha logrado detectar que un gran porcentaje de plantas industriales utilizan luminarias poco eficientes y de gran consumo de energía.

Gran cantidad de bancos, financieras, hoteles, instituciones y oficinas consumen grandes cantidades de energía eléctrica sólo por el hecho de contar con luminarias obsoletas o de un rendimiento lumínico bajo, sumado a un proyecto de alumbrado incorrecto, o en algunos casos (más de los que creemos) sin ningún cálculo de alumbrado.

En los estudios efectuados en los últimos tiempos, se han detectado oficinas de empresas importantes e industrias que tienen niveles de iluminación de casi un 50% por debajo de las normas recomendadas y una cantidad de lámparas mayores que las aconsejables y necesarias para el ambiente de uso determinado.

También se ha comprobado que en las llamadas horas puntas, es decir entre las 18:00 y 23:00 horas, funcionan muchas industrias que sólo con reestructurar su sistema de iluminación, lograrían importantes ahorros.

Por esto la importancia de un adecuado diseño de iluminación de interiores y exteriores.

En países desarrollados de Europa,

el tema de ahorro de energía ya es una constante.

Las lámparas incandescentes, van camino a desaparecer y han sido reemplazadas por otros más eficientes como las lámparas fluorescentes y otras fuentes ahorradoras, como los led's.

Cuando se toca el tema de ahorro de energía, la iluminación ocupa un lugar preponderante y el tema es inagotable.

Creemos que en todos los países se están dando los primeros pasos, que son importantes, y todos nosotros debemos crear conciencia que el camino hacia el crecimiento pasa por el ahorro de energía.

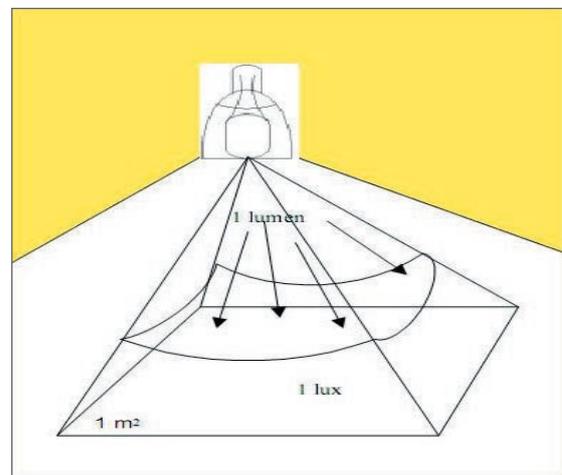


Fig.243. Dos unidades de iluminación.

Condiciones generales que debe tener una instalación para alumbrado de interiores.

Este tema, por su interés, será objeto de análisis más adelante, pero ahora podemos adelantar las siguientes consignas:

Debe de evitarse toda forma de deslumbramiento.

Debe de repartirse proporcional y uniformemente la iluminación en el ambiente.

Debe de obtenerse una iluminación conveniente y adecuada para cada clase de actividad a desarrollar en el ambiente a iluminar.

Debe de obtenerse el mejor rendimiento

y la máxima economía en toda instalación de iluminación.

Aprovechar al máximo la luz ambiental.

Mejorar el nivel de eficiencia del sistema (mediante una buena regulación).

No debe olvidarse el efecto decorativo y funcional de una buena iluminación.

Recomendaciones para mejorar eficiencia en motores.

En páginas posteriores tocamos con más profundidad este tema.

De momento, en líneas generales, conviene seguir las siguientes pautas:

Evitar el arranque y la operación simultánea de motores, sobre todo los de mediana y gran capacidad, para disminuir el valor máximo de la demanda.

Evitar la operación en vacío de los motores.

Verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada.

Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo ocasionar daños mayores en el motor y en la carga.

Corregir la caída de tensión en las líneas de alimentación de los motores.

Una tensión reducida en los terminales del motor, genera un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia.

Las normas permiten una caída de tensión máxima del 5%.

Y para ello los conductores utilizados deben ser correctamente dimensionados.

Equilibrar el conexionado de los motores trifásicos de corriente alterna.

El desequilibrio entre fases no debe exceder en ningún caso del 5%, pero mientras menor sea este valor, los motores operarán con mayor eficiencia.

Mantener bien ajustado y en óptimas

condiciones el interruptor de arranque de los motores monofásicos de fase partida.

El mal funcionamiento de este accesorio que se emplea para desconectar el devanado de arranque (y el condensador en los motores de arranque por condensador) provoca un sobrecalentamiento en los conductores ocasionando significativas pérdidas de energía y en caso extremo el fallo del motor.

Utilizar arrancadores a tensión reducida en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques.

Con esto evitaremos un calentamiento excesivo en los conductores y se logrará disminuir las pérdidas durante la aceleración.

Sustituir, en los motores de rotor devanado, los reguladores con resistencias para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos más eficientes, porque las resistencias llegan a consumir hasta un 20% de la potencia que el motor toma de la red.

Instalar equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación de cojinetes de motores de gran capacidad a fin de minimizar las pérdidas por fricción y elevar la eficiencia.

No se recomienda rebobinar los motores más de 2 veces, porque puede variar las características de diseño del motor, lo cual incrementaría las pérdidas de energía.

Elaborar un plan de mantenimiento preventivo y/o predictivo que asegure un buen funcionamiento de sus motores.

Los rodamientos y el aislamiento son las dos causas más comunes del fallo del motor, que pueden disminuirse y hasta eliminarse con un buen mantenimiento.

La humedad perjudica a los motores eléctricos, por lo que hay que evitar fugas de agua o inundaciones en donde se encuentren los motores.

Eficiencia energética en compresores de aire.

En un compresor se da la siguiente expresión:

$$P = Q \times (P2 - P1)$$

Donde:

P: Potencia Suministrada al compresor.

Q: Caudal de aire.

P2 -P1: Diferencial de presiones.



La demanda de potencia puede reducirse mediante la reducción del caudal o la diferencia de presiones.

Recomendaciones para mejorar eficiencia del sistema de aire comprimido.

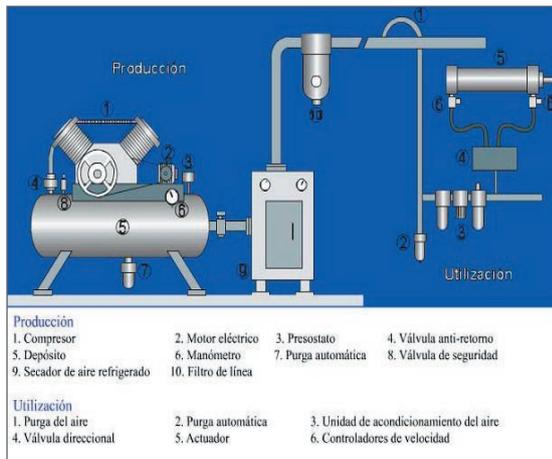


Fig.244.El sistema neumático básico.

Eliminar todas las fugas de aire que se presentan en la red de distribución.

Las fugas pueden alcanzar hasta un 50% de la capacidad instalada en instalaciones descuidadas.

Con una inversión moderada deben limitarse a menos del 5%.

Eliminar líneas de distribución que no sean necesarias.

Limpieza periódica de los filtros de aire.

No usar aire comprimido para ventilación o limpieza.

Controlar las mediciones de consumo para corregir anomalías.

Determinar la presión mínima requerida para la operación satisfactoria de todos los equipos y efectuar su control.

Dimensionar correctamente el tamaño de las líneas.

Apagar los compresores cuando no se requiera aire comprimido.

La temperatura del aire de aspiración no debe ser mayor a la recomendada por el fabricante.

Instalar separadores de condensado y drenajes en los extremos de los ramales con el fin de eliminar la necesidad de soplar las líneas para extraer el agua.

Eficiencia en sistemas de bombeo.

Un sistema de bombeo se compone de bomba, motor, tubería y accesorios.



Fig.245. Varias bombas.

La energía eléctrica consumida depende de la potencia, el tiempo en que funciona la bomba y de la eficiencia del sistema.

Esta última es la relación entre la potencia que suministra la bomba al fluido y la potencia eléctrica consumida.

La potencia suministrada por la bomba, está en función del gasto y la carga.

Se recomienda diseñar el sistema para que entregue el gasto con la presión requerida.

Una mayor presión, ocasiona un desperdicio de energía y el incremento del consumo de energía eléctrica.

Si cualquiera de los elementos del sistema, ha sido mal seleccionado en su tipo, capacidad o material, si el motor no está funcionando correctamente, si alguno de los accesorios está obstruido o si la tubería está deteriorada, aumentará el consumo de energía eléctrica total del sistema

Eficiencia en sistemas de aire acondicionado y ventilación.

Los temas de ventilación y aire acondicionado se presentan conjuntamente ya que las instalaciones de aire acondicionado también tienen partes componentes de la ventilación.



Fig.246. Conducto de ventilación.

Las instalaciones de ventilación constan básicamente de los ventiladores, los canales de ventilación y el sistema de control.

En los sistemas de aire acondicionado se debe considerar adicionalmente el sistema de enfriamiento.

Las instalaciones de ventilación, así como las de aire acondicionado, pueden contar con intercambiadores térmicos.

Razones principales de un bajo rendimiento en plantas de frío.

El mantenimiento deficiente de los intercambiadores de calor hace que la capacidad de refrigeración se vea disminuida y aumente el requerimiento de potencia del compresor.

Si no se mantiene la carga adecuada del refrigerante para el ciclo, baja la temperatura de evaporación, lo que también reduce la capacidad del sistema.

Por otro lado, la mala regulación o temperaturas de termostatos muy bajas incrementan los requerimientos de refrigeración.

En cuartos fríos los requisitos de refrigeración aumentan inadmisiblemente debido a las aperturas de puertas del cuarto y defectos en los aislamientos.

Las líneas de succión se mantienen aisladas para evitar un aumento innecesario en los requerimientos de refrigeración.

Mantenimiento en la gestión de eficiencia energética.

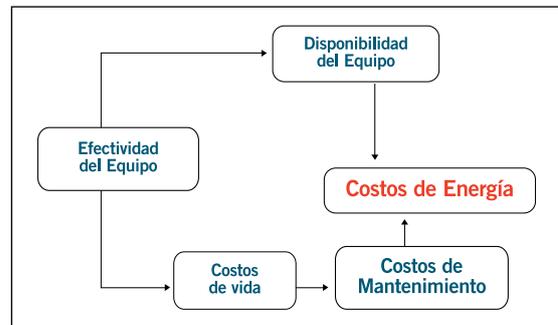


Fig.247. Mantenimiento en la gestión de eficiencia energética.



Al llevar a cabo cualquier programa de administración energética se debe prestar mucha atención a los aspectos operacionales y de mantenimiento.

Métodos básicos de mantenimiento.

- Mantenimiento correctivo.
- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento predictivo.

Incidencia de un programa de gestión en eficiencia energética en el consumo específico de energía.

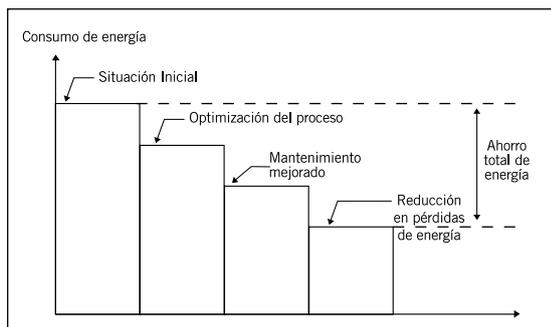


Fig.248. Programa de administración energética.

Un buen mantenimiento mantendrá el consumo de energía dentro de un límite razonable, hasta que termine la vida útil de la planta. La sustitución a tiempo por una nueva, más eficiente en el diseño energético disminuirá el consumo de energía en su nivel original.

Efecto del mantenimiento en el consumo específico de energía.

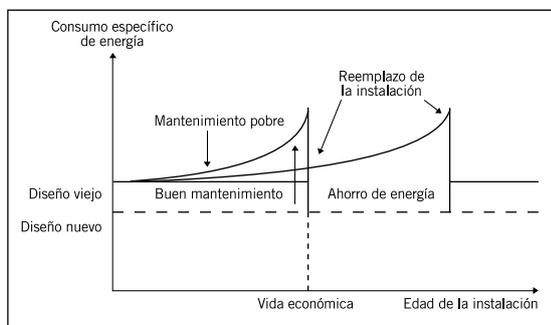


Fig.249. Diagramas del mantenimiento.

Auditoria energética.

Objetivos.

- Reducir los costos energéticos.
- Informar a los responsables de la empresa acerca de la estructura de suministro y uso de energía de la planta, así como acerca de los potenciales de ahorro.
- Sensibilizar a la gerencia con respecto a las posibilidades de ahorros económicos debido al manejo responsable y racional de la energía.
- Motivar a todo el personal a participar activamente en el uso racional de la energía.
- Gestionar un plan de acción de ahorro energético, que incluya introducir un sistema de gestión energética como política de la empresa.

Plan de acción de ahorro energético.

- Implementar el sistema de gestión energética empresarial.
- Capacitar al personal en el uso eficiente de la energía.
- Controlar la demanda máxima de energía.
- Poner metas de ahorros energéticos por divisiones y evaluar resultados.
- Mejorar los indicadores energéticos con respecto a los últimos años.
- Hacer evoluciones diarias, semanales y/o mensuales en las diferentes divisiones.
- Crear un historial de consumos e indicadores energéticos por divisiones lo que nos ayudará a trazar metas concretas de ahorros por divisiones y, en consecuencia, en la totalidad de la planta.

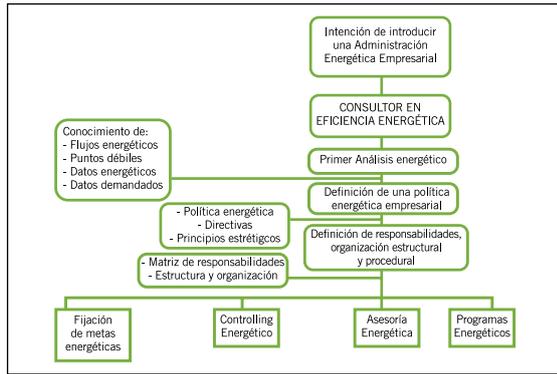


Fig.250. Implementación del sistema de gestión energética.

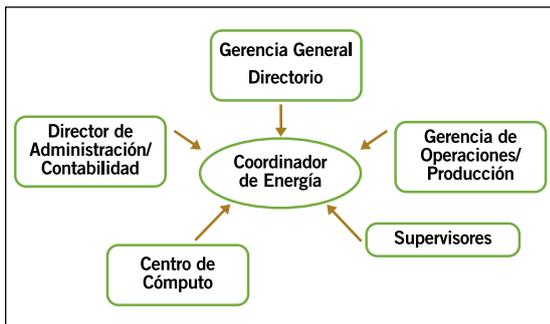


Fig.251. Esquema de organización energética.

Gestión energética.

Los elementos principales de la gestión energética son:

- Una política energética de la empresa, que sirve para manifestar por escrito una filosofía empresarial y principios estratégicos, así como para formular directivas energéticas para la empresa y desarrollar una conciencia por el uso racional de energía en la empresa.

- Metas energéticas concretas, deducidas de la política energética de la empresa.

Estas metas pueden estipularse continuamente o periódicamente y deben cumplir ciertos requisitos formales.

- Un control energético, que comprende un amplio sistema de información interna y que coordina la planificación y el control de la demanda de energía.

Este sistema es la parte central de todo sistema de gestión energética y está constituido por los siguientes módulos:

- 1) Registro de datos (energéticos y relacionados).
- 2) Administración interna de datos.
- 3) Sistema de análisis y comparación de los datos.
- 4) Sistema de planificación y presupuestos de energía.
- 5) Cálculo interno de costos de energía.
- 6) Sistema de reporte, documentación e información interna.

Elementos principales de la gestión energética.

- Una asesoría energética interna, que tiene por objetivo respaldar las decisiones y proyectos internos, por ejemplo la expansión de la producción o la planificación de nuevos edificios o equipos, el diseño y desarrollo de nuevos productos, procesos de reestructuración, etc.

- Programas internos de eficiencia energética o bien proyectos individuales destinados a reducir u optimizar el uso de energía en la empresa, como por ejemplo programas de motivación y capacitación de los empleados, programas específicos en áreas definidas de la empresa o análisis detallados de máquinas o equipos.

IDENTIFICACIÓN DE LAS POSIBLES MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LA INDUSTRIA.

Medidas sin mayor inversión.

- Ajustes de los controles en calderas y hornos.
- Desconexión de equipos que no están en producción.
- Programación correcta de la produc-

ción evitando tiempos muertos.

- Desplazar cargas de horas punta a horas llano o valle, sin afectar la producción.
- Contratar la tarifa eléctrica más conveniente.
- Reducción de picos de potencia mediante la coordinación de los arranques de grandes motores eléctricos de planta.
- Rellenar valles, mediante el traslado de cargas de una horas a otras.
- Instalar un controlador de demanda eléctrica máxima (maxímetro) en la alimentación principal de la empresa, para tener información de cargas máximas y poder controlar éstas sea en forma manual o automática actuando sobre otros consumidores no prioritarios para la producción.
- Capacitar al personal en el uso eficiente de la energía.
- Implementar un sistema de gestión energética en la empresa.
- Implementar un plan de mantenimiento preventivo/predictivo.

Medidas con baja o mediana inversión.

- Recuperación de condensados de vapor.
- Sustitución de motores de baja eficiencia por los de alta eficiencia. (Será objeto de un tratamiento a continuación, por la importancia del tema).
- Elección de la sección idónea de los cables eléctricos. (Será objeto de posterior tratamiento...)
- Implementación de variadores de velocidad y arrancadores de estado sólido. (Será objeto de posterior tratamiento...)
- Corrección del factor de potencia, mediante la instalación de baterías

de condensadores. (Será objeto de posterior tratamiento...)

- Chequeo general de las instalaciones eléctricas, solucionando los problemas de presencia de distorsiones armónicas. (Será objeto de posterior tratamiento...).
- Implementación de sistemas de iluminación eficientes y económicos. (Será objeto de posterior tratamiento...)
- Cambio y/o reforzamiento del aislamiento de tuberías de vapor, agua caliente, circuitos de refrigeración.
- Implementación de un sistema de monitoreo y control automático de los consumos eléctricos y otros también energéticos, que permita el registro y control en tiempo real de todos los principales consumidores de energéticos de la empresa.

LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS MOTORES

Los motores de alta eficiencia pueden proporcionar importantes ventajas, como ayudar a reducir los costes energéticos y a limitar las emisiones de carbono a la atmósfera.

En la UE, la introducción del programa europeo de clasificación de la eficiencia de los motores ha centrado la atención en este aspecto, poco considerado anteriormente.

El régimen de clasificación europeo de eficiencia para motores de corriente alterna de baja tensión fue introducido en 1998 y estableció tres clases de eficiencia EFF1, EFF2 y EFF3, siendo EFF1 la clase de más alta eficiencia.

*El régimen especifica que la eficiencia debe medirse de acuerdo con el estándar EN / IEC 60034-2: 1996.

*Éste fue sustituido por el nuevo estándar IEC, IEC 60034-2-1, que entró en funcionamiento en septiembre de 2007; y que también fue ratificado y publicado como EN 60034-2-1 en el nivel GENELEC.

*El nuevo estándar introduce nuevas reglas concernientes a métodos de medición que deben ser utilizados para determinar pérdidas y eficiencia.

El programa ha tenido mucho éxito, ya que ha reducido el número de motores comerciales de baja eficiencia.

Muchos consideran la clasificación EFF1 no sólo como una señal de eficiencia, sino también como un distintivo general de calidad.

Actualmente se está perfeccionando el programa para armonizar los métodos de verificación de eficiencia, de modo que sea más fácil comparar los motores de distintos fabricantes.

¿Cómo se mide la eficiencia de un motor?

La eficiencia de un motor se define como la relación que existe entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). Esta puede ser medida de manera directa o indirecta.

* La medición directa implica el cálculo de la potencia eléctrica de entrada en función del voltaje y de las corrientes suministradas, y de la potencia mecánica de salida en función de la velocidad rotacional y el par disponible en el eje.

* La medición indirecta consiste en medir la potencia de entrada y calcular la potencia mecánica de salida considerando todas las pérdidas en el motor.

Las pérdidas del motor pueden dividirse en cinco grandes áreas:

- * Pérdidas en el bobinado
- * Pérdidas en el estator.
- * Pérdidas en el rotor.
- * Pérdidas por fricción y ventilación.
- * Pérdidas adicionales con carga (SLL).

Los primeros cuatro tipos de pérdidas se pueden determinar a partir de la potencia de entrada y corriente del motor.

Más adelante insistimos en ellas.

¿Cómo se comparan las cifras de eficiencia entre el antiguo y nuevo estándar?

La siguiente tabla muestra ejemplos de comparación de cifras de eficiencia entre el

antiguo y el nuevo estándar para tres tipos diferentes de motores.

Observemos que los valores de eficiencia bajo el nuevo estándar no son comparables si no se utilizan los mismos criterios de medición.

Rango de potencia de salida	Antigua medición de eficiencia EN/IEC 60 034-2: 1996	Nueva medición de eficiencia EN/IEC 60 034-2-1: 2007-09
7.5 KW, 2-polos	88.4%	87.9%
11 KW, 4-polos	90.9%	90.3%
160 KW, 4-polos	96.0%	95.4%

Fig.252. Tabla de equivalencias entre dos normas.

¿Cuál es el nuevo estándar de medición de eficiencia considerando los nuevos métodos?

Medición de eficiencia según el esquema europeo de clasificación.	
Antiguo estándar de medición de eficiencia EN/IEC 60034-2: 1996	Nuevo estándar de medición de eficiencia EN/IEC 60034-2-1: 2007-09
Método directo	Método directo
Método indirecto: SLL estimado al 0,5 de potencia de entrada a plena carga	Método indirecto: •SLL determinada por medición •SLL estimada al 25%-0,5% de la potencia de entrada a plena carga •EH Star-método indirecto alternativo con cálculo matemático de SLL
Pérdidas determinadas a 95°C en el bobinado del estator y del rotor	Pérdidas determinadas a 25°C + elevación de temperatura medida en el bobinado del estator y el rotor

Fig.253. Tabla de la medición de eficiencia según el esquema europeo de clasificación.

El nuevo método basado en la medición real SLL ha sido utilizado en Norteamérica y Canadá, donde ha sido requerido bajo los estándares IEEE 112-B (2004) y CSA 390.

Es probable que este método sea uno de los más utilizados pues es el que establece menor grado de incertidumbre y por ende es el más preciso.

La medición indirecta fue ampliamente utilizada por los fabricantes bajo el antiguo estándar.

Sin embargo, las reglas relativas a la estimación del SLL en el método de medición

indirecta se han hecho mucho más estrictas en el marco del nuevo estándar.

El nuevo estándar también introduce diferentes opciones para el método de medición indirecto:

- SLL determinado mediante medición directa.

- SLL estimado en el 2,5% - 0,5% de la potencia de entrada a la carga nominal.

- EH Star: las pérdidas se calculan mediante un análisis matemático.

¿Cómo pueden los usuarios de motores identificar que método de medición fue utilizado?

En virtud del nuevo estándar, los fabricantes pueden seleccionar cualquier método de medición sugerido y siempre la documentación del motor debe indicar qué método fue utilizado.

Hay que tener en cuenta que los valores de eficiencia proporcionados por diferentes fabricantes de motores son comparables sólo si fue utilizado el mismo método de medición.



Abreviaturas:

- IEC International Electrotechnical Commission
- IEEE Institute of Electrical Electronics Engineers
- CSA Canadian Standards Association
- EN European Norm
- SLL Stray Load Losses

Hay fabricantes que defienden desde hace mucho tiempo la necesidad de que los motores sean más y más eficientes y que su política ha consistido en ofrecer motores de alta eficiencia como norma, es decir, desde almacén y sin sobreprecio alguno.

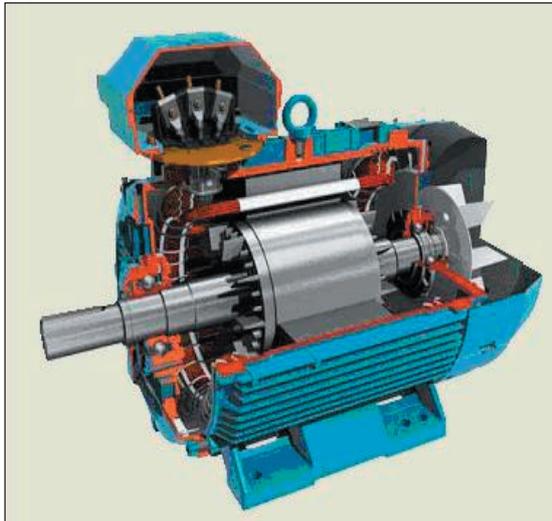


Fig.254. Sección de un motor eficiente.

Diseñar y fabricar motores fiables, con buenas prestaciones de arranque y funcionamiento, implica conseguir un delicado equilibrio entre diversos factores: no sólo la eficiencia y los costes, sino también el diseño de cojinetes, ranuras y ventilador, el aumento de la temperatura, la vibración y el ruido.

Sólo un equilibrio adecuado dará como resultado motores de alta calidad, eficientes y fiables, con peso óptimo y una larga vida útil.

El enfoque de ciclo de vida se ocupa de la eficiencia y además resalta la importancia de la fiabilidad y de la disponibilidad.

Durante el ciclo de vida de un dispositivo, la energía suele ser el mayor coste.

Lógicamente, el vertiginoso ascenso de los precios ha obligado a dirigir la atención a los costes de energía y a la eficiencia energética.

En muchas partes del mundo, las autoridades están promoviendo programas para convencer a los usuarios industriales de que especifiquen motores de alta eficiencia.

Esta situación ha llevado a algunos fabricantes a elevar el nivel de eficiencia de sus productos sin examinar otras áreas de rendimiento.

Diseño para la eficiencia.

En opinión de los fabricantes implicados, la clave para producir motores eficientes reduciendo al mínimo los costes totales durante la vida útil es garantizar que en cada etapa de diseño y fabricación se alcance una alta calidad.

Pérdidas no debidas a la carga	Pérdidas en el hierro del núcleo	18%
	Pérdidas de resistencia aerodinámica y fricción	10%
Pérdidas debidas a la carga	Pérdidas en el cobre del estátor	34%
	Pérdidas en el rotor	24%
	Pérdidas de carga por dispersión	14%

Fig.255. Tabla de la distribución de pérdidas en motor M3BP

La eficiencia de un motor mide la conversión de la energía eléctrica en trabajo útil.

La energía que se pierde se convierte en calor.

Para aumentar la eficiencia es preciso reducir estas pérdidas.

Hemos comentado ya (en dos ocasiones) que las pérdidas de los motores se pueden clasificar en cinco categorías principales.

Dos de éstas, ver Fig.255 (las pérdidas en el hierro del núcleo y las pérdidas por resistencia aerodinámica y fricción) se clasifican como pérdidas no relacionadas con la carga, ya que permanecen constantes con independencia de la misma.

Las pérdidas relacionadas con la carga, es decir, que varían con ella, son las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el rotor y las pérdidas de carga por dispersión (Fig.255).

En todas estas pérdidas pueden influir diversas consideraciones de diseño y construcción, es decir, la calidad de los procesos de diseño y fabricación.

Las pérdidas en el hierro del núcleo se deben a la energía requerida para vencer la oposición del material del núcleo a la variación de los campos magnéticos.

Los diseñadores pueden disminuir estas pérdidas usando acero de mejor calidad y aumentando la longitud del núcleo, lo que reduce la densidad de flujo magnético.

Las pérdidas por resistencia aerodinámica y por fricción son causadas por la resistencia del aire y por el rozamiento de los cojinetes.

En los motores de alta calidad, estas pérdidas se reducen seleccionando mejor los cojinetes y juntas y mejorando el diseño del flujo de aire y del ventilador.

Éste ha de ser suficientemente grande para proporcionar una adecuada refrigeración, pero no demasiado grande, ya que se reduciría la eficiencia y aumentaría el ruido.

De las pérdidas que varían con la carga, las pérdidas en el cobre del estator (conocidas como pérdidas I^2R o pérdidas por el efecto Joule) son causadas por el calentamiento provocado por la circulación de corriente a través de la resistencia del devanado del estator.

Entre las técnicas empleadas para reducir estas pérdidas está la optimización del diseño de las ranuras del estator.

Las laminaciones del estator deben ser de acero de baja pérdida, lo más uniformes y delgadas posibles, para maximizar la intensidad de los campos magnéticos.

Deben estar alineadas cuidadosamente para garantizar que los canales sean rectos.

Naturalmente, cuanto más delgadas sean las laminaciones, tanto más caras serán de producir.

Además, una gran precisión de alineamiento exige técnicas de producción más especializadas.

Las pérdidas en el rotor están causadas por las corrientes en el mismo y por las pérdidas en el hierro.

En los motores de alta eficiencia, estas

pérdidas se reducen aumentando el tamaño de las barras conductoras y los anillos terminales para reducir la resistencia.

Las pérdidas de carga por dispersión resultan del flujo de fugas inducidas por las corrientes de carga y se pueden reducir mejorando la forma geométrica de las ranuras.

Menores temperaturas significan más fiabilidad.

Los motores que sólo funcionan ocasionalmente, o en aplicaciones no críticas, no tienen que ser extraordinariamente fiables.

Evidentemente, una avería siempre es una perturbación, pero eso no implica que las consecuencias sean muy graves.

Sin embargo, en algunos sectores y procesos la fiabilidad es de suma importancia.

En procesos continuos como, por ejemplo, las aplicaciones de refrigeración en la industria del petróleo y gas o los accionamientos de máquinas de papel, se han de evitar a toda costa los tiempos muertos imprevistos.

Una parada de sólo unos minutos puede costar tanto como un motor nuevo.

La fiabilidad también es importante para los fabricantes de equipos originales (OEM) que incluyen motores en sus propios productos.

Si se avería un motor, los equipos de OEM serán considerados como poco fiables y la reputación del fabricante sufrirá las consecuencias.

Por término medio, los materiales representan el 55% del coste de un motor.

Puesto que más de la mitad del coste total se va en materiales, es obvio que los fabricantes que intenten reducir costes demasiado agresivamente, escatimarán en los materiales y sus productos serán menos fiables.

Las dos causas más frecuentes de averías de motores son los cojinetes y devanados, de modo que estos componentes son esenciales para determinar la fiabilidad global.

En el caso de los cojinetes y devanados, la temperatura de operación en el interior del motor es el factor más importante sobre la vida útil del componente.

Un motor eficiente y de alta calidad, funcionando a plena carga, puede experimentar un aumento normal de temperatura de 60–80° C, pero esta cifra puede llegar a ser de hasta 100° C en los motores de menor calidad.

El aumento de temperatura puede ser mayor, sin provocar problemas, sólo en los motores diseñados especialmente para ello, que disponen de un sistema aislante apropiado que resiste las altas temperaturas.

Para conseguir fiabilidad máxima es importante utilizar cojinetes de alta calidad (Fig.256).

Los diseñadores han de seleccionar el tipo de cojinete adecuado para la aplicación y la carga concretas y a continuación elaborar un régimen de engrase apropiado para la aplicación en las condiciones de operación.

Dado que la grasa se degrada con las altas temperaturas, es importante limitar el aumento de temperatura.

Una reducción de 10–15° C de la temperatura de operación debe duplicar, en teoría, la vida útil de la grasa del cojinete.

Las temperaturas internas excesivas también afectan a la vida útil de los devanados.

En este caso, es el aislamiento en el hilo de cobre el que se degrada por efecto de las altas temperaturas.

Un aumento de 10° C en la temperatura de operación puede reducir a la mitad la vida útil del devanado.

Por esta razón, la mayoría de los motores se fabrican con aislamiento de Clase F (155° C), pero se diseñan para funcionar a temperaturas no superiores a las de Clase B (130° C).

El aumento de temperatura es un aspecto del rendimiento de los motores que se investiga permanentemente.

Otro factor de la fiabilidad del devanado es la tensión soportada, que mide la integridad del devanado.

Los devanados suelen soportar una tensión en torno a 1.200 V, aunque se pueden suministrar motores que soportan 1.400 V o más si el devanado ha de resistir mayores picos de tensión, como es el caso de algunos accionamientos de velocidad variable.

Asimismo, hay que tener presente que la fiabilidad también puede presentar aspectos distintos en diferentes entornos.

En aplicaciones de motores en la industria del petróleo y gas, por ejemplo, la seguridad es fundamental para el propietario del proceso.

Los motores funcionan generalmente en entornos muy duros y tienen que soportar condiciones extremas de calor o frío o ambientes polvorientos o húmedos.

Hay fabricantes que ha acumulado una gran experiencia en el suministro de motores para los entornos convencionales de las industrias de transformación y para condiciones extremas.

Condiciones de los cojinetes para una fiabilidad óptima del motor:

- Suministrados por un fabricante fiable.
- Dimensionados adecuadamente para la carga y velocidad.
- Holgura interna adecuada para la temperatura de operación.
- Grasa adecuada para la temperatura de operación.
- Ser reengrasables si existe un servicio de mantenimiento adecuado (en caso contrario suelen ser los cojinetes sellados de por vida).

Fig.256.Lista de control de cojinetes

Esta experiencia se aprovecha para el desarrollo y fabricación de motores de alta calidad que no sólo cumplen las normas oficiales y las especificaciones de seguridad,

sino que además funcionan con gran eficiencia y fiabilidad durante toda su vida útil.



Características de un buen devanado:

- Compacidad, con buen índice de relleno de ranuras.
- Pequeña proyección saliente.
- Hilo de cobre de alta calidad.
- Sistemas de devanado de alta calidad..
- Aislamiento de ranuras, sistemas de impregnación y sistemas de aislamiento de fases, de alta calidad.

Fig.257. Características de un buen devanado.

Los motores de alta calidad funcionan mejor.

Los motores eléctricos, (los “mulos de carga”) de la industria moderna, pueden contribuir mucho a los esfuerzos por reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂.

Se estima que los motores usan el 65 % de la electricidad consumida por la industria y que generar electricidad para impulsar estos motores produce 37 millones de toneladas anuales de CO₂.

Dada la magnitud de estas cifras, incluso un pequeño aumento en la eficiencia de cada motor tiene un impacto positivo a escala mundial.

A los usuarios se les ofrece también fuertes incentivos financieros para adquirir motores eficientes.

Aunque los modelos de alta eficiencia se venden con un sobrepeso de 5–7 % (ta-

maños mayores) o de 15–20 % (tamaños más pequeños), la inversión se recupera rápidamente gracias al menor consumo de energía.

La energía utilizada por un motor durante su vida útil puede costar hasta 100 veces el precio de compra del motor.

Sin embargo, la eficiencia representa sólo un aspecto del funcionamiento y los costes de energía son una parte de los costes totales durante la vida útil.

La fiabilidad (y los costes de mantenimiento y tiempos muertos resultantes de una fiabilidad deficiente) puede ser aún más importante en algunas aplicaciones.

La experiencia y entendimiento especializados proporcionan a la empresa un profundo conocimiento de las complicadas relaciones que existen, considerando un comportamiento óptimo de arranque y funcionamiento entre eficiencia, peso, aumento de temperatura, ruido y vibración.

Creando productos de alta calidad y procurando minimizar sus costes generales durante la vida útil, se garantiza que los motores proporcionarán un rendimiento excelente en todos los sentidos.



Tres formas para seguir mejorando la eficiencia energética.

1. Evitar el rebobinado.

Generalmente, un motor rebobinado pierde eficiencia.

Rebobinar un motor de más de 30kW reduce la eficiencia nominal en cerca del 1% y en motores más pequeños en hasta el 2%. Esta pérdida no es tan importante en los motores de alta calidad.

2. Evitar el sobredimensionamiento.

Por diversas razones, las empresas suelen adquirir motores sobredimensionados.

Los estudios de las industrias de transformación concluyen que los motores funcionan, en promedio, con una carga de 50 a 60 % de su valor nominal, perdiendo eficiencia (de carga parcial). Sustituir los motores que funcionan por debajo de su carga nominal por otros más pequeños, pero más eficientes energéticamente, mejora en general la eficiencia del sistema.

3. Accionamientos VSD para el control de velocidad.

No tiene sentido utilizar un motor muy eficiente si el sistema de accionamiento no está a la altura.

En aplicaciones de bombas y ventiladores, por ejemplo, el caudal se regula estrangulando las válvulas.

Un motor que funciona a velocidad máxima cuando bastaría una velocidad menor es un derroche de energía.

Los accionamientos de velocidad variable (VSD) proporcionan velocidad óptima y control preciso y ahorran mucha energía.

Un reciente estudio de la Universidad de Lappeenranta (Finlandia) ha demostrado que los accionamientos en instalaciones de bombeo en paralelo pueden ahorrar hasta el 70 % de energía.

Más adelante nos ocuparemos de los variadores de velocidad.

LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Por: Lisardo Recio Maíllo - Product manager Prysmian Group

Cálculo de la sección del conductor desde una perspectiva económica y ecológica



Reducir las emisiones de CO₂ está en manos de todos, cuando de cables se trata, además puede ser muy rentable.

Con un ejemplo básico demostramos que incrementar las secciones de conductor es una ventaja directa para nuestro medio ambiente y para nuestro bolsillo.

Imaginemos una línea de BT trifásica con las siguientes características:

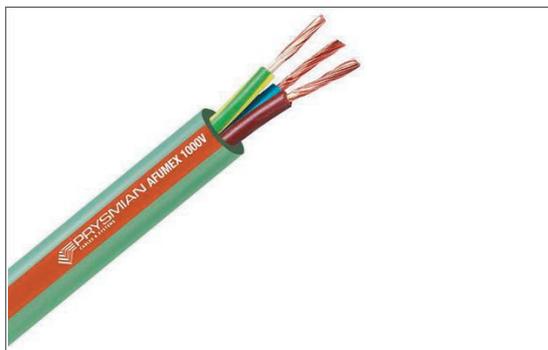


Fig.258. Afumex 1000V (AS)

L = 50 m

Temperatura ambiente = 40 °C

Instalación en bandeja perforada.

Circuito único en la canalización (sin influencia térmica de otros circuitos).

Cable utilizado: Afumex 1000 V (AS) multipolar 5G6 Afumex 1000 V (AS)

Supongamos que por nuestro cable circulan permanentemente sólo 13,8 A (el 30 % de la intensidad máxima admisible, 46 A):

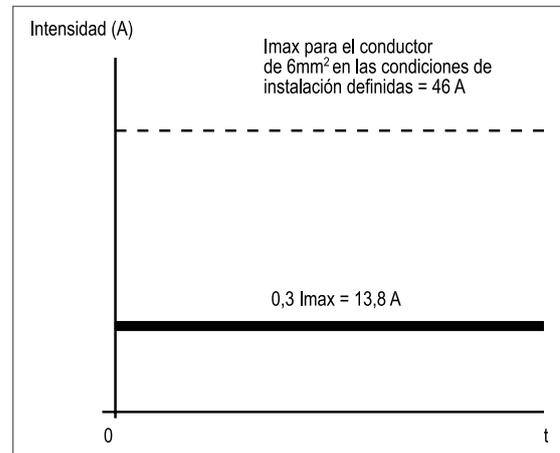


Fig.259. Representación gráfica del problema

Con el valor de resistencia del conductor podemos obtener las pérdidas de energía que se producen en la línea en forma de calor al ser atravesadas por una corriente eléctrica a lo largo de toda su vida estimada (suponemos 30 años).

En la siguiente tabla disponemos de los valores de resistencia eléctrica de las secciones de 6 mm² y también para secciones superiores de 10 y 16 mm² ya que queremos ver la repercusión económica y ecológica al instalar cables de mayor calibre.

Sección (mm ²)	Resistencia (Ω/km)
6	3,62
10	2,07
16	1,31

Fig.260. Tabla sección/resistencia de un cable.

La energía perdida en la resistencia eléctrica en una línea trifásica (suponiendo el neutro totalmente descargado) respondería a la siguiente expresión:

$$E_p = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \cdot L \cdot 1/1000 \quad [\text{kW}\cdot\text{h}]$$

Donde:

R: resistencia de la línea en Ω/km > según la sección

I: intensidad que recorre la línea en A > 13,8 A

t: tiempo en h > 30 años = 30 x 365 x 24 h = 262800 h

L: longitud de la línea en km > 50 m = 0,05 km

Con los valores de nuestro ejemplo y para cable 5G6:

$$E_{P6} = 3 \times 3,62 \Omega/\text{km} \times 13,8^2 \text{ A}^2 \times 262800 \text{ h} \times 0,05 \text{ km} \times 1/1000 \text{ kW/W} = 27176 \text{ kWh [1]}$$

Análogamente para cable de sección superior 5G10 y 5G16:

$$E_{P10} = 3 \times 2,07 \Omega/\text{km} \times 13,8^2 \text{ A}^2 \times 262800 \text{ h} \times 0,05 \text{ km} \times 1/1000 \text{ kW/W} = 15540 \text{ kWh [2]}$$

$$E_{P16} = 3 \times 1,31 \Omega/\text{km} \times 13,8^2 \text{ A}^2 \times 262800 \text{ h} \times 0,05 \text{ km} \times 1/1000 \text{ kW/W} = 9834 \text{ kWh [3]}$$

Estudio ecológico.

Ahora estamos en condiciones de poder cuantificar los ahorros energéticos por instalar secciones superiores a 6 mm² y con ello las emisiones de CO₂ suponiendo 0,26 kg CO₂ por kWh generado según el cómputo nacional:

Sección (mm ²)	Ahorro (kWh)	Ahorro (kg CO ₂) ⁽¹⁾
5G6	--	--
5G10	11636	3025
5G16	17342	4509

Fig.261. Tabla sección/ahorro de un cable.

Lo apropiado es comparar las emisiones de CO₂ que evitamos al medio ambiente por ahorrar energía que no se va a disipar en forma de “peaje” en la red con las que producimos al fabricar cable más pesado.

Según la tabla de emisiones de CO₂ de FACEL por kg de cable fabricado, cada kg

de cable tipo LSOH (de alta seguridad) de 0,6/1 kV se estima que son liberados a la atmósfera 6,379 kg de dióxido de carbono.

Por lo que fácilmente podemos saber el incremento (Δ) de emisiones por utilizar una sección más pesada en nuestra línea de 50 m.

Sección (mm ²)	Peso (kg/km)	Emisiones (kg CO ₂)	Δ Emisiones (kg CO ₂) ⁽²⁾
5G6	420	134	--
5G10	660	211	77
5G16	990	316	182

Fig.262. Tabla sección/emisiones CO de un cable.

Si comparamos el incremento de emisiones por utilizar un cable de mayor sección (2) con el ahorro de las mismas a lo largo de su vida útil por reducción de resistencia (1) al aumentar la sección podemos ver que el balance es extraordinariamente interesante.

Sección (mm ²)	Ahorro (kg CO ₂) ⁽¹⁾	Δ Emisiones (kg CO ₂) ⁽²⁾	Ahorro total (kg CO ₂) ⁽¹⁾⁻⁽²⁾	Amortización ecológica (años) ^{(2)/(1) x 30}
5G6	--	--	--	--
5G10	3025	77	2948	0,76
5G16	4509	182	4327	1,21

Fig.263. Tabla ahorro/amortización ecológica.

En la última columna se detalla el plazo de “amortización ecológica” de la línea sabiendo que hemos estimado la vida útil en unos 30 años:

$$77 \text{ kg CO}_2 / 3025 \text{ kg CO}_2 \times 30 \text{ años} = 0,76 \text{ años}$$

Es decir, en 277 días habremos ahorrado en emisiones contaminantes por generación eléctrica lo mismo que emitimos de más por fabricar los 50 m del cable de 5G10 en lugar del 5G6 y durante el resto del tiempo (más de 29 años) habremos evitado casi 3 toneladas de CO₂.

Estudio económico.

Vamos ahora a comprobar si el incremento de sección es también interesante desde el punto de vista económico.

Sabemos que utilizar cables de mayor sección es más caro, pero también sabemos que comporta ahorros de energía que ya no se perderá en las líneas y por tanto se no se contabilizará en la factura eléctrica.

Veamos la potencia de pérdidas con cada sección de conductor planteada, en nuestra línea de 50 m:

Si dividimos los valores (resultado de energía perdida) [1], [2] y [3] (E_{P6} , E_{P10} y E_{P16}) por el tiempo (30 años = 262800 h) obtendremos la potencia perdida en kW:

$$E_{P6} / t = 27176 \text{ kWh} / 262800 \text{ h} = 0,103 \text{ kW} = 103 \text{ W}$$

Es decir, nuestros 50 m de cable de 5G6 están “cobrando un peaje” de 103 W por conducir la corriente que calculando para secciones de 5G10 y 5G16 sería de tan sólo 59 W y 37 W respectivamente, sin duda una notable rebaja.

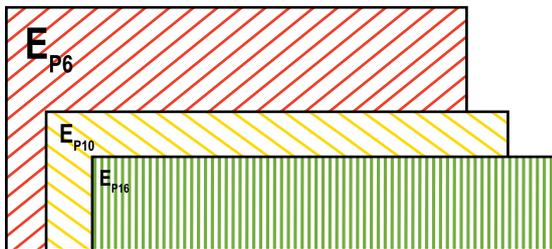


Fig.264.Tabla Comparación de la energía perdida según la sección empleada.

En 30 años tendremos una facturación de energía perdida estimada calculable (si suponemos una tarifa aproximada de 0,12 €/kWh constantes), valor que multiplicado por la energía (E_{P6} , E_{P10} y E_{P16}) nos resultará el coste.

$$C_6 = 27176 \text{ kWh} \times 0,12 \text{ €/kWh} = 3261 \text{ €}$$

Operando:

Sección (mm ²)	Coste Energía (€)	Ahorro Coste Energía (€) (3)	Coste cable aprox.(€)	Δ Coste Cable (€) (4)	Ahorro final (€) (3+4)
5G6	3261	–	–	–	–
5G10	1865	1396	2948	90	1306
5G16	1180	2081	4327	221	1860

Fig.265.Tabla ahorro final.

Estamos en condiciones de concluir que la utilización de secciones superiores a las mínimas exigidas técnicamente son en general una buena solución pues compensan tanto económica como ecológicamente.

Muy a tener en cuenta en tiempos de tarifas eléctricas y sensibilidad medioambiental crecientes.

Cuadro resumen:

Sección (mm ²)	Ahorro total (kg CO ₂) (1)-(2)	Amortización ecológica (años) (2)/(1) x 30	Ahorro final (€) (3)-(4)	Amortización económica (años) (4)/(3) x 30
5G6	--	--	--	--
5G10	2948	0,76	1306	1,93
5G16	4327	1,21	1860	3,19

Fig.266.Tabla amortización económica.

Una sección superior lleva también aparejadas otras ventajas para la línea (mayor vida útil al trabajar a menor temperatura, posibilidad de aumento de potencia en el futuro, mejor respuesta a fenómenos transitorios, menor caída de tensión, etc.).

VARIADORES DE VELOCIDAD



Si nos damos cuenta la regulación de la velocidad de un motor forma parte del momento tecnológico actual.

Pasó a la historia el modo de funcionamiento todo o nada.

Nos gusta modular, que es, ni más ni menos, que adaptar la funcionalidad del aparato a los procesos industriales donde se actúa.

En este caso la regulación significa un gran ahorro y debemos dirigir nuestro esfuerzo para conseguirlo.

Gastar lo justo, lo necesario para obtener el resultado apetecido pero a la carta.

En una empresa se utilizan muchos motores y posiblemente no tengan que estar todos al límite.

Vamos a tratar de conocer mejor al variador y también a averiguar cómo es, por dentro, un modelo actual cuya imagen puede ser la siguiente:

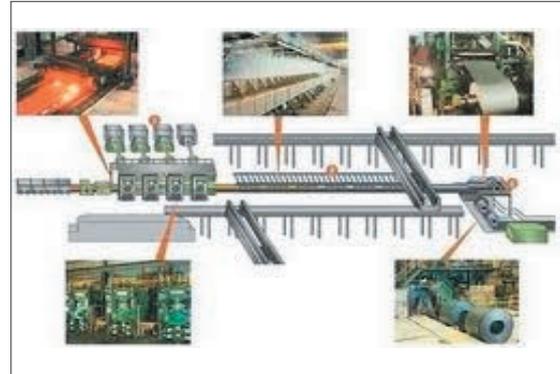


Fig.268. Trenes de laminación.



Fig.269. Torno.



Fig.267. Varios modelos de variadores.

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como por ejemplo los trenes laminadores, los mecanismos de elevación, las máquinas-herramientas, etc.

En los mismos se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes.

El estudio de este fenómeno para cada caso particular tiene una gran importancia práctica, ya que la elección correcta de las características de los motores y variadores a instalar, para un servicio determinado, requieren el conocimiento de las particularidades de éste producto.

La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por medios eléctricos.

Un ejemplo típico de la regulación con engranajes es la caja de cambios de un automóvil.



Los variadores de velocidad están relacionados con los motores y por ese motivo vamos a hablar un poco de estos últimos.

La máquina de inducción alimentada con corriente alterna, especialmente la que utiliza un rotor en jaula de ardilla, es el motor eléctrico más común en todo tipo de aplicaciones industriales y el que abarca un margen de potencias mayor.

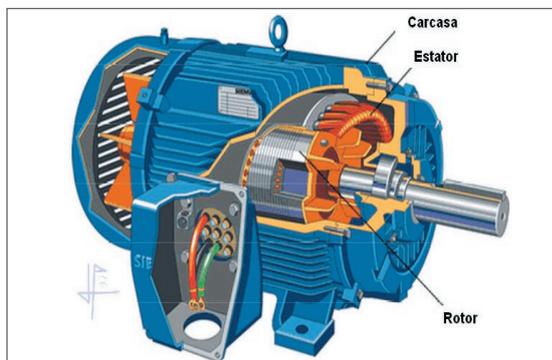


Fig.270. Motor asíncrono seccionado.

Cuando nos toca trabajar con motores hemos de conocer la:

Diferencia entre motores síncronos y asíncronos.

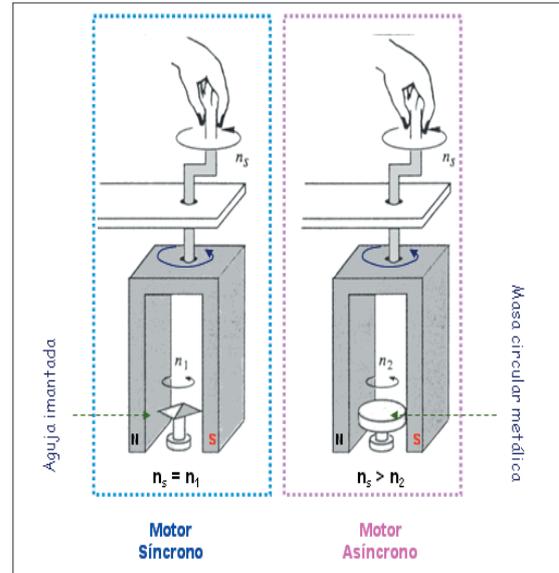


Fig.271. Diferencia entre motores síncronos y asíncronos.

Si hacemos girar un imán en forma de U a la velocidad n_s alrededor de una aguja imantada, ésta girará a una velocidad n_1 .

Se verifica que $n_1 = n_s \Rightarrow$ motor síncrono.

Si hacemos girar un imán en forma de U a la velocidad n_s alrededor de una mesa circular metálica, ésta girará a una velocidad n_2 .

Se verifica que $n_2 < n_s \Rightarrow$ motor asíncrono.

Para explicar el funcionamiento de un motor asíncrono trifásico vamos a utilizar un símil.

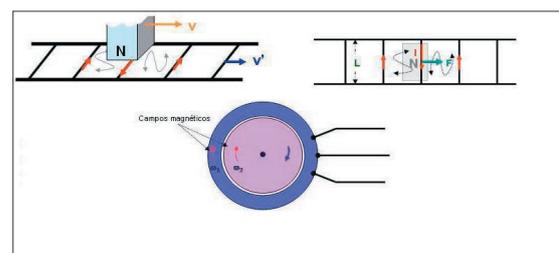


Fig.272. El símil de la escalera.

Supongamos que tenemos un imán moviéndose a lo largo de una pieza metálica con forma de escalera, tal como se aprecia en figura.

El imán, en su desplazamiento a velocidad v , provoca una variación de flujo en los recintos cerrados que forman los pelda-

ños de la escalera, que a su vez genera una f.e.m., definida por la Ley de Faraday, $e = - (d\Phi/dt)$, que a su vez provoca que en dichos recintos circule una corriente.

Esta corriente genera una fuerza sobre la escalera de valor $F = ILB$ que la hace desplazarse en el mismo sentido del imán.

La escalera nunca podrá desplazarse a la velocidad del imán, pues en el supuesto caso de que se desplazase a la misma velocidad, la variación de flujo sobre los recintos cerrados sería nula, y por tanto la f.e.m. inducida también y con ella la fuerza resultante igualmente sería nula.

En un motor asíncrono la escalera es el desarrollo lineal del rotor y el campo magnético que se desplaza es originado por un sistema trifásico de corrientes que circulan por estator (Teorema de Ferraris).

Deslizamiento.

El deslizamiento es la diferencia entre la velocidad actual de un motor a inducción y la velocidad síncrona, que es la velocidad a la que correría un motor enrollado de manera similar.

Por ejemplo el deslizamiento de un motor girando a 1760 r.p.m. sería $1800 - 1760 = 40$ r.p.m.

El deslizamiento depende de la carga del motor.

Las cargas más grandes producen más deslizamiento y por eso velocidades más bajas.

Pero no basta conectar un motor a la red para utilizarlo correctamente, sino que existen diversos elementos que contribuyen a garantizar un funcionamiento seguro.

La fase de arranque merece una especial atención.

El par debe ser el necesario para mover la carga con una aceleración adecuada hasta que se alcanza la velocidad de funcionamiento en régimen permanente, procurando que no aparezcan problemas eléctricos o

mecánicos capaces de perjudicar al motor, a la instalación eléctrica o a los elementos que hay que mover.

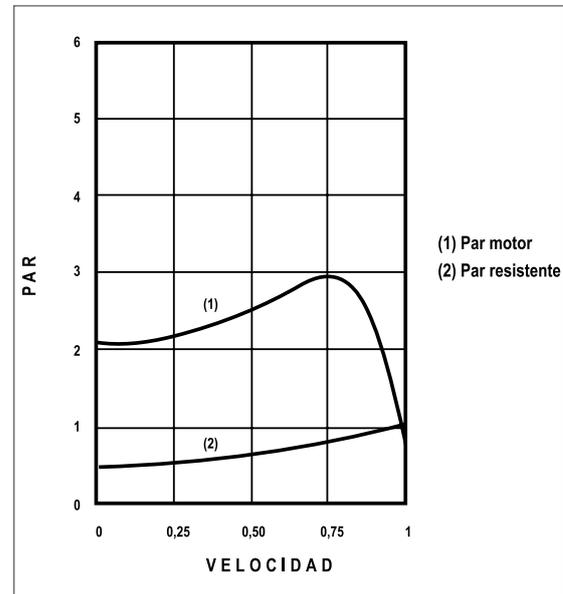


Fig.273. Curva par-velocidad.

Concepto de par en un motor eléctrico.

El par, no es más que una fuerza rotacional... es decir, una fuerza con un sentido de giro circular y a una distancia determinada.

Más claro:

La fuerza que en vez de actuar en línea recta (empujando algo o tirando de una cuerda) es sobre algo que gira, por ejemplo la maneta de una puerta, o en los pedales de la bicicleta.

El par se mide en Newton Metro (Nm) o bien en kilogramo metro (Kgm).

Si tenemos un par motor de 10 kgm significa que ese motor hace una fuerza de 10 kg en un eje, con una palanca de 1 metro...

Sería lo mismo que hacer una fuerza para abrir una puerta, y que dicha fuerza fuera de 10 kg en la maneta que está situada a 1 m de las bisagras...o, con el ejemplo de la bicicleta, como si hiciésemos una fuerza en el pedal de 10 kg y las bieletas de la bici fuesen de 1 metro de longitud.

Como resulta que las bieletas de los pedales de la bici no tienen 1 metro de longitud, sólo necesitamos una relación directa...

De esta forma para tener 10 kgm de par, necesitamos 10 kg a 1 metro de distancia, o bien 20 kg a medio metro o bien 40 kg a 25cm del eje...



Recordemos cómo es un motor asíncrono trifásico o motor de inducción trifásico, que por su robustez, bajo mantenimiento y sencillez de utilización es el motor más ampliamente utilizado en la industria.

Partes de un motor.

El motor asíncrono trifásico tiene dos partes fundamentales:

Estator: es la parte fija del motor, está compuesta por la carcasa de acero que contiene al núcleo magnético del devanado estatórico o inductor.

Esta carcasa sirve para proteger y disipar el calor generado dentro del motor a través de sus aletas.

El núcleo estatórico está compuesto por un conjunto de chapas de hierro apiladas, formado un cilindro hueco, en cuyo interior se alojará el rotor.

En el interior de de este núcleo se han practicado un conjunto de ranuras donde se bobinan el devanado inductor.

Rotor: es la parte móvil del motor. Acoplado al eje se sitúa el núcleo rotórico, en cuya superficie de alojan cierto número de barras conductoras cortocircuitadas en sus extremos mediante anillos conductores.

Este tipo de rotores se llaman de jaula de ardilla.

El eje de giro se sujeta a la carcasa mediante unos cojinetes o rodamientos, y transmiten el par de fuerzas a la carga me-

dante una transmisión mecánica de tipo engranaje, correa, o cadena, con embrague y/o freno mecánico.

La transmisión hace la función de reductor de velocidad, adecuando la velocidad del motor a la velocidad de la carga.



Fig.274.Estator de un motor asíncrono.



Fig.275.Rotor de un motor asíncrono.

Refrigeración: si acoplamos un ventilador al eje de giro, éste refrigerará al motor cuando gire, evacuando el calor al exterior, esto se llama auto-ventilación.

También existen motores con ventilación forzada, si el ventilador tiene su propio motor, o refrigerados con agua, aceite,...

Caja de bornes: Aloja a los terminales de los devanados estatoricos para su conexión a la alimentación.



Existen 2 terminales por devanado, y un devanado por fase.

Entrehierro: Es el espacio de aire que separa el estator del rotor. Debe ser lo más reducido posible para minimizar los flujos de dispersión y reducir la reluctancia del circuito magnético (el aire conduce peor el flujo magnético que el hierro).

Conexión.

Los motores asíncronos trifásicos son motores bitensión, puede conectarse a dos tensiones de red diferentes, p.e. 230/400 V.

La tensión menor indica la tensión de fase nominal, o sea, la máxima tensión a aplicar al bobinado.

Un exceso de tensión puede provocar perforaciones en el aislamiento y/o sobrecalentamiento, reduciendo drásticamente la vida útil.

Una tensión demasiado pequeña reduce en un tercio potencia útil del motor.

Así, ante una red con la tensión menor conectaremos el motor en triángulo, y ante una red con la tensión mayor lo conectaremos en estrella.

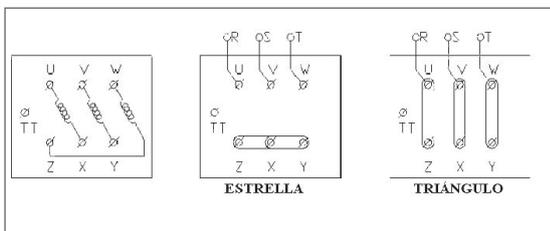


Fig.276. Vemos cómo van conectadas las bobinas, cómo colocaremos las chapitas (también llamados puentes) para la conexión estrella y para la conexión triángulo.



Fig.277. Motor conectado en estrella.



Fig.278. Motor conectado en triángulo.



Proponemos, para que no se olvide, el siguiente ejercicio:

Sea una red trifásica de 400 V y un motor bitensión de 230/400 V, ¿cómo debemos conectar el motor?

Solución:

Como la tensión de red es de 400V entre fase y fase, si lo conectamos en triángulo le estaremos aplicando 400 V a cada bobinado, siendo 230 V la máxima tensión aplicable, por lo que sería incorrecto. Si lo conectamos en estrella, le estaríamos aplicando la tensión entre fase y neutro de la red, o sea, los 230 V necesarios.

Por lo tanto, así está bien.

Imaginemos ahora que la red trifásica fuese de 230V:

?...¿

No podremos conectarle más que en triángulo.

Curva característica de un motor asíncrono.

Los motores asíncronos muestran en su placa de características una serie de parámetros que definen el funcionamiento del motor en su punto de máximo rendimiento o a plena carga.

A estos parámetros se le denominan parámetros nominales del motor.

Los más destacados son:

Potencia nominal: es la potencia mecánica desarrollada en estas condiciones.

Tensión e intensidad nominal: Son un par de valores (según se conecte en estrella o triángulo) que no se deben sobrepasar en condiciones normales de funcionamiento.

Velocidad nominal: La conseguida una vez transcurrido el periodo de arranque.

Frecuencia de red. Normalmente 50 Hz.

Par nominal: par de fuerzas desarrollado a velocidad nominal.

Factor de potencia nominal. El que corresponde originalmente, sin condensadores de compensación.

Esto no significa que el motor no pueda desarrollar más potencia que su nominal, al contrario, los motores asíncronos tienen una capacidad de sobrecarga transitoria de entre 2 y 7 veces su par nominal, por eso son tan robustos.

A continuación se observa una curva par-velocidad típica de estos motores:

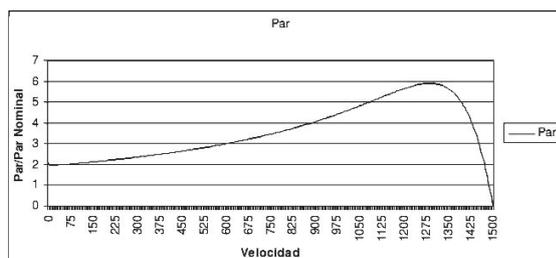


Fig.279. Curva par velocidad.

La potencia nominal de este motor se obtiene a 1485 rpm, donde se desarrolla el par nominal.

A 1500 rpm encontramos la velocidad de sincronismo, donde el par es nulo.

El par máximo se obtiene a 1275 rpm.

Entre este punto y el punto nominal se encuentra la zona de sobrecarga, admisible temporalmente, pero no de forma permanente.

Por debajo de este punto está la zona inestable, pues a menor velocidad menor par de fuerzas, con lo que el motor acaba por detenerse.

Y a 0 rpm se encuentra el punto de arranque, que es la fuerza que puede ejercer el motor durante el arranque.

Para comprobar los procesos de arranque y de frenado, y para seleccionar la velocidad del motor a utilizar, se necesita conocer la curva del par resistente de la máquina accionada (par de carga), en dependencia de la velocidad de rotación.

Las formas básicas representativas de los pares resistentes se reproducen en la figura inferior izquierda.

En la otra figura, la de la derecha, aparece el curso correspondiente de la potencia necesaria.

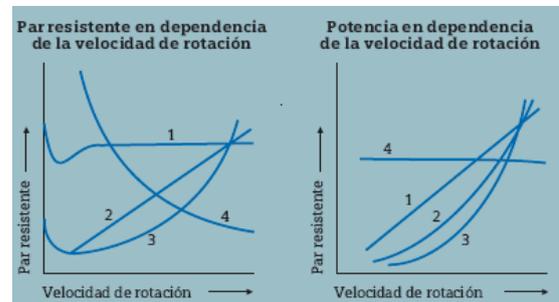


Fig.280. Par y potencia.

1.-Par resistente prácticamente constante, potencia proporcional a la velocidad de rotación.

Se establece normalmente en mecanismos elevadores, bombas y compresores de émbolo que impulsen, venciendo una presión constante, laminadoras, cintas transportadoras, molinos sin efecto ventilador, máquinas herramientas con fuerza de corte constante.

2.-El par resistente crece proporcionalmente con la velocidad de rotación y la po-

tencia aumenta proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad.

3.-El par resistente crece proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad de rotación y la potencia con el cubo de la velocidad.

Rige normalmente para bombas centrífugas, ventiladores y soplantes centrífugos, máquinas de émbolo que alimenten una red de tuberías abiertas.

4.-El par resistente decrece en proporción inversa con la velocidad de rotación, permaneciendo constante la potencia.

Solamente se considerará este caso para procesos de regulación, presentándose en los tornos y máquinas herramientas similares, máquinas bobinadoras y descortezadoras.

Más sobre lo mismo.

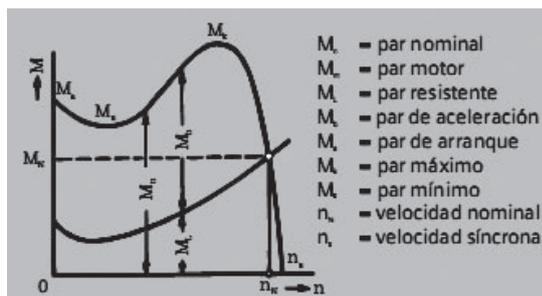


Fig.281.Representación de los pares.

Puntos característicos de la curva son el par de arranque, M_a , el par mínimo M_s y el par máximo M_k .

Según las definiciones recogidas en VDE 0530.

Par de arranque es el par mínimo que desarrolla el motor partiendo del estado de reposo, estando el rotor en la posición más desfavorable, a la tensión y frecuencia nominales, una vez terminados los procesos de compensación.

Par mínimo es el par más pequeño en la gama de velocidades comprendida entre el estado de reposo y el par máximo, a la tensión y frecuencia nominales.

Par máximo es el mayor par que desarrolla un motor durante el proceso de arranque a

la tensión y frecuencia nominales.

Los valores correspondientes al par de arranque, al par mínimo y al par máximo, así como la intensidad en el arranque para un cierto motor, se indican en las tablas de selección respectivas.

Como la característica del par motor durante el proceso de aceleración depende del dimensionamiento eléctrico, la característica del motor tiene que elegirse en correspondencia con el concurso del par resistente de que se trate, es decir, que habrá que tomar una de las clases de pares posibles, de acuerdo con las tablas de selección.

Los motores con clases de pares, por ejemplo KL 10 ó KI 16, por la clasificación de sus pares dan a conocer que están proyectados, en caso de conexión directa, para acelerar venciendo un par resistente del 100% ó 160% del nominal.

Esto significa que el par motor está con seguridad por encima del mencionado valor, de forma que se cuenta con un par de aceleración suficientemente elevado para que la máquina accionada, partiendo de la velocidad de rotación cero, llegue a la propia del servicio.

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad.

La velocidad del motor asíncrono depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

Como la frecuencia de alimentación que entregan las compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asíncronos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia.

Vamos a ver en la fórmula cómo afectan esos parámetros en la velocidad:

Se puede variar la velocidad del motor actuando sobre alguna de las variables de las que depende:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$N_s = \frac{f \cdot 60}{P}$$

$$\Rightarrow N_r = N_s (1 - s) = \frac{60 f}{P} (1 - s)$$

Velocidad de rotación
 Frecuencia
 Deslizamiento
 Pares de polos

Fig.282. Fórmulas interesantes.



El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos.

El variador de frecuencia, o variador de velocidad, regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad.

Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

DESCRIPCIÓN DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.

Los variadores son convertidores de energía encargados de modular la energía que recibe el motor.

Otra definición podría ser:

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y el par de los motores asincrónicos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables.

Se utilizan estos equipos cuando las ne-

cesidades de la aplicación sean:

- Dominio del par y la velocidad.
- Regulación sin golpes mecánicos.
- Movimientos complejos.
- Mecánica delicada.

El control de los motores eléctricos mediante conjuntos de conmutación todo o nada es una solución bien adaptada para el accionamiento de una amplia gama de máquinas.

No obstante, conlleva limitaciones que pueden resultar incómodas en ciertas aplicaciones.

Problemas que surgen en el arranque de motores asíncronos.

- El pico de corriente en el arranque puede perturbar el funcionamiento de otros aparatos conectados a la red.
- Las sacudidas mecánicas que se producen durante los arranques y las paradas pueden ser inaceptables para la máquina así como para la seguridad y comodidad de los usuarios.
- Funcionamiento a velocidad constante.

Los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos eliminan estos inconvenientes.

Adecuados para motores de corriente tanto alterna como continua, garantizan la aceleración y deceleración progresivas y permiten adaptar la velocidad a las condiciones de explotación de forma muy precisa.

Según la clase del motor, se utilizan variadores de tipo rectificador controlado, convertidores de frecuencia o reguladores de tensión.

Factores a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de regulación de velocidad.

- a) Límites o gama de regulación.
- b) Progresividad o flexibilidad de regulación.
- c) Rentabilidad económica.
- d) Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada.

- e) Sentido de la regulación (aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal).
- f) Carga admisible a las diferentes velocidades.
- g) Tipo de carga (par constante, potencia constante, etcétera).
- h) Condiciones de arranque y frenado.
- l) Condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.)
- j) Tipo de motor (potencia, corriente, voltaje, etc.).
- k) Rangos de funcionamiento (velocidad. máx., mín.)
- l) Aplicación mono o multimotor.
- m) Consideraciones de la red (microinterrupciones, fluctuaciones de tensión, armónicos, factor de potencia, corriente de línea disponible).

Motor asincrono	...en uso normal	...con variador de velocidad
Corriente de arranque	Muy elevada, del orden de 6-8 veces la corriente nominal en valor eficaz, 15-20 en valor cresta	Limitado en el motor (en general: cerca de 1,5 veces la corriente nominal)
Par de arranque M_d	Elevado y no controlado, del orden de 2 a 3 veces el par nominal M_n	Del orden de 1,5 veces el par nominal M_n y controlado durante toda la aceleración
Arranque	Brutal, cuya duración sólo depende de las características del motor y de la carga arrastrada (par resistente, inercia)	Progresivo, sin brusquedades y controlado (rampa lineal de velocidad, por ejemplo)
Velocidad	Variando ligeramente según la carga (próxima de la velocidad de sincronismo N_s)	Variación posible a partir de cero hasta un valor superior a la velocidad de sincronismo N_s
Para máximo M_m	Elevado, del orden de 2-3 veces el par nominal M_n	Elevado disponible para todo el rango de velocidades (del orden de 1,5 veces el par nominal)
Frenado eléctrico	Relativamente complejo, necesita protecciones y un esquema particular	Fácil
Inversión del sentido de la marcha	Fácil solamente después de parada motor	Fácil
Riesgo de bloqueo	Sí, en caso de exceso de par (par resistente > M_m) o en caso de bajada de tensión	No
Funcionamiento del motor en el plano par-velocidad	Fig 284	Fig 285

Fig.283. Comparación de las características de funcionamiento que demuestran el gran interés de los variadores de velocidad del tipo "convertidores de frecuencia".

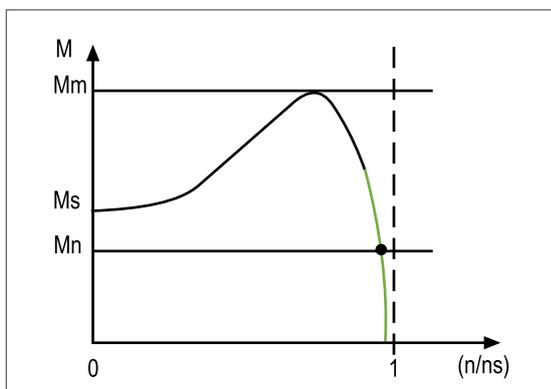


Fig.284. Diagrama par-velocidad de un motor alimentado en directo. La zona de funcionamiento del motor en el plano par-velocidad está limitada a la parte verde de la curva.

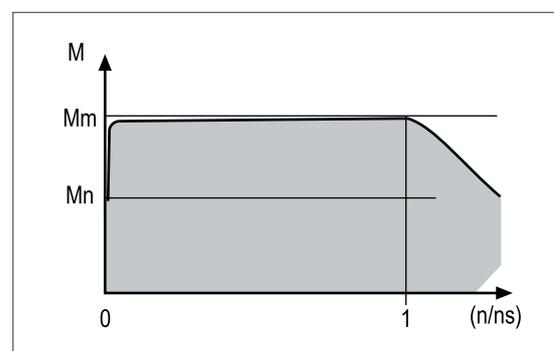


Fig.285. Diagrama par-velocidad de un motor alimentado por convertidor de frecuencia o variador de velocidad.

Ventajas de la utilización del Variador de Velocidad en el arranque de motores asíncronos.

- El variador de velocidad no tiene elementos móviles, ni contactos.
- La conexión del cableado es muy sencilla.
- Permite arranques suaves, progresivos y sin saltos.
- Controla la aceleración y el frenado progresivo.
- Limita la corriente de arranque.
- Permite el control de rampas de aceleración y deceleración regulables en el tiempo.
- Consigue un ahorro de energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia.
- Puede detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida de un equipo. Protege al motor.
- Puede controlarse directamente a través de un autómatas o microprocesador.
- Se obtiene un mayor rendimiento del motor.
- Nos permite ver las variables (tensión, frecuencia, r.p.m, etc....).

Inconvenientes de la utilización del Variador de Velocidad en el arranque de motores asíncronos.

- Es un sistema caro, pero rentable a largo plazo.
- Requiere estudio de las especificaciones del fabricante.
- Requiere un tiempo para realizar la programación.

Simbología.

El variador de velocidad se representa así:

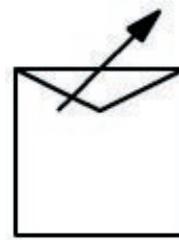


Fig. 286. Símbolo del variador de velocidad.

APLICACIONES DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA.

Los variadores de frecuencia tienen sus principales aplicaciones en los siguientes tipos de máquinas:

- **Transportadoras.** Controlan y sincronizan la velocidad de producción de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de botellas y envases, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta, etc.

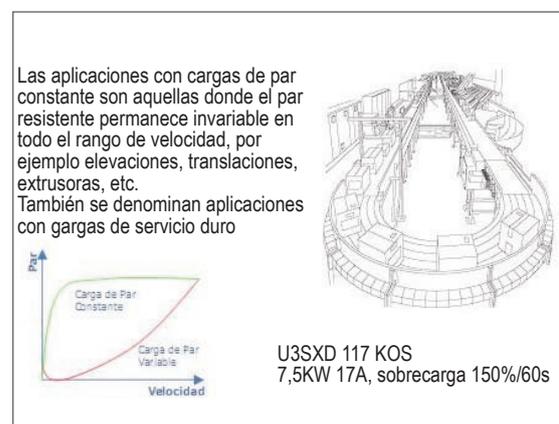


Fig.287. Aplicaciones par constante.

- **Bombas y ventiladores centrífugos.** Controlan el caudal, uso en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad, o sea que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal.

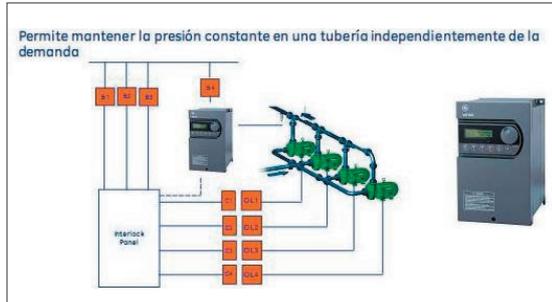


Fig.288.Control de presión multibomba.

- **Bombas de desplazamiento positivo.** Control de caudal y dosificación con precisión, controlando la velocidad. Por ejemplo en bombas de tornillo, bombas de engranajes. Para transporte de pulpa de fruta, pasta, concentrados mineros, aditivos químicos, chocolates, miel, barro, etc.

- **Ascensores y elevadores.** Para arranque y parada suaves manteniendo el par motor constante, y diferentes velocidades para aplicaciones distintas.

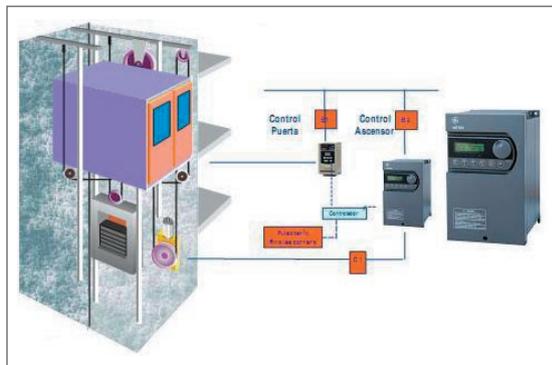


Fig.289.Control de un ascensor.

- **Extrusoras.** Se obtiene una gran variación de velocidades y control total del par motor.

- **Centrífugas.** Se consigue un arranque suave evitando picos de corriente y velocidades de resonancia.

- **Prensas mecánicas y balancines.** Se consiguen arranques suaves y mediante velocidades bajas en el inicio de la tarea, se evitan los desperdicios de materiales.

- **Máquinas textiles.** Para distintos tipos de materiales, inclusive para telas que no tienen un tejido simétrico se pueden obtener

las velocidades idóneas para conseguir telas especiales.

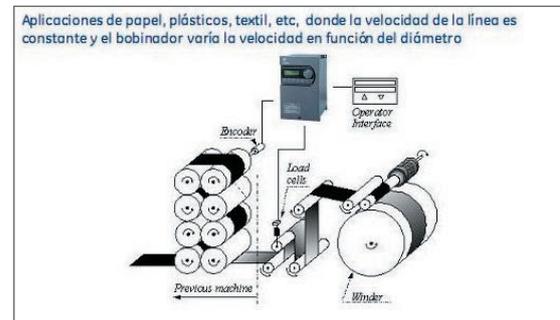


Fig.290.Bobinadoras.

- **Compresores de aire.** Se obtienen arranques suaves con el máximo par y menor consumo de energía en el arranque.

- **Pozos petrolíferos.** Se usan para bombas de extracción con velocidades de acuerdo a las necesidades del pozo.



Fig.291. Aplicaciones severas como, por ejemplo, grúas.

PRINCIPALES FUNCIONES DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD ELECTRÓNICOS.

Aceleración controlada.

La aceleración del motor se controla mediante una rampa de aceleración lineal o en «S».

Generalmente, esta rampa es controlable y permite por tanto elegir el tiempo de aceleración adecuado para la aplicación.

Variación de velocidad.

Un variador de velocidad no puede ser al mismo tiempo un regulador.

En este caso, es un sistema, rudimentario, que posee un mando controlado mediante las magnitudes eléctricas del motor con amplificación de potencia, pero sin bucle de realimentación: es lo que se llama «en bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante un valor de entrada (tensión o corriente) llamado consigna o referencia.

Para un valor dado de la consigna, esta velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la tensión de alimentación, de la carga, de la temperatura).

El margen de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal.

Regulación de la velocidad.

Un regulador de velocidad es un dispositivo controlado (figura 292). Posee un sistema de mando con amplificación de potencia y un bucle de alimentación: se denomina, «bucle abierto».

La velocidad del motor se define mediante una consigna o referencia.

El valor de la consigna se compara permanentemente con la señal de alimentación, imagen de la velocidad del motor.

Esta señal la suministra un generador tacométrico o un generador de impulsos colocado en un extremo del eje del motor.

Si se detecta una desviación como consecuencia de una variación de velocidad, las magnitudes aplicadas al motor (tensión y/o frecuencia) se corrigen automáticamente para volver a llevar la velocidad a su valor inicial.

Gracias a la regulación, la velocidad es prácticamente insensible a las perturbaciones.

La precisión de un regulador se expresa generalmente en % del valor nominal de la magnitud a regular.

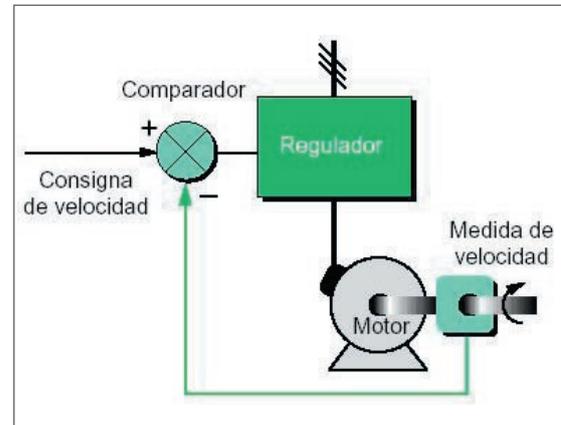


Fig.292. Principio de funcionamiento de la regulación de velocidad.

Deceleración controlada.

Cuando se desconecta un motor, su deceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (deceleración natural). Los arrancadores y variadores electrónicos permiten controlar la deceleración mediante una rampa lineal o en «S», generalmente independiente de la rampa de aceleración.

Esta rampa puede ajustarse de manera que se consiga un tiempo para pasar de la velocidad de régimen fijada a una velocidad intermedia o nula:

- Si la deceleración deseada es más rápida que la natural, el motor debe desarrollar un par resistente que se debe sumar al par resistente de la máquina; se habla entonces de frenado eléctrico, que puede efectuarse reenviando energía a la red de alimentación, o disipándola en una resistencia de frenado.

- Si la deceleración deseada es más lenta que la natural, el motor debe desarrollar un par motor superior al par resistente de la máquina y continuar arrastrando la carga hasta su parada.

Inversión del sentido de marcha.

La mayoría de los variadores actuales tienen implementada esta función.

La inversión de la secuencia de fases de alimentación del motor se realiza automáticamente o por inversión de la consigna de entrada, o por una orden lógica en un borne, o por la información transmitida a mediante una red.

Frenado.

Consiste en parar un motor pero sin controlar la rampa de desaceleración.

Con los arrancadores y variadores de velocidad para motores asíncronos, esta función se realiza de forma económica inyectando una corriente continua en el motor, haciendo funcionar de forma especial la etapa de potencia.

Toda la energía mecánica se disipa en el rotor de la máquina y, por tanto, este frenado sólo puede ser intermitente.

En el caso de un variador para motor de corriente continua, esta función se realiza conectando una resistencia en bornes del inducido.

Protección integrada.

Los variadores modernos aseguran tanto la protección térmica de los motores como su propia protección.

A partir de la medida de la corriente y de una información sobre la velocidad (si la ventilación del motor depende de su velocidad de rotación), un microprocesador calcula la elevación de temperatura de un motor y suministra una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo.

Además, los variadores, y especialmente los convertidores de frecuencia, están dotados de protecciones contra:

- Los cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra,
- Las sobretensiones y las caídas de tensión,
- Los desequilibrios de fases,
- El funcionamiento en monofásico.

COMPOSICIÓN DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA.

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

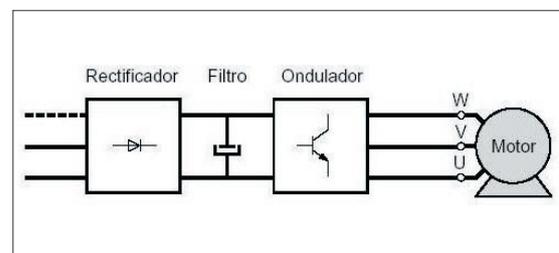


Fig.293. Diagrama de bloques de un convertidor de frecuencia.

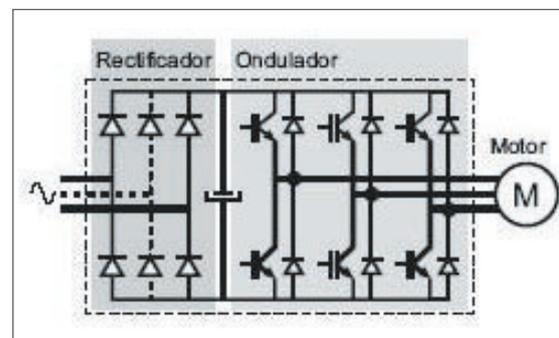


Fig.294. Esquema de principio de un convertidor de frecuencia.

- Etapa Rectificadora. Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.
- Etapa intermedia. Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.
- Inversor o “Inverter” o también ondulator. Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos.

Actualmente se emplean IGBT's (Isolated

Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión.

Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobrecorriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobretemperaturas, etc.

- Etapa de control. Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia.

Y además controla los parámetros externos en general, etc.

Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puentes de diodos rectificadores.

En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir los armónicos y mejorar el factor de potencia

El inversor, "Inverter" y también llamado ondulator, convierte la tensión continua de la etapa intermedia en una tensión de frecuencia y tensión variables.

Los IGBT envían pulsos de duración variable y se obtiene una corriente casi senoidal en el motor.

La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16 kHz.

Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor pero disminuye el rendimiento del motor y la longitud permisible del cable hacia el motor.

Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor.



¡Atención a la distancia entre variador y motor!

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad (potenció-

metro o señales externas de referencia) están aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control.

PRINCIPALES TIPOS DE VARIADORES.

Rectificador controlado para motor de corriente continua.

Proporciona, a partir de una red de corriente alterna monofásica o trifásica, una corriente continua con control del valor medio de la tensión.

Los semiconductores de potencia constituyen un puente de Graetz, monofásico o trifásico (figura 295).

El puente puede ser mixto (diodos/tiristores) o completo (sólo tiristores).

Esta última solución es la más frecuente porque permite un mejor factor de forma de la corriente suministrada.

El motor de corriente continua más utilizado tiene la excitación separada, salvo para pequeñas potencias, en las que suelen usarse frecuentemente motores de imán permanente.

La utilización de este tipo de variadores de velocidad se adapta bien a todas las aplicaciones.

Los únicos límites vienen impuestos por el propio motor de corriente continua, en especial por la dificultad de conseguir velocidades elevadas y la necesidad de mantenimiento (sustitución de las escobillas).

Los motores de corriente continua y sus variadores asociados han sido las primeras soluciones industriales.

Después de más de una década, su uso va en constante disminución en beneficio de los convertidores de frecuencia.

En efecto, el motor asíncrono es a la vez más robusto y más económico que un motor de corriente continua.

Contrariamente a los motores de

corriente continua, los asíncronos se han estandarizado con envolvente IP55, siendo por tanto prácticamente insensibles al entorno (goteo, polvo y ambientes peligrosos).

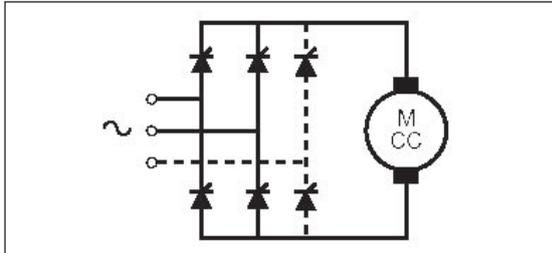


Fig.295. Esquema de un rectificador controlado para motor de CC.

Convertidor de frecuencia para motor asíncrono.

Suministra, a partir de una red de corriente alterna de frecuencia fija, una tensión alterna trifásica, de valor eficaz y frecuencia variables.

La alimentación del variador puede ser monofásica para pequeñas potencias (orden de magnitud de algunos kW) y trifásica para los mayores.

Ciertos variadores de pequeña potencia aceptan indistintamente tensiones de alimentaciones mono y trifásicas.

La tensión de salida del variador es siempre trifásica.

De hecho, los motores asíncronos monofásicos no son adecuados para ser alimentados mediante convertidores de frecuencia.

Los convertidores de frecuencia alimentan los motores de jaula estándar con todas las ventajas de estos motores:

- Estandarización.
- Bajo coste.
- Robustez.
- Estanqueidad.
- Ningún mantenimiento.



Puesto que estos motores son autoventilados, el único límite para su empleo es el funcionamiento a baja velocidad porque se reduce esta ventilación.

Si se requiere este funcionamiento hay que prever un motor especial con una ventilación forzada independiente.

COMPOSICIÓN.

Los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos se componen de dos módulos generalmente montados en una misma envolvente (figura 296):

- Un módulo de control que controla el funcionamiento del aparato.
- Un módulo de potencia que alimenta el motor con energía eléctrica.

El módulo de control.

En los arrancadores y variadores modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad, la corriente, etc.

Las capacidades de cálculo de los microprocesadores, así como de los circuitos dedicados (ASIC) han permitido diseñar algoritmos de mando con excelentes prestaciones y, en particular, el reconocimiento de los parámetros de la máquina arrastrada.

A partir de estas informaciones, el microprocesador gestiona las rampas de aceleración y deceleración, el control de la velocidad y la limitación de corriente, generando las señales de control de los componentes de potencia.

Las protecciones y la seguridad son procesadas por circuitos especializados (ASIC) o están integradas en los módulos de potencia (IPM).

Los límites de velocidad, las rampas, los límites de corriente y otros datos de configuración, se definen usando un teclado integrado o mediante PLC (sobre buses de campo) o mediante PC.

Del mismo modo, los diferentes comandos (marcha, parada, frenado...) pueden proporcionarse desde interfaces de diálogo hombre/máquina, utilizando autómatas programables o PC.

Los parámetros de funcionamiento y las informaciones de alarma, y los defectos pueden verse mediante displays, diodos LED, visualizadores de segmentos o de cristal líquido o pueden enviarse hacia la supervisión mediante un bus de terreno.

Los relés, frecuentemente programables, proporcionan información de:

- Fallos (de red, térmicos, de producto, de secuencia, de sobrecarga),
- Vigilancia (umbral de velocidad, pre-alarma, final de arranque).

Las tensiones necesarias para el conjunto de circuitos de medida y de control son proporcionadas por una alimentación integrada en el variador y separadas galvánicamente de la red.

El módulo de potencia.

El módulo de potencia está principalmente constituido por:

- Componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT...).
- Interfaces de medida de las tensiones y/o corrientes.
- Frecuentemente, de un sistema de ventilación.

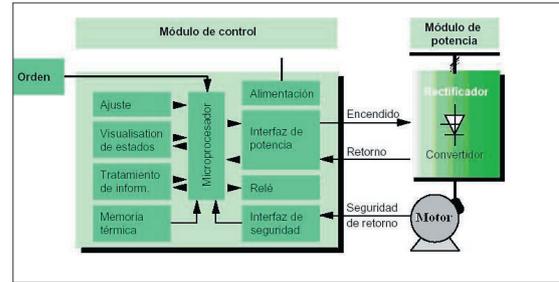


Fig.296. Estructura general de un variador electrónico.

Componentes de potencia.

Los componentes de potencia (Fig.297) son semiconductores que funcionan en «todo o nada», comparables, por tanto, a los interruptores estáticos que pueden tomar dos estados: abierto o cerrado.

Estos componentes, integrados en un módulo de potencia, constituyen un convertidor que alimenta, a partir de la red a tensión y frecuencia fijas, un motor eléctrico con una tensión y/o frecuencia variables.

Los componentes de potencia son la clave de la variación de velocidad y los progresos realizados estos últimos años han permitido la fabricación de variadores de velocidad económicos.

Los elementos semiconductores, tales como el silicio, tienen una resistividad que se sitúa entre los conductores y los aislantes.

Sus átomos poseen 4 electrones periféricos.

Cada átomo se asocia con 4 átomos próximos para formar una estructura estable con 8 electrones.

Un semiconductor de tipo P se obtiene añadiendo al silicio puro una pequeña cantidad de un elemento que posea 3 electrones periféricos.

Le falta, por tanto, un electrón para formar una estructura de 8 electrones, lo que se convierte en un exceso de carga positiva.

Un semiconductor de tipo N se obtiene añadiendo un elemento que posea 5 electrones periféricos.

Por tanto, hay un exceso de electrones, es decir, exceso de carga negativa.

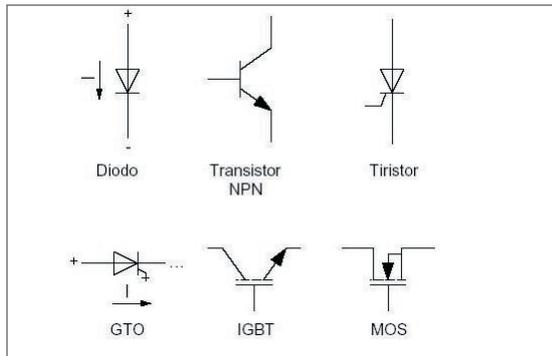


Fig.297. Los componentes de potencia.

Principales modos de funcionamiento de los variadores.

Los variadores de velocidad pueden, según el convertidor electrónico, o bien hacer funcionar un motor en un solo sentido de rotación, y se llaman «unidireccionales», o en los dos sentidos de la marcha, y se llaman entonces «bidireccionales».

Los variadores son «reversibles» cuando pueden recuperar la energía del motor al funcionar como generador (modo frenado). La reversibilidad se obtiene o retornando la energía hacia la red (puente de entrada reversible), o disipando la energía recuperada en una resistencia con un conmutador de frenado.

La figura siguiente muestra las cuatro situaciones posibles de la gráfica par-velocidad de una máquina resumidas en la tabla que le acompaña.

Hay que indicar que cuando la máquina funciona como generador recibe una fuerza de arrastre.

Este estado se utiliza especialmente para el frenado.

La energía cinética disponible en el eje de la máquina, o se transfiere a la red de alimentación, o se disipa en las resistencias, o, para pequeñas potencias, en la misma máquina, como pérdidas.

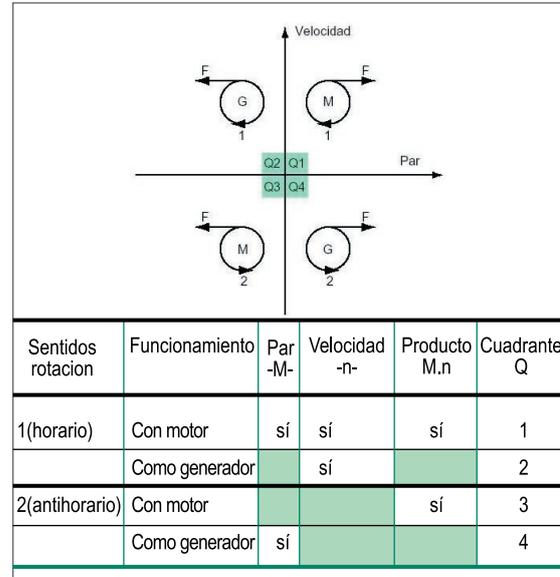


Fig.298. Los cuatro estados posibles de una máquina en su gráfica par-velocidad.

Variador unidireccional.

Este tipo de variador, la mayor parte de veces no reversible, se emplea para:

- Un motor DC, con un convertidor directo (AC-DC) con un puente mixto con diodos y tiristores (ver figura 299a).
- Un motor AC, con un convertidor indirecto (con transformación intermedia en CC) con un puente de diodos a la entrada seguido de un convertidor de frecuencia que hace funcionar la máquina en el primer cuadrante (figura 299b).

En algunos casos este montaje puede utilizarse en bidireccional (cuadrantes 1 y 3).

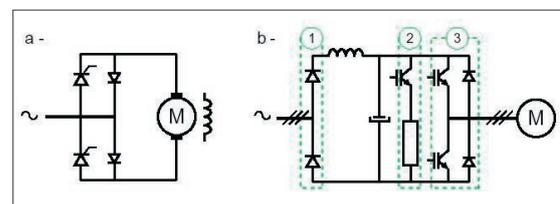


Fig.299. Esquema de principio: (a) convertidor directo con puente mixto;(b) convertidor indirecto con (1) puente de entrada de diodos (2) unidad de frenado (resistencia y conmutador) (3) convertidor de frecuencia.

Un convertidor indirecto que tiene un conmutador de frenado y una resistencia convenientemente dimensionada sirven perfectamente para un frenado momentáneo

(ralentización de una máquina elevadora cuando el motor debe desarrollar un par de frenado al bajar para retener la carga).

En caso de funcionamiento prolongado del motor con una carga que lo arrastre, es imprescindible un convertidor reversible, porque la carga es entonces negativa, por ejemplo, en el motor utilizado al frenar en un banco de pruebas.

Variador bidireccional.

Este tipo de variador puede ser un convertidor reversible o no reversible.

Si es reversible, la máquina funciona en los cuatro cuadrantes y puede permitir un frenado importante.

Si es no reversible, sólo funciona en los cuadrantes 1 y 3.

Funcionamiento a par constante.

Se denomina funcionamiento a par constante cuando las características de la carga son tales, que, en régimen permanente, el par solicitado es sensiblemente constante sea cual sea la velocidad (figura 300).

Este modo de funcionamiento se utiliza en las cintas transportadoras y en las amasadoras.

Para este tipo de aplicaciones, el variador debe tener la capacidad de proporcionar un par de arranque importante (1,5 veces o más el par nominal) para vencer los rozamientos estáticos y para acelerar la máquina (inercia).

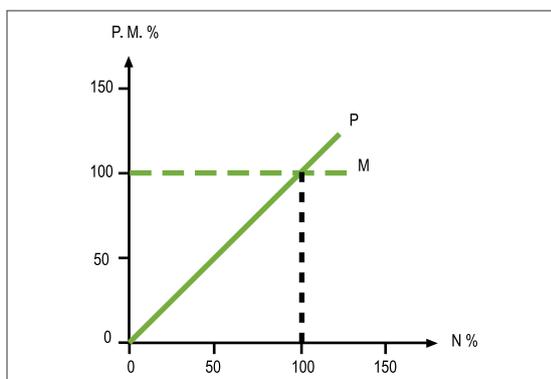


Fig.300. Curva de funcionamiento a par constante.

Funcionamiento a par variable.

Se denomina funcionamiento a par variable cuando las características de la carga son tales que en régimen permanente, el par solicitado varía con la velocidad.

Es en concreto el caso de las bombas volumétricas con tornillo de Arquímedes cuyo par crece linealmente con la velocidad (figura 301a) o las máquinas centrífugas (bombas y ventiladores) cuyo par varía con el cuadrado de la velocidad (figura 301-b).

Para un variador destinado a este tipo de aplicaciones, es suficiente un par de arranque mucho menor (en general 1,2 veces el par nominal del motor).

Muy frecuentemente dispone de funciones complementarias como la posibilidad de omitir las frecuencias de resonancia correspondientes a las vibraciones indeseables de la máquina.

Es imposible funcionar más allá de la frecuencia nominal de la máquina porque sería una carga insoportable para el motor y el variador.

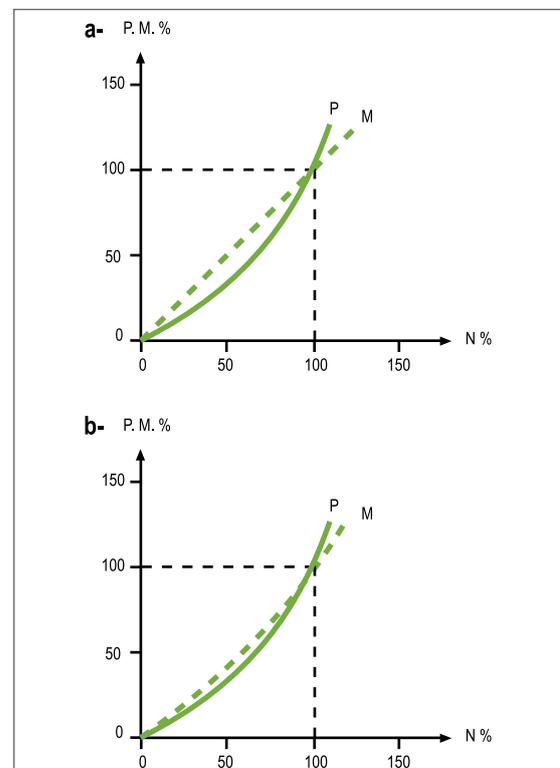


Fig.301. Curva de funcionamiento a par variable.

Funcionamiento a potencia constante.

Es un caso particular del par variable.

Se denomina funcionamiento a potencia constante cuando el motor proporciona un par inversamente proporcional a la velocidad angular (figura 302).

Es el caso, por ejemplo, de una enrolladora cuya velocidad angular debe disminuir poco a poco a medida que aumenta el diámetro de la bobina por acumulación de material.

Es también el caso de los motores de huso de las máquinas herramienta.

El margen de funcionamiento a potencia constante es por definición limitado: a baja velocidad, por la corriente proporcionada por el variador, y a gran velocidad, por el par disponible del motor.

En consecuencia, el par motor disponible con los motores asíncronos y la capacidad de conmutación de las máquinas de corriente continua deben ser comprobados.

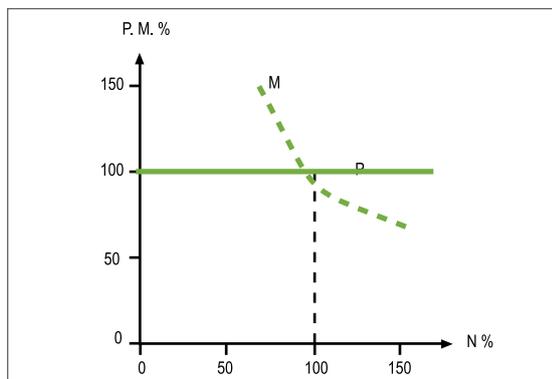


Fig.302. Curva de funcionamiento a potencia constante.

¿Control escalar tensión frecuencia?
 ¿Control Vectorial en lazo abierto? ¿Control Vectorial en lazo cerrado?

Estos términos son utilizados por los fabricantes de variadores para referirse a los diferentes tipos de control que permite hacer un variador.

En realidad, lo que nos están indicando es el grado de sofisticación del algoritmo de control del flujo del motor que puede realizar el variador, siendo éste un factor que acostumbra a ser utilizado para definir las fa-

milias de variadores, en sus aplicaciones, prestaciones y... precio...

¿Por qué es importante el control del flujo del motor?

El control del flujo del motor tiene una relación directa con el control del par motor.

Cuanto mejor sea el método de control del flujo mejor se podrá controlar el par que da el motor.

Control Escalar V/f

El Control Escalar, también llamado Tensión-Frecuencia: (V/f) es el más sencillo y se basa en el hecho de que para mantener el flujo magnético constante (y en consecuencia el par), es necesario aumentar el voltaje a medida que se aumenta la frecuencia (recordemos que la frecuencia es la que dicta la velocidad de un motor de inducción).

Se cumple entonces una relación de proporcionalidad directa en la que: $V/f = \text{Constante}$.

Es la famosa curva Tensión-Frecuencia, que el variador intenta seguir en todo momento.

¿Y cómo calcula el variador la V/f adecuada?

La V/f dependerá de cada motor, y el variador tiene un método infalible para calcularla, consistente en preguntar al usuario.

En todos los variadores escalares hay un grupo de parámetros que se refieren a los valores característicos del motor, entre ellos...la tensión y frecuencia nominales.

El variador utilizará V nominal y f nominal para calcular la curva constante de proporcionalidad entre tensión y frecuencia: V/f.

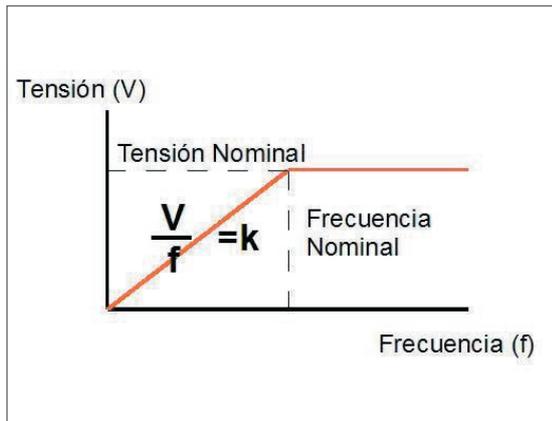


Fig.303. Gráfico tensión frecuencia.

Podríamos pensar que con el algoritmo V/f podremos controlar fácilmente la velocidad y el par motor...y... ¡es falso!

El algoritmo V/f es válido sólo para aplicaciones donde la variación de par sea poca y, falla estrepitosamente en los valores extremos de frecuencia:

A bajas vueltas (cerca de cero Hz) el par caerá prácticamente a cero.

Por encima de la frecuencia nominal, (proporcionalmente también por encima de la tensión nominal del motor...) el variador empezará a vigilar el voltaje máximo permitido, con lo cual la relación V/f se hará más pequeña, y con ella el flujo magnético del motor.

A altas frecuencias el motor ya no trabaja como una carga inductiva, pasando a ser resistiva, por lo que lo razonable es trabajar dentro del rango nominal del motor: y a eso nos invitará el variador, limitando la tensión de salida.

Con todo, existen pequeños trucos (que cualquier variador comercial permite), como el realizar una curva V/f a tramos, con lo cual podemos falsear la pendiente, por ejemplo para reforzar el voltaje a cero Hz (que teóricamente debería ser cero voltios).

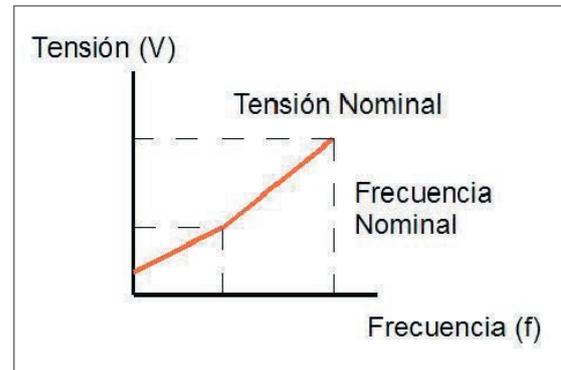


Fig.304. Curva V/f a tramos.

Sin embargo, por muchos trucos que se hagan, el algoritmo V/f tiene serias limitaciones cuando se requiere una buena regulación de par en todo el recorrido del motor.

El problema del control tensión frecuencia es que no es capaz de determinar eficientemente qué parte de la corriente entregada al motor se utiliza para inducir el flujo y qué parte se transforma en par motor.

La solución definitiva pasa por un mejor control del flujo... y eso no se consigue con un simple control V/f.

Una de las limitaciones del control escalar es el poco control de flujo que ofrece, podríamos decir que es un método de control poco fino, si lo comparamos con el control orientado al flujo.

Control vectorial.

Los llamados variadores de control vectorial, son capaces de controlar de una forma mucho más eficiente ambas corrientes.

El control vectorial es un control centrado en el flujo (Flux Oriented Control).

Aunque en la práctica no es necesario conocer la teoría de control del flujo, hacerlo nos podrá servir para entender cuándo no utilizar variadores escalares y por qué son más económicos que los vectoriales.

En una cierta referencia vectorial privilegiada se cumple que el par motor es directamente proporcional a la corriente.

El control vectorial se basa en una serie de transformaciones algebraicas que permiten trabajar sobre esa referencia especial en la que podemos ver directamente el par con la corriente.

Podemos asemejar el motor de inducción a un motor de continua.

$\text{Par} = K \cdot I_q$ (siendo I_q la corriente de par).

Más detalles de lo que hace un convertidor de frecuencia.

La mayoría de los convertidores de frecuencia, buscan transformar la corriente alterna en una corriente no alterna (es decir... prácticamente continua) y, una vez transformada en continua, trocearla según las necesidades del motor.

El convertidor de frecuencia hace lo siguiente:

- Rectificar la corriente alterna suministrada por la red eléctrica: L1, L2, L3.
- Almacenar la corriente continua en el Bus de Continua (DC BUS).
- Dosificar la energía almacenada en el Bus de continua al motor.

El siguiente esquema es el circuito de potencia (simplificado) de un variador trifásico de alterna:

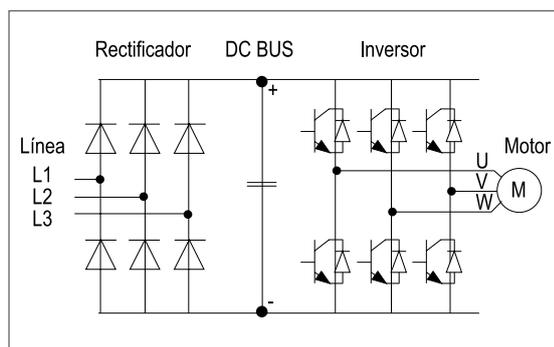


Fig.305. Circuito de potencia (simplificado) de un variador trifásico de alterna.

El Circuito Rectificador.

Este circuito acostumbra a ser un puente de diodos y se limita a convertir la corriente trifásica en continua.

L1, L2, L3 son los bornes del variador a las que conectamos la alimentación.

El Bus de Continua.

El Bus de continua es el depósito de energía del variador y es normalmente accesible en los bornes del convertidor (DC +, DC -).

El esquema anterior está muy simplificado, sólo aparece un condensador para minimizar el rizado de corriente, en realidad hay muchos más elementos...

El DC BUS es una parte fundamental del convertidor.

Al igual que los seres humanos tenemos un máximo y un mínimo de presión arterial el convertidor, en su DC BUS ha de trabajar entre un máximo y un mínimo de voltaje.

- Por debajo del voltaje mínimo, el convertidor no es capaz de suministrar la energía necesaria al motor y normalmente debería aparecer algún tipo de alarma de bajo voltaje.
- Por encima del voltaje máximo, el convertidor estaría suministrando demasiada energía al motor, aunque esta no acostumbra a ser la causa de este fenómeno ya que el variador, tiene sus propios sistemas de protección en el circuito rectificador y, la propia instalación.
- En la inmensa mayoría de ocasiones, un elevado voltaje en el DC Bus nos estará indicando que el motor está regenerando energía hacia el variador, es decir, el motor no trabaja como motor, sino como generador eléctrico (transforma la energía mecánica del eje en energía eléctrica). Por suerte existen métodos y sistemas para deshacernos del exceso de voltaje del DC BUS.

El Circuito Inversor.

Hasta ahora, lo que hemos visto podría ser perfectamente aplicable a una fuente

de alimentación AC/DC, como la que tienen nuestros ordenadores, bueno... conectada a una corriente trifásica, pero la esencia es la misma.

El circuito Inversor, es la pieza clave del convertidor de frecuencia, pues es el encargado de dosificar la energía almacenada en el DC BUS, de hecho... en la literatura anglosajona se acostumbra a designar al convertidor de frecuencia como inverter.

¿Cómo dosifica la energía el circuito inversor?

El circuito se compone de módulos transistores (con diodos en antiparalelo para permitir la regeneración).

Estos transistores trabajan como conmutadores de alta frecuencia y potencia, los transistores tipo IGBT's encajan perfectamente en esta función.

El **transistor bipolar de puerta aislada (IGBT**, del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Este dispositivo posee la características de las señales de puerta de los transistores de efecto campo con la capacidad de alta corriente y bajo voltaje de saturación del transistor bipolar, combinando una puerta aislada FET para la entrada de control y un transistor bipolar como interruptor en un solo dispositivo. El circuito de excitación del IGBT es como el del MOSFET, mientras que las características de conducción son como las del BJT.

Los transistores IGBT han permitido desarrollos que no habían sido viables hasta entonces, en particular en los variadores de frecuencia así como en las aplicaciones en máquinas eléctricas y convertidores de potencia que nos acompañan cada día y por todas partes, sin que seamos particularmente conscientes de eso: automóvil,

tren, metro, autobús, avión, barco, ascensor, electrodoméstico, televisión, domótica, Sistemas de Alimentación Ininterrumpida o SAI (en Inglés UPS), etc.

El objetivo de este circuito inversor es crear una onda de voltaje PWM.

La **modulación por ancho de pulsos** (también conocida como **PWM**, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período.

Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{t}{T}$$

D es el ciclo de trabajo.

t es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)

T es el período de la función

La construcción típica de un circuito PWM se lleva a cabo mediante un comparador con dos entradas y una salida. Una de las entradas se conecta a un oscilador de onda dientes de sierra, mientras que la otra queda disponible para la señal moduladora. En la salida la frecuencia es generalmente igual a la de la señal dientes de sierra y el ciclo de trabajo está en función de la portadora.

La principal desventaja que presentan los circuitos PWM es la posibilidad de que haya interferencias generadas por radiofrecuencia.

Éstas pueden minimizarse ubicando el controlador cerca de la carga y realizando un filtrado de la fuente de alimentación.

De un modo tosco..., podríamos decir que el inversor se dedica a trocear el voltaje del DC BUS, de modo que durante un tiempo dejará que el BUS alimente una de las fases de salida y, un tiempo después conmutará a otra fase de salida y así sucesivamente.

Podemos hacer el símil un depósito de agua con tres grifos y repartiéramos el agua abriendo y cerrando totalmente cada uno de los grifos en un orden y tiempo establecidos, de este modo puedo modular la salida del depósito haciendo un control todo/nada de cada uno de los grifos.

Si en lugar de un depósito de agua hablamos del DC BUS, y los tiempos de conmutación vienen dados por un microprocesador con un patrón ordenado, trabajando a frecuencias de conmutación de de KHz ... entonces... ya tenemos la base de un convertidor de frecuencia.

El convertidor da siempre el mismo voltaje (el del DC BUS), con lo que juega es con el tiempo, dentro de un periodo de la frecuencia deseada de alimentación del motor, en que se alimenta cada fase. La modulación PWM puede tener más o menos finura, habitualmente se utilizan modulaciones fijadas por un patrón triangular o preferentemente sinusoidal para el conseguir un resultado final más suave.

¿Qué implicaciones tiene el uso de tecnología PWM?

El uso de variadores de frecuencia, es en realidad... una pequeña trampa... que hacemos para alimentar a un motor que en realidad (a no ser que esté diseñado para PWM) espera una señal sinusoidal de entre 50 y 60 Hz.

¿Es PWM una señal sinusoidal?

¡No!

El voltaje PWM es una señal digital, y utilizando un osciloscopio no veremos una senoide, sino una señal bastante sucia... eso sí, con el periodo de la frecuencia sinusoidal deseada.

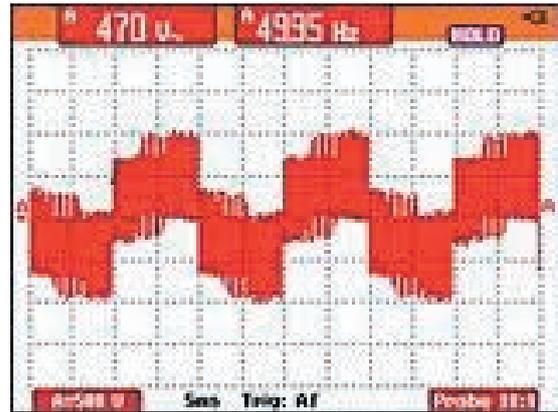


Fig. 306. Voltaje PWM.

La onda de corriente, en cambio, debido al bobinado del motor sí que se muestra en una forma bastante parecida a una senoide.

Ruido.

Los convertidores de frecuencia son una fuente de ruido electromagnético.

Se trata de ondas conducidas de gran potencia y, por su frecuencia (en la salida del variador) son una fuente de ondas radiadas, lo que nos obligará a tener un cuidado especial a la hora de cablear y apantallar el cableado de salida de potencia de un variador.

CONCLUSIONES:

- El variador de frecuencia convierte la alimentación de la red a otra frecuencia basándose en la rectificación y posterior conmutación a alta frecuencia.
- El variador de frecuencia tiene una etapa intermedia donde almacena energía llamada DC BUS, el voltaje del DC BUS es un parámetro muy importante para el funcionamiento del variador.
- El voltaje de salida de un variador no es senoidal sino PWM (no así la corriente).
- Un variador de frecuencia es una potencial fuente de ruido

electromagnético por lo que debemos ser muy cuidadosos en lo referente a filtros, reactancias, apantallamientos,...

Cuando se habla de la potencia de un motor eléctrico como característica del mismo se está hablando de la potencia nominal de diseño, es decir la potencia para la que el fabricante garantiza que puede trabajar de modo continuo sin quemarse.

La potencia eléctrica instantánea que un motor está dando en un momento determinado no tiene nada que ver con su potencia nominal, será exactamente la necesaria para equilibrar la carga mecánica que se está aplicando en tal momento ($P_e = P_m$ despreciando rozamientos y pérdidas eléctricas para mayor claridad).

La potencia mecánica que una carga rotatoria impone a un motor es el producto del par resistente por la velocidad angular; si el motor encargado de vencer esta carga es eléctrico como es el caso que nos ocupa tendrá que absorber la potencia eléctrica exacta para equilibrar dicha carga mecánica, ni más ni menos.

En teoría un motor eléctrico no tiene por qué tener ningún inconveniente por suministrar su potencia nominal a cualquier velocidad (siempre que no se sobrepase la máxima constructiva), e independientemente del tipo de motor que se trate.

El problema, sobre todo con los motores de inducción es buscar la manera de aplicarle la alimentación eléctrica en forma y nivel adecuados para que se ajuste a la potencia de la carga en todos los puntos de trabajo posibles.

Eso con la alimentación alterna de red es imposible.

Hasta la llegada de los variadores modernos controlados por potentes microprocesadores se utilizaron diversas truculencias para salir del paso con mayor

o menor éxito.

Con los primeros variadores electrónicos se mejoró muchísimo la capacidad de regulación continua de los motores de inducción mediante el control de la característica tensión-frecuencia de la alimentación.



Pero enseguida se aplicaron potentes algoritmos de control vectorial que permiten fácilmente un control de la potencia, el par, la velocidad, la corriente, el flujo o cualquier otra característica que se nos ocurra del motor prácticamente perfecto por lo que se puede conseguir cualquier maravilla impensable hace unos años, como por ejemplo obtener el par máximo a velocidad cero en un motor de jaula de ardilla, el frenado dinámico a plena potencia desde la máxima velocidad a la parada total, el control preciso de cargas suspendidas sin el auxilio de frenos mecánicos, etc.

El funcionamiento de un motor de inducción trifásico se basa en la interacción de los campos magnéticos del rotor y del estator.

El estator genera un campo en el entrehierro que gira a la velocidad síncrona.

Este campo induce corrientes polifásicas en el rotor, que a su vez generan un campo magnético giratorio a la velocidad síncrona respecto al estator.

Como consecuencia, de acuerdo con el principio de alineamiento de campos magnéticos, el rotor se ve sometido a un par, tendente a alinear ambos campos.

El rotor gira en la misma dirección que el campo magnético del estator. Cuando la velocidad del rotor se aproxima a la del campo estatórico, la magnitud de las corrientes inducidas en el rotor disminuye.

De esta forma el par aplicado al rotor disminuye, hasta que a la velocidad de sincronismo el par es nulo.

Así pues, en condiciones normales de funcionamiento el rotor girará a una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo. La diferencia entre la velocidad del campo magnético y la del rotor se denomina deslizamiento.

Cuanto mayor es el deslizamiento, mayor es el par que puede ser aplicado a la carga.

Si la frecuencia de la tensión de alimentación es variable, la velocidad del campo magnético podrá ser variada y en definitiva podremos variar la velocidad del motor.

Esto se lleva a cabo variando simultáneamente la tensión y la frecuencia aplicadas al motor.

Este tipo de control de motores de inducción se denomina control escalar, siendo utilizable cuando las especificaciones dinámicas son moderadas, siendo el funcionamiento en régimen permanente el principal objetivo.

Ello es debido a que este tipo de control fija la amplitud del flujo en el motor, pero no su posición instantánea.

En régimen dinámico, cualquier ajuste debe ser realizado de forma suave, pues de lo contrario se pueden producir inestabilidades indeseables.

La velocidad del motor es controlada por completo mediante el ajuste de la tensión y la frecuencia de salida, y el par por ajuste del deslizamiento.

Para la selección de un convertidor adecuado para accionamientos con par resistente cuadrático es importante considerar lo siguiente: la intensidad asignada del convertidor ha de ser por lo menos tan grande como la intensidad del motor a pleno par en el punto requerido.

El par cuadrático es un caso típico de resistencia sobre un fluido. Todo fluido genera sobre un cuerpo sólido en movimiento una resistencia que aumenta en forma proporcional al cuadrado de su velocidad relativa.

Es el típico caso de la resistencia aerodinámica del automóvil: a 20km/h no tiene influencia, pero superando los 100km/h se convierte en la resistencia más importante al movimiento del vehículo.

Este efecto es el mismo que se da en bombas centrífugas y ventiladores, que básicamente son sólidos moviéndose en fluidos (líquidos y gases, respectivamente), por lo tanto es de esperar que el par necesario para vencer la resistencia del fluido a mover, aumente cuadráticamente con la velocidad.



Cuando se desean prestaciones elevadas, es necesario realizar un control en lazo cerrado del par.

Este concepto requiere un control independiente del par y del flujo en el motor.

Este tipo de control se denomina control vectorial del campo orientado, o simplemente control vectorial.

LA EROSIÓN ELÉCTRICA, ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Desde los años 90 el uso de variadores de frecuencia (VFD) ha crecido notablemente con la finalidad de reducir el consumo de los motores eléctricos y ajustarlos a las capacidades reales de producción.

Los fabricantes de VFD han ido adaptando sus diseños a las necesidades del cliente y, con la incorporación de los moduladores por ancho de pulsos, han conseguido mejorar significativamente sus diseños con el paso del tiempo.

Desgraciadamente, estas innovaciones tecnológicas han tenido una repercusión negativa sobre la vida de los rodamientos, reduciendo el tiempo operativo y ampliando el número de paradas no previstas.

Sin lugar a dudas, la erosión eléctrica es la causante de estos fallos prematuros.



Fig.307. Rodamiento

Las descargas eléctricas que ocurren en el interior del rodamiento son dañinas para los elementos rodantes, las pistas de rodadura y el lubricante.

La formación de estrías y las perforaciones eléctricas (pequeños cráteres), así como el lubricante quemado y un alto nivel de vibración, son algunas de las consecuencias más características de la erosión eléctrica.

Hoy en día, este efecto es muy conocido y fácilmente identificable al inspeccionar un rodamiento desmontado.

Hasta la fecha, el uso de un osciloscopio,

conectado al eje rotativo a través de una sonda de contacto, era el único método existente para detectar este tipo de erosión.

Un método costoso que requiere de un largo tiempo de inspección y alto nivel de cualificación técnica por parte del inspector.

La erosión eléctrica.

Desde el comienzo del uso de los motores eléctricos asíncronos ha quedado demostrada la existencia de corrientes eléctricas que pasan a través de los rodamientos.

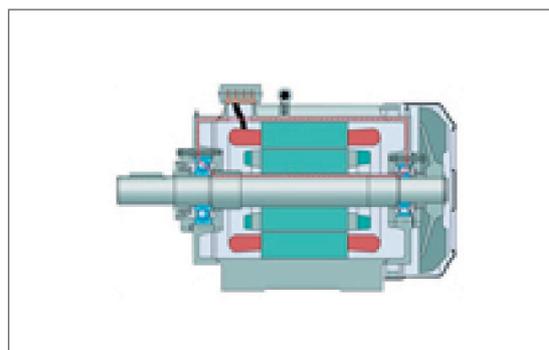


Fig.308. Situación de los rodamientos.

La excentricidad del rotor, así como la asimetría del mismo, las fugas irregulares de aire, los cabrestantes mal equilibrados o incluso una pobre homogeneidad eléctrica del acero son las causas más probables de que aparezcan estas corrientes de baja frecuencia.

La mayor innovación tecnológica en el mundo del motor eléctrico vino con la aparición de los variadores de frecuencia (VFD), que basaban su funcionamiento en los principios de la modulación por ancho de pulsos (PWM).

La tecnología PWM consiste en una modificación del ciclo de la fuente de alimentación a través de transistores bipolares aislados (IGBT) patentados por Toshiba.

Aun siendo un diseño eficiente, había un inconveniente en el uso de los VFD: las corrientes circulantes de alta frecuencia (kHz) provenien-

tes del propio sistema eléctrico, y las cargas condensadoras provenientes del sistema de alto voltaje (dv/dt) (estas cargas también son conocidas como pulsos de voltaje umbral).

La combinación de las corrientes circulantes y las corrientes de carga condensadoras es problemática, ya que son las responsables de inducir corriente al eje rotacional.

La carga se acumula en el mismo eje hasta alcanzar un umbral máximo y se deriva a tierra.

El rodamiento suele ser el punto de menor resistencia para que la corriente escape.

La lámina lubricante ejerce de barrera no conductiva pero, cuando el umbral se alcanza repetidamente por la acumulación del voltaje, ocurren los arcos o descargas eléctricas en el rodamiento.

Seguidamente la corriente vuelve a acumularse e inducirse sobre él, actuando éste último como un condensador.

Detalles sobre la generación de las corrientes circulantes de alta frecuencia

Para comprender el origen de estas corrientes debemos analizar las diferencias que se presentan entre la correcta señal sinusoidal que obtenemos del suministro y la señal eléctrica variable que resulta al transformarse en el VFD.

Por ejemplo, de la suma de los valores de las tres fases que forman la señal eléctrica a la entrada del VFD obtendremos el valor cero, mientras que la misma suma a su salida no será igual a cero.

Esta situación diferente al valor cero resulta de una asimetría de las tres fases que forman la corriente que crea una variación del flujo de alta frecuencia que rodea al eje.

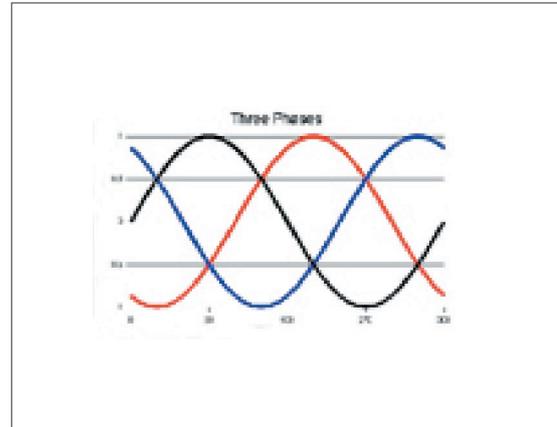


Fig.309. Fases simétricas.

Estas condiciones pueden, incluso, provocar que la corriente fluya de un rodamiento a otro (de forma axial).

Detección de la erosión eléctrica.

Todos los rodamientos montados en los motores eléctricos pueden sufrir por la erosión eléctrica.

Por desgracia, los problemas pueden surgir pocos meses después de la puesta en marcha de un motor completamente nuevo.

Para evitar este daño, un equipo de personas experimentado debe realizar un análisis de la condición del motor eléctrico de forma regular.

Hasta la fecha, el único método fiable para la detección de la erosión eléctrica era el uso de un osciloscopio conectado al motor, además de una sonda conectada al propio eje para detección de la corriente.

Además, la detección de los picos de corriente correctos exige un ajuste fino de los parámetros de inspección del osciloscopio, lo que requiere un buen conocimiento del manejo del aparato.