

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS
APLICADAS.
I.I.D.T.A

**REVISTA COLOMBIANA DE
TECNOLOGÍAS DE AVANZADA**

ISSN 1692-7257

Vol 1.

Año 2003

AHORRO ENERGÉTICO CON CONVERTIDORES DE FRECUENCIA

Ph.D. Aldo Pardo García *, Msc. Jorge Luis Díaz Rodríguez **.

*Universidad de Pamplona. Campus Universitario. Pamplona. Norte de Santander. Colombia

** Universidad de Camagüey. Carretera Circunvalación Norte Km. 5, Camagüey, CP 74650. Cuba

1.0 Introducción

En la industria, es frecuente encontrarse con procesos que incluyen motores que trabajan en condiciones variables de carga de funcionamiento tales como movimiento de líquidos, gases u otros. En estos casos, la regulación electrónica de la velocidad de los motores en función de las necesidades sustituye a los sistemas tradicionales de control obsoletos, responsables de importantes pérdidas de energía, con resultados energéticos espectaculares.

En lo que afecta al motor cabe la posibilidad de utilizar otro de mayor rendimiento y dotarlo de un equipo variador de velocidad. El efecto de este último permite eliminar la válvula

de la tubería, al regular el caudal mediante la variación de la velocidad del motor. El progreso experimentado por la electrónica de potencia ha permitido construir reguladores de velocidad para potencias que abarcan desde algunos vatios a varios MW, lo que permite satisfacer todas las necesidades planteables en sus diversas aplicaciones industriales. Las aplicaciones industriales en las que se necesita una variación de la velocidad continua y progresiva, son cada vez más frecuentes, como lo son los requisitos de rapidez de respuesta, precisión, robustez y disponibilidad entendida esta última tanto como fiabilidad intrínseca al equipo, como reducción de las paradas programadas para revisiones de mantenimiento

preventivo.

2.0 Aplicación de la regulación electrónica de velocidad.

En general, la conveniencia o no de instalar un convertidor de frecuencia en cada proceso industrial para regular un motor, dependerá de varios aspectos, entre los cuales destacan:

2.1 Forma de regulación

Cuando la regulación del proceso se hace de forma mecánica, por ejemplo, válvulas de estrangulamiento en compresores y bombas, compuertas en ventiladores y sopladores, o cuando simplemente no se regula y se tiene continuamente sobredimensionado un mecanismo, la inclusión de un regulador de frecuencia permitirá un ahorro sustancial de energía.

2.2 Características de la instalación

Cuando una instalación se ha quedado pequeña, ha sufrido modificaciones o, simplemente, ha envejecido, y no soporta los esfuerzos que se le demandan, el hecho de regular arranques, paradas y velocidad de proceso para trabajar de una forma más continua pero más suave, proporcionará una disminución significativa de las averías y minimizará el número de paradas en el proceso de producción.

2.3 Tiempo de funcionamiento

Si un equipo, (bomba, compresor, cinta transportadora,...) trabaja un porcentaje de tiempo significativamente alto (más de 2.000

horas al año), con una regulación antieconómica, la amortización de la inversión nos la financiará el ahorro, con tiempos de retorno del dinero invertido, en muchos casos, menores de un año. Los tres parámetros que se acaban de citar son fundamentales para tomar la decisión de instalar un regulador de velocidad desde el punto de vista del ahorro energético.

Una mala regulación en el proceso productivo provoca costos energéticos altos, calidades del producto alejadas del óptimo y averías que, una vez más, repercuten en una elevación innecesaria de los costos.

3.0 Regulación en máquinas industriales

Un caso especialmente adecuado para la aplicación de variadores de velocidad es el accionamiento de bombas, ventiladores sopladores y compresores, tanto centrífugos como axiales.

Es un caso frecuente, cuando se utilizan motores de velocidad constante regular el caudal introduciendo una pérdida de carga suplementaria mediante válvulas o compuertas.

La potencia requerida por este tipo de máquinas es proporcional al cubo de la velocidad, mientras que el caudal lo es a la velocidad. En caso de reducir el caudal a la mitad mediante válvulas se seguiría consumiendo la totalidad de la energía correspondiente al caudal total.

Si se dispone de un motor de velocidad variable se pondría el motor

a mitad de su velocidad anterior, de forma que proporcionaría la mitad del caudal, sin utilizar válvulas y consumiendo sólo un 12,5% de la potencia correspondiente al caudal total.

En este trabajo se va a tratar de forma preferente el caso de máquinas arrastradas, máquinas que existen en la práctica totalidad de los sectores industriales tales como bombas, sopladores, compresores, ventiladores y cintas transportadoras. Para estas máquinas existen diferentes procedimientos de regulación. Pero en todos los casos la regulación electrónica de velocidad aporta sustanciales ventajas frente a los demás tipos de regulación. Sobre este aspecto se incidirá en este apartado del trabajo.

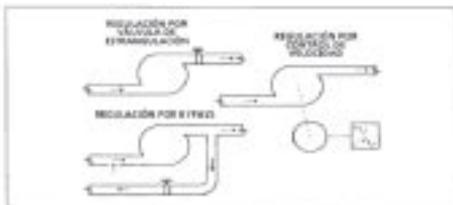


Figura 1: Esquema de regulación de caudal en bombas centrífugas

3.1. Bombas centrífugas

Existen cuatro formas básicas de regular caudal en las bombas:

- Válvula de estrangulamiento.
- Arranque-parada.
- Bifurcación o by-pass.
- Regulación por velocidad.

La primera opción es la más utilizada en la industria, y es común encontrarnos con regulaciones

mixtas entre la primera y la segunda. El estrangulamiento mediante válvula implica una variación en la instalación, al incluir una pérdida de carga adicional en el circuito hidráulico, con lo cual la bomba no puede dar el caudal nominal, ya que tiene que impulsar el fluido a una presión mayor. Se disminuye el caudal, pero como las pérdidas por presión han aumentado, la potencia demandada al motor no ha disminuido en la misma proporción que el caudal. El resultado es que el rendimiento global de las instalaciones es bajo.

La opción de arranque - parada es la más perjudicial tanto para el motor, como para la instalación y para la bomba, debido fundamentalmente a los golpes de ariete. Energéticamente hablando es más eficaz que el método anterior, pues si la bomba funciona la mitad del tiempo a plena carga, y la otra mitad está parada, lógicamente, para un caudal medio, la potencia media demandada al motor también es la mitad. Ahora bien, las averías que causa en la instalación, repercuten en un envejecimiento prematuro del sistema, que se traduce en una eficiencia muy baja y un costo muy alto. El sistema de regulación por by-pass es el menos eficaz, desde el punto de vista energético, debido a que el caudal que circula por la bomba se mantiene constante, así como la demanda de potencia al motor. La razón, es que la bomba ve siempre la misma instalación, independientemente del grado de apertura de la válvula. Se consigue una buena regulación del caudal, a costa de recircular parte del fluido que impulsa la bomba. Resulta obvio, que tenemos una parte de

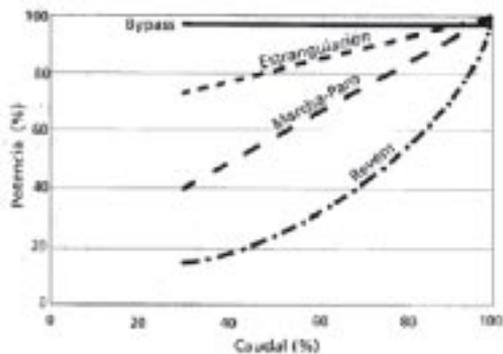


Figura 2: Bombas Centrífugas

energía consumida desaprovechada. La regulación electrónica de velocidad en el motor que arrastra a la bomba se presenta como un método energéticamente eficaz para regular el caudal. Desde el punto de vista de mantenimiento es un buen sistema de regulación que evita golpes de ariete. M disponer de rampas de frenado suaves, y evita las altas intensidades de arranque al efectuar arranques progresivos. Además, conseguimos abaratamiento en la manipulación, al funcionar de manera autónoma.

3.2 Comparación de métodos de regulación:

determinados modos de regulación, aunque constructivamente distintos, parten de la misma filosofía. Así, la regulación de caudal por válvula en bombas se sustituye ahora por compuertas o álabes, que se oponen al paso del fluido.

La aplicación de ventiladores, tanto en la Industria, como en el sector de los servicios está muy difundida, tiene aplicaciones en procesos de ventilación, atmósfera limpia, procesos de secado, extracción y

recuperación de humos, filtros de mangas, aire acondicionado, etc.

En la figura se muestran las curvas de demanda de potencia en función del caudal. Analizaremos las formas más corrientes de regulación existentes, que son:

- Regulación por compuertas.
- Regulación por álabes móviles.
- Regulación electrónica de velocidad.

Como se puede observar, la primera opción es la que peores resultados energéticos tiene, la causa es la misma que la válvula de estrangulamiento en bombas. Al cerrar la compuerta, se introducen pérdidas en la instalación en forma de sobrepresión dinámica por eso, el ventilador no baja la potencia de la misma forma que el caudal, ya que el caudal que suministra ahora, lo tiene que dar en contra de una presión mayor, por lo cual, producir ese caudal, específicamente es más caro que dar el caudal a Pujo libre, dicho de otra manera la relación caudal/potencia ha aumentado, aunque la potencia haya disminuido.

La segunda opción presenta mejores

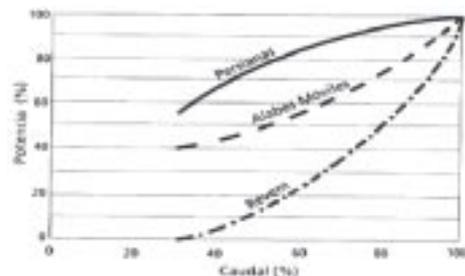


Figura 3: Ventiladores

rendimientos que la primera, sin embargo, es muy poco empleada, debido fundamentalmente a que es mucho más cara, y requiere un mantenimiento mayor.

Hasta hace unos años, la opción de compuerta era la más frecuente por dos razones: era la más barata y, por otra parte, había un desconocimiento o desconfianza hacia los reguladores electrónicos de velocidad. A medida que la experiencia con reguladores va aumentando, la inclinación hacia éstos es mayor. De hecho, es impensable una instalación nueva en la que no se adopte esta forma de regulación.

Es muy importante la aplicación de reguladores de velocidad a filtros de mangas. Normalmente, se diseña el motor y el ventilador suponiendo que el filtro está sucio. Lógicamente, cuando el filtro está limpio, el ventilador está sobredimensionado, pues el fluido no encuentra la misma resistencia que después de muchas horas de trabajo, y da más caudal del nominal. Un sencillo sensor de presión, nos indica el grado de suciedad del filtro, y permite una regulación de caudal constante, con un considerable ahorro de energía.

3.4. Cintas transportadoras

Prácticamente no existe fábrica que no disponga de cintas transportadoras o caminos de rodillos. El fundamento del ahorro en estos mecanismos es el siguiente:

Cuando tenemos una cinta que funciona con carga variable, la demanda de potencia varía, si mantenemos la velocidad, entre el 100% de potencia a plena carga, y

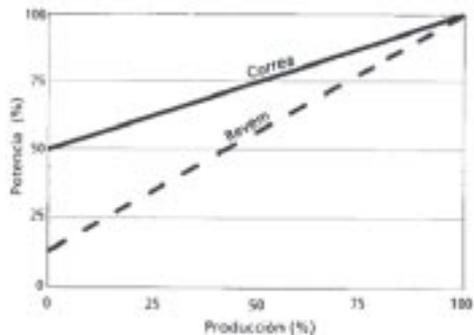


Figura 4: Cinta Transportadora

aproximadamente el 50% en vacío. Esta potencia de vacío, y en general la potencia a cargas intermedias, se puede reducir significativamente, tal y como podemos apreciar en la figura.

El ahorro se debe a que las pérdidas por rozamiento dependen de forma lineal de la velocidad, así cuando la cinta funciona en vacío, podemos bajar la velocidad a menos de la mitad bajando las pérdidas en más del cincuenta por ciento. Es posible seguir un razonamiento análogo para cargas intermedias.

Lo que se pretende es adecuar la velocidad de la cinta a la producción de tal manera que la carga sea siempre del 100%. Un ejemplo, si una fábrica tiene dos líneas de producción con una sola cinta que recoge los productos de las dos, y una de las líneas se encuentra parada, la cinta irá a media carga. Si bajamos la velocidad de la cinta a la mitad, la velocidad de llegada de producto no varía pues aunque la velocidad baja a la mitad, la carga es el doble. Sin embargo, las pérdidas por rozamientos que dependen de la velocidad fundamentalmente, habrán

bajado más del 15%.

El razonamiento se puede extender a todo tipo de cargas variables, cuyo objetivo será llevar la cinta a plena carga adaptando la velocidad de la misma al régimen de producción.

Especial importancia tienen estas cintas en minería, canteras y centrales eléctricas, donde las potencias son muy elevadas y la carga altamente variable.

Hay que hacer mención, una vez más, del efecto arrancador que tienen los reguladores. En cintas transportadoras, los arranques suelen ser críticos. La mayor parte de desgastes, envejecimiento y roturas se dan en estos momentos, debido a las altas tensiones que tiene que soportar la cinta.

3.5 Sopladores

Una soplante es, básicamente, un ventilador que funciona a presiones mayores que un ventilador, aunque menores que un compresor. A menudo se les denomina, de forma poco acertada, turbinas.

Se pueden encontrar funcionando, bien dando presión, bien disminuyéndola, haciendo vacío. La regulación electrónica presenta ventajas frente a los demás métodos alternativos.

Es muy común encontrar sopladores en tratamiento de aguas negras, donde se requiere una buena aireación para que el proceso sea efectivo. La inclusión de un regulador optimiza en todo momento la cantidad de oxígeno en la planta de tratamiento. Este modo de operar permite substanciales ahorros de energía

anuales, ya que estamos ante procesos que funcionan 24 horas cada día del año.

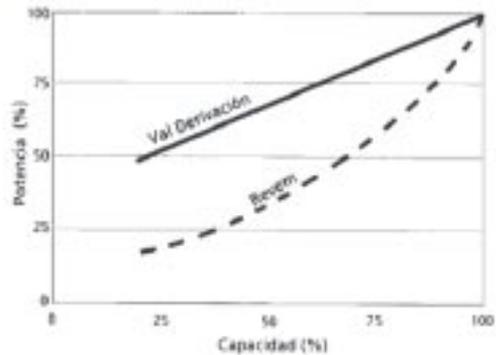


Figura 5: Compresores

Más efectiva es la regulación mediante válvula de sobrepresión, aunque sigue sin superar al convertidor de frecuencia. El regulador presenta además la ventaja de hacer menos ciclos para un mismo caudal, lo que redundaría en menores desgastes, sobre todo en compresores de desplazamiento positivo, donde el número de ciclos realizados es fundamental en la vida del compresor.

Existen aplicaciones en la industria en compresores para frío, en los que la inclusión de un regulador provoca que la producción de cada frigoría cueste hasta un 32% menos de lo que costaría por regulación con métodos tradicionales.

Cuando un compresor funciona entre dos presiones, aparte del ahorro de energía que supone regular electrónicamente el motor, nos encontramos con el valor añadido de

la eliminación de puntos de rocío, al evitar compresiones y descompresiones. Este hecho reviste gran importancia, debido a que las juntas de goma se agrietan y estropean con la humedad. Trabajando de un modo más continuo, evitamos este efecto, con lo que ganamos en disponibilidad y en mantenimiento preventivo.

4.0 Reducción de la carga del motor
Cuando se examina la eficacia de un sistema gobernado por un motor, la primera cuestión debería ser si la carga controlada por el motor (es decir, el resultado del trabajo que produce el eje del motor) puede ser reducido o incluso si el equipo se necesita aún. Hay una pequeña cuestión en la optimización del motor y sus controles, si el equipo manejado y la fuerza que transmite no es eficiente. Muchas de las técnicas para reducir la carga no son caras y por tanto proporcionan un excelente punto para comenzar.

Las siguientes secciones aconsejan sobre las principales maneras de reducir la carga el motor.

4.1. Opciones de ahorro de energía.

4.1.1 Bombas.

- Seleccionar una bomba con un buen rendimiento y hacerla operar cercana a sus características normales y críticas.
- Si permanece a baja carga, instalar un pequeño impelente o sustituir el existente.
- Prestar especial atención a

bombas en paralelo - añadiendo más bombas podemos hacer que el sistema sea menos eficiente progresivamente.

- Minimizar el número de codos en las tuberías.
- Considerar la mejora del rendimiento de las bombas usando revestimientos de baja fricción.
- Usar siempre tuberías de baja fricción y considerar la renovación de las tuberías viejas.
- Comprobar que las entradas de presión de las bombas están correctas.
- Realizar el mantenimiento de la bomba. Sin mantenimiento, el rendimiento de la bomba podría disminuir un 10% de cuando era nueva.
- Para grandes bombas, establecer un programa para calcular el tiempo óptimo de restauración.

4.1.2 Ventiladores.

- Elegir un ventilador con un buen rendimiento.
- Conservar los filtros limpios para minimizar las caídas de presión.
- Limpiar las aspas con regularidad.
- Evitar las caídas de presión innecesarias en los conductos.
- Adecuar los reguladores para sellar los sistemas de extracción en la maquinaria nueva.

- Instalar un control para encender el ventilador solo cuando sea necesario.
- Utilizar sistemas para reducir la velocidad del ventilador cambiando los tamaños de las poleas. Cuando haya varios ventiladores, encenderlos o apagarlos para responder a los requerimientos.
- Comprobar las caídas de presión en los filtros y sustituirlos rápidamente cuando las caídas sean excesivas. Evitar diseñar el sistema según un estándar excesivamente elevado e innecesario.

4.1.3 Compresores.

- Tener en cuenta las alternativas a los compresores, por ejemplo usar electricidad en lugar de componentes neumáticos.
 - Buscar el tamaño adecuado de compresor. Si se necesitan varios compresores, utilizar un controlador/secuenciador.
 - Considerar la instalación de un pequeño compresor para usarlo durante los periodos de baja exigencia.
 - Realizar el mantenimiento regularmente, evitando el uso de piezas de baja calidad. Producir la presión más baja posible.
 - Aprovechar el calor producido por los compresores para calentar agua.
 - Comprobar periódicamente los escapes y repararlos rápidamente.
 - Mapear el sistema y aislar las tuberías que no se usen.
 - Eliminar o desconectar las tuberías que no se usen permanentemente.
 - Usar electroválvulas para aislar la maquinaria que sea propensa a filtraciones.
- #### **4.1.4 Sistemas de refrigeración.**
- Asegurarse de que la temperatura del espacio refrigerado no es menor de la que se necesita. Un incremento de 1°C en la temperatura que se desea mantener permite ahorrar entre un 2% y un 4% de energía.
 - Asegurarse de que la carga está tan fría como es posible cuando se introduce en el espacio refrigerado. Cuando sea posible, estudiar un pre-enfriamiento de la carga mediante aire a temperatura ambiente o agua.
 - Minimizar los períodos en los que las puertas del almacén están abiertas.
 - Reparar el sellado de las puertas y/o el aislamiento cuando se dañe.
 - Reducir la entrada de calor recolocando el alumbrado, ventiladores, bombas, etc. Externamente o usando modelos de mayor eficacia.
 - Comprobar la operación de descongelación. Ajustar los temporizadores o adecuar los controles de descongelación.
 - Considerar la instalación de un compresor más eficiente con control de capacidad integrado.

- Controlar el ventilador para adecuarlo a las necesidades de enfriamiento.
- Comprobar las fugas y detenerlas rápidamente. Las burbujas en el líquido indican que la carga es baja y posibles fugas.
- Asegurar que el aire circula libremente alrededor de los condensadores. Tenerlos separados de los muros y evitar que les de la luz del sol directamente.

4.1.5 Cintas transportadoras.

- Usar sensores, por ejemplo una fotocélula o un sensor de corriente en el motor para detectar cuándo la cinta está sin carga o apagada.
- Considerar mapear la cinta de manera que las secciones que no se usen estén desconectadas.

4.2 Eficiencia de la transmisión.

Una vez que se ha examinado la carga para asegurarse de que se está usando eficazmente, debemos prestar atención al sistema de transmisión.

4.2.1 Eficiencia de los engranajes.

La mayoría de los ejes de engranajes tienen una eficacia elevada. Sin embargo, una selección cuidadosa y el mantenimiento de los engranajes mejorará el rendimiento.

Las pérdidas por transmisión dependen de:

- El tipo de engranaje. Un engranaje de dientes rectos tiene un rendimiento del 85-

90%, comparado con el 98.0-98.5% de uno helicoidal.

- Selección de la transmisión. Minimizando el número de engranajes se produce una máxima eficiencia, pero se incrementa el costo y el tamaño de la transmisión.
- Calidad de los engranajes. Las pérdidas por fricción dependen de la precisión y calidad de la superficie del engranaje. Por ello es importante usar engranajes suministrados por fabricantes de alta calidad.
- Tipo de comportamiento.
- Lubricación.
- Condiciones del engranaje.

Prestar atención a estos detalles incrementará la eficiencia de la transmisión.

4.2.2 Cintas transportadoras.

- Las modernas correas lisas o con cuñas pueden ser más eficientes que las tradicionales en V. Por añadido, las correas en V y con cuñas se deterioran con el tiempo y pierden el 4% de su eficacia, incluso el 5-10% más, si no se mantienen adecuadamente.
- Sobredimensionar o infradimensionar las correas en V puede producir pérdidas adicionales.
- Asegurar que la tensión de las correas es la adecuada.
- Si falla una correa en un sistema compuesto por varias, sustituir todas. Idealmente, evitar sistemas con muchas correas porque las diferencias

- de tensión son inevitables.
- Comprobar el alineamiento de las poleas. Para sistemas con correas, montar el motor en guías deslizantes que permitan que tanto el alineamiento como la tensión se puedan ajustar fácilmente. Es importante que los ejes del motor y de la carga estén paralelos. Las poleas pueden estar alineadas funcionando con mucha tensión entre la polea grande y la pequeña. Si los ejes están paralelos, la correa será paralela a las superficies de ambas poleas.
- Cuando las poleas deban ser sustituidas, es particularmente beneficioso considerar cambiar el tipo de accionamiento.

4.2.3 Alineación de los acoplamientos.

Los fabricantes de motores publican información sobre los alineamientos simples utilizando galgas extensométricas: muchos lugares podrías aprovecharse de la sencillez, aunque sean más caros, de los equipos de alineación por láser.

5.0 Reducción de las pérdidas en el motor

Esta sección trata las formas prácticas de reducir las pérdidas mecánicas en los motores de inducción de corriente alterna e indica los ahorros a hacer la medida de eficiencia energética en tres casos, es decir:

- Motores de alto rendimiento.
- Una reparación cuidadosa del motor asegura que las pérdidas

en el motor se minimizan.

- Usar motores del tamaño adecuado para evitar grandes pérdidas de motores con parte de la carga.

Como complemento, dos técnicas para reducir las pérdidas en motores con cargas ligeras pueden ser:

- Reconexión permanente en estrella.
- Control de optimización de energía.

El rendimiento de un motor podría parecer elevado comparado con el de la bomba o el ventilador que controlan, pero 1 kW de pérdidas por calor en un motor de 7.5 kW es un enorme gasto de energía. Podría incluso estar pagando dos veces más por esta pérdida de calor.

6.0 Tecnología de los variadores de velocidad

Los Convertidores de Frecuencia trabajan con tecnología PWM, en la cual la forma de curva de la tensión entregada al motor es sincronizada a alta frecuencia por conmutaciones en los componentes de salida del inversor. El rendimiento de este método de control es superior al 95% .

Esta forma de onda sintetizada tiene una pequeña cantidad de distorsión de armónicos, los cuales incrementan las pérdidas en el motor. Con motores viejos, es importante comprobar que el aislamiento puede resistir los picos de tensión debidos al Convertidor de Frecuencia.

La utilización de Convertidores de Frecuencia con control vectorial presenta rendimiento próximo a los motores DC. Esta característica hace que los Convertidores sean instalables

en aplicaciones donde los motores de DC eran los más utilizados.

6.1 Mejoras en la tecnología de los variadores de velocidad.

En la pasada década se llevo a cabo considerables procesos en la realización de variadores electrónicos para motores de inducción lo que significa que estas unidades son la elección preferida para las aplicaciones de variación de velocidad. Las mejoras han sido posibles gracias al uso de semiconductores más potentes que pueden conmutar más rápido y abaratan los procesos para control.

Los principales efectos de estas mejoras son:

- Reducir costos.
- Mejorar el rendimiento, especialmente en control dinámico;
- Mejor forma de onda, reduciendo el ruido del motor y menor pérdidas;
- Gran flexibilidad de control;
- Mejora en la etapa de entrada del variador, reduciéndose la línea de armónicos, cos ϕ unitario, regeneración y filtrado.
- Mucha mayor flexibilidad.

6.2 Características de optimización de energía en variadores.

El Convertidor de Frecuencia tiene incorporadas características en sus diseños para la optimización de energía las cuales son extremadamente útiles con variaciones de velocidad suaves en las cargas. Esta característica reduce la tensión de salida en baja carga y de este modo reduce las pérdidas en el hierro.

El ahorro de energía, unido a la

bajada de velocidad en la carga, es difícil de estimar. Aunque es improbable que las características de optimización en el ahorro de energía sean suficientes para justificar la compra de un variador de velocidad, proporcionan ventajas adicionales para bajos costos o ningún costo en bajas velocidades. Esto se cumple en aplicaciones donde el motor esta sobredimensionado.

7.0 Conclusiones

Los convertidores de frecuencia o variadores de velocidad surgieron como una excelente alternativa para controlar la velocidad a los motores de CA. Cuestión que hoy en día es casi imprescindible en muchos casos. Permitiendo que los procesos se adapten fácilmente a cualquier variación de la demanda o el suministro, lo que contribuye a reducir costos y a mejorar la calidad del producto y, además, el suavizar los cambios de velocidad reduce la fatiga de los mecanismos evitando un buen número de problemas. En otros casos puede interesar optimizar el par y alcanzar la máxima aceleración que tolera el motor y en otros optimizar la energía eléctrica que se consume. Ya que es bueno destacar que la mayor parte de la energía eléctrica se consume en los motores eléctricos, que ahora son alimentados a través de variadores de velocidad.

En este trabajo se muestra un conjunto de alternativas posible para según las carga industrial, la transmisiones, el motor y la tecnología del variador de velocidad contribuir al ahorro energético, tan necesario hoy en día.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1].- Bose, B. K. "Power Electronics – A technology review". Proceedings of IEEE, Vol. 82, No. 8, 1992.
- [2].- Danfoss, *Facts Worth Knowing About Frequency Converters*.
- [3].- Díaz Rodríguez, J. L. *Control por campo orientado del motor de inducción con adaptación de parámetros por modelo de referencia*. Tesis de Maestría, UCLV, 2000.
- [4].- Leonhard, W. "Adjustable-speed AC Drives", Proceedings of IEEE, Vol. 76, No. 4, 1988, pp. 455-470.
- [5].- Leonhard, W. *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1985.
- [6].- Vas, P. *Vector Control of AC Machines*, Oxford Science Publications, New York, 1990.