



PROGRAMA INTEGRAL DE “ASISTENCIA TÉCNICA Y CAPACITACIÓN PARA LA FORMACIÓN DE ESPECIALISTAS EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE GUATEMALA”

**CURSO – TALLER
PROMOTORES DE AHORRO Y EFICIENCIA DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

MÓDULO IV

**AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE
MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN DE
ALTA EFICIENCIA**



Guatemala, Guatemala

1 – 5 / Marzo / 2010



4. AHORRO DE ENERGIA MEDIANTE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCION DE ALTA EFICIENCIA.

4.1 MOTORES ELÉCTRICOS DE ALTA EFICIENCIA.

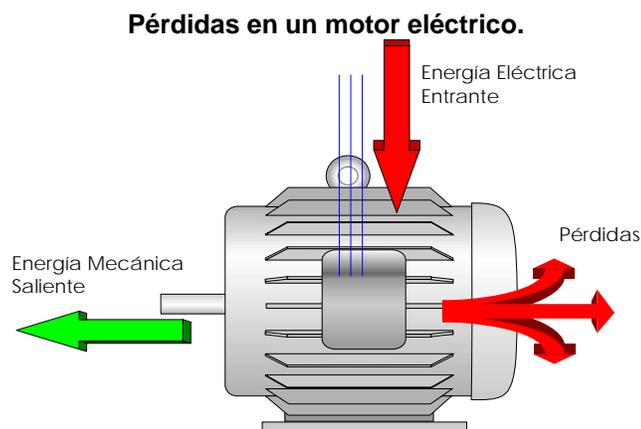
Los motores eléctricos son los usuarios de mayor consumo de energía eléctrica en plantas industriales. Aproximadamente entre el 60 y 70 % del consumo de energía eléctrica de una industria corresponde a equipos electromotrices tales como ventiladores, bombas, compresores, bandas transportadoras, etc..



Es evidente el gran impacto de los motores eléctricos en el consumo de energía en el sector industrial, por tanto, resalta la importancia de identificar y evaluar oportunidades de ahorro de energía en ellos. Sin embargo, es necesario determinar con precisión el estado energético actual de los mismos (factor de carga, eficiencia, factor de potencia, antigüedad, etc.) y conocer sistemas alternativos como son motores de alta eficiencia y variadores de frecuencia entre otros.

Pérdidas de energía y eficiencias.

La función de un motor eléctrico es convertir la energía eléctrica en energía mecánica para realizar un trabajo útil. En la transformación una parte de la energía eléctrica tomada de la red se convierte en calor, constituyendo una pérdida inherente al motor, ver figura.



Las pérdidas de un motor de inducción, pueden ser desglosadas en 5 principales áreas, cada una de estas depende del diseño y construcción del motor. Estas pérdidas se clasifican en aquellas que ocurren cuando el motor está energizado y permanecen para un voltaje y velocidad dados, y las que se dan en función de la carga del motor.

Eficiencia.

La eficiencia de un motor es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada. Este es el concepto más importante desde el punto de vista del consumo de energía y del costo de operación de un motor eléctrico. La eficiencia se puede expresar de las siguientes maneras:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia Mecánica de salida}}{\text{Potencia Eléctrica que entra}}$$



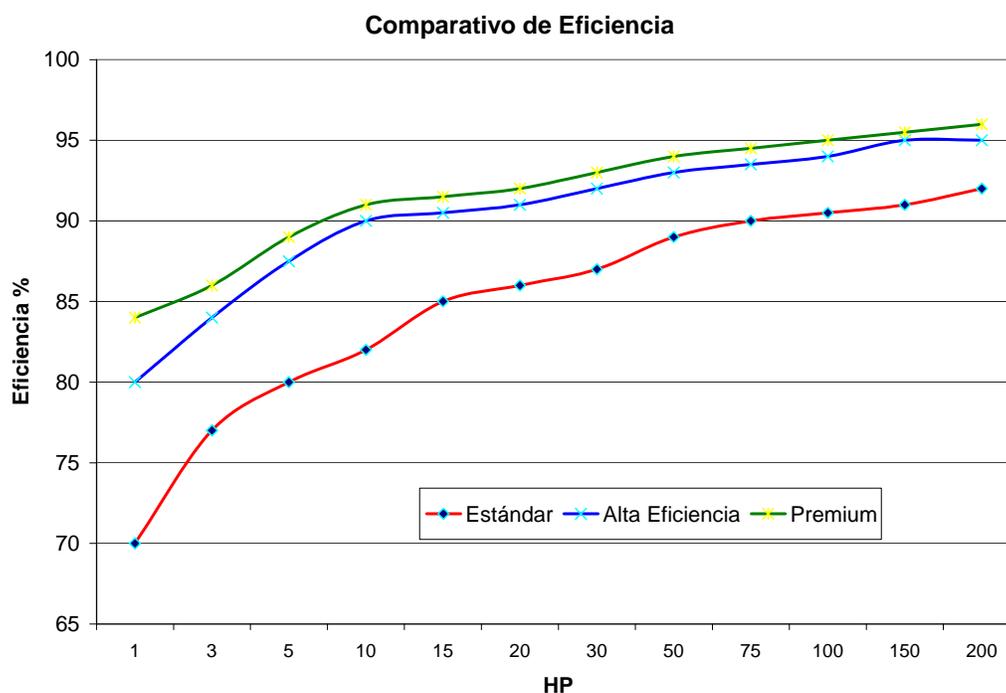
$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia Eléctrica que entra} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia Eléctrica que entra}}$$

El valor mas alto de eficiencia sería la unidad, si acaso las pérdidas fueran cero, como lo indica la segunda expresión. Por ello los fabricantes de motores están haciendo innovaciones tecnológicas tendientes a disminuir las pérdidas al máximo posible y lo están logrando con un diseño mejorado empleando materiales de alta calidad y un mejor proceso de fabricación.

Conforme la eficiencia pueden considerarse tres géneros de motores eléctricos:

- Motores de Eficiencia Estándar
- Motores de Alta Eficiencia
- Motores de Eficiencia Premium

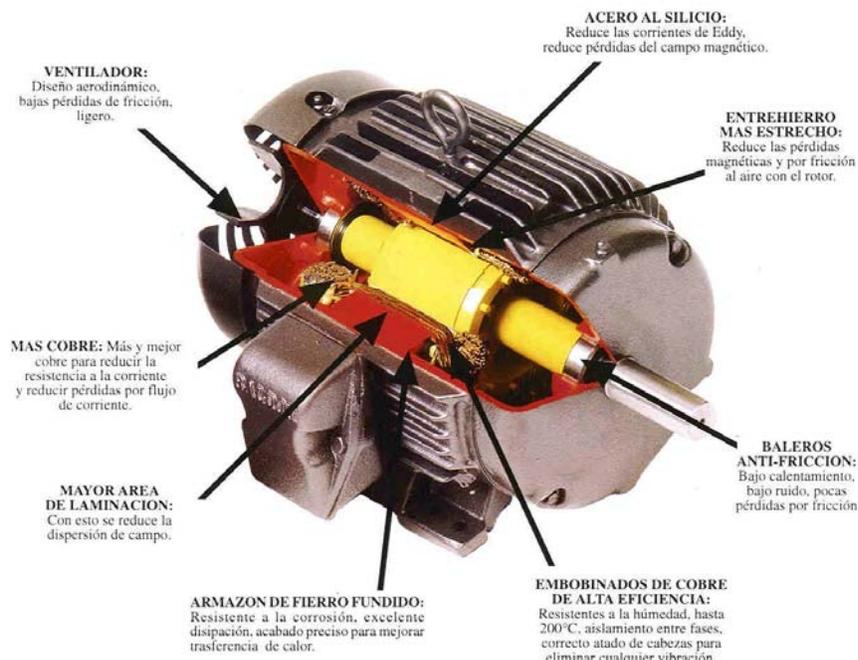
Los motores estándar no consideran la eficiencia como la principal cualidad, mas bien privilegian la funcionalidad y precio, prácticamente los motores con mas de 15 años podrían considerarse de eficiencia estándar. El concepto alta eficiencia surge en la década de los años noventa, como consecuencia de contrarrestar los altos precios de la energía y por la necesidad ya existente de hacer un uso eficiente y racional de la energía. La innovación de los Premium se da en la actual década con la pretensión de elevar aun más la eficiencia de los motores eléctricos, para ellos se ha perfeccionado el proceso de manufactura y se utilizan materiales muy superiores, ello acarrea que el diferencial en precio sea también mas elevado.





Para mejorar la eficiencia se deben disminuir las pérdidas en el motor, esto se logra con el cambio de diseño, materiales de alta calidad y un mejor proceso de fabricación. Los motores de alta eficiencia a determinada carga entregan mayor o igual cantidad de trabajo con menor consumo de energía que un motor estándar.

¿POR QUE ESTE MOTOR ES DE ALTA EFICIENCIA?



Los motores eléctricos tienen la máxima eficiencia, cuando las pérdidas permanentes o fijas son casi iguales a las pérdidas variables.

Factor de Carga.

La potencia nominal de un motor eléctrico indica la potencia mecánica de salida o en el eje que es capaz de entregar el motor, el factor de carga es un índice que indica la potencia que entrega el motor cuando se encuentra ya en operación con relación a la que puede entregar. Así un motor de potencia nominal 40 HP que trabaja entregando solo 20 HP, estará trabajando al 50%.

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\text{Potencia real entregada}}{\text{Potencia de placa del motor}}$$

Factor de servicio.

El factor de servicio es un indicador de la capacidad de sobrecarga que puede soportar un motor eléctrico, como ejemplo el valor de 1.1 significa que el motor puede trabajar al 110%; sin embargo esto no quiere decir que tenga que trabajar continuamente a ese valor, el factor de servicio debe entenderse como una capacidad adicional que posiblemente se llegue a ocupar en muy raras ocasiones, de hecho los motores sobrecargados reciben mayor corriente eléctrica que la nominal, calentándose en mayor medida y reduciendo notablemente su vida útil, además de bajar la eficiencia de su operación.

$$\text{Potencia máxima en sobrecarga} = \text{Factor de Servicio} \times \text{Potencia del Motor}$$



Potencia adecuada del motor.

En virtud de que la mayoría de los motores eléctricos presentan su mayor eficiencia al 75% de factor de carga, es conveniente que la elección de la potencia de un motor sea para que este trabaje al 75 % de carga. Así trabajara en el rango de alta eficiencia y tendrá un 25% de capacidad adicional para soportar mayores cargas de trabajo, evitando también el sobrecalentamiento del motor.

La potencia del motor eléctrico la determina el equipo acoplado, que la indica en BHP, Brake Horse Power o Caballo de Potencia en la Flecha; supongamos que tenemos un ventilador que indica que la potencia que debe recibir es 15 BHP, la potencia de motor que debemos acoplar a este ventilador debe ser:

$$\text{Potencia del motor} = \frac{\text{Potencia en la flecha (BHP)}}{0.75} = \frac{15 \text{ BHP}}{0.75} = 20 \text{ HP}$$

El Par en Motores de Inducción.

Existen varios tipos de motores, cada uno con características particulares que permiten obtener un servicio específico y particular, el par es uno de los factores que los caracteriza.

El término par del motor se refiere al torqué desarrollado por éste. El par motor se expresa y se mide en Newton por metro (Nm); un par de 20 Nm, es igual al esfuerzo de tracción de 20 Newtones, aplicado a un radio de un metro.

Por otro lado, la potencia puede ser calculada si se conoce el torqué requerido por el equipo, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{HP} = \frac{\text{Torque (Nm) x RPM}}{K}$$

donde: K es constante, igual a 7,124 si T esta en Nm; y 5,250 si T esta pie- libra.

Ejemplo: Si el torqué requerido para un agitador es de 15 Nm, y se requiere una velocidad de 3,600 RPM, cuál será la potencia nominal del motor para satisfacer esta carga

$$\text{HP} = \frac{15 \text{ Nm} \times 3,600 \text{ RPM}}{7,124} = 7.58 \text{ HP}$$

Por lo tanto, un motor de 7.5 HP puede satisfacer dicha carga.

Ejemplo: Si el torqué requerido para un mezclador es de 84 Nm, y se requiere una velocidad de 1,700 RPM, ¿cuál será la potencia nominal del motor para satisfacer esta carga?



Par a Plena Carga.

El par a plena carga es el necesario para producir la potencia de diseño a la velocidad de plena carga. El par a plena carga de un motor es a la vez base de referencia, el par de arranque y el par máximo se comparan con él y se expresan en la forma de un cierto porcentaje del par a plena carga.

Par de Arranque.

El par de arranque o a rotor bloqueado es el torqué que el motor desarrolla cuando deja de estar parado.

Par Máximo.

Es el máximo torqué que desarrolla el motor, es usualmente expresado como un porcentaje del torque a plena carga. El par máximo de los motores ordinarios varía entre 1.5 y 3 veces del par de plena carga.

La siguiente tabla indica cual es el tipo de diseño del motor y la aplicación. (Estándares de diseño eléctrico NEMA)

Clasificación	Torque de Arranque (% del torque a plena carga)	Torque de Máximo (% del torque a plena carga)	Corriente de Arranque	Deslizamiento	Aplicación típica
Diseño B Torque de arranque y corriente de arranque normal	100 - 200 %	200 -250 %	Normal	< 5%	Ventiladores, sopladores, bombas centrífugas y compresores, etc. donde los requerimientos del torque de arranque son relativamente bajos.
Diseño C Torque de arranque alto y corriente de arranque normal	200- 250 %	200 -250 %	Normal	< 5%	Agitadores, bombas reciprocantes y compresores, etc. donde se requiere baja carga en el arranque.
Diseño D Torque de arranque alto y alto deslizamiento	275%	275%	Bajo	> 5%	Equipos con elevada carga en el arranque, como elevadores, extractores, bombas de pozo, etc.

Los motores de diseño B son por mucho los más comunes y satisfacen todas las aplicaciones con excepción de alto torqué de arranque o elevados picos en la carga.

Determinación de Factor de Carga Y Eficiencia por El Método de Deslizamiento.

Motores de corriente alterna.

Los motores de corriente alterna se clasifican de dos maneras; motores asíncronos (o de inducción) y motores síncronos.

Los motores asíncronos basan su funcionamiento en la creación de un campo magnético giratorio en el entrehierro, debida a la circulación de corriente alterna trifásica por los devanados trifásicos del estator. La velocidad de giro de este campo magnético en revoluciones por minuto (r.p.m.) es:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p}$$

donde :

f = Frecuencia de alimentación

p = Número de polos del devanado del estator.



Ejemplo: Se suministra energía eléctrica a un motor de 20 HP de dos polos a una frecuencia de 60 Hz, ¿Cuál será la velocidad sincrónica del motor?.

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 60}{2} = 3600 \text{ rpm}$$

Ejercicio: Determine la velocidad sincrónica de motores de inducción de 4, 6, 8 y 10 polos.

Deslizamiento.

El rotor a una gran velocidad “n”, que no llega a ser la velocidad de sincronismo, sin embargo es muy próxima ésta.

Se le llama deslizamiento “s”, a la diferencia entre la velocidad de sincronismo n_s y la del rotor n , expresada en % de la velocidad de sincronismo:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100$$

Ejemplo: El motor del ejemplo anterior, tiene una velocidad a plena carga de 3,550 R.P.M., determinar el deslizamiento del mismo.

$$S = \frac{3600 - 3550}{3600} \times 100 = 1.39 \%$$

Determinación del Factor de Carga.

A partir de los datos de placa y de los parámetros medidos se determina la potencia demandada en la línea con la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia demandada (kW)} = \frac{\sqrt{3} \times V \times I \times \text{F.P.}}{1000}$$

Nota: La potencia demandada también puede obtenerse mediante mediciones.

Conociendo las RPM de operación del motor, el deslizamiento se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Deslizamiento} = (\text{RPM}_{\text{síncronas}} - \text{RPM}_{\text{medidas}})$$

Ahora se puede estimar la carga del motor y la eficiencia a partir del deslizamiento:

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Deslizamiento}}{\text{RPM}_{\text{síncronas}} - \text{RPM}_{\text{de placa}}}$$

Este método para calcular el factor de carga y eficiencia del motor no debe ser utilizado con motores reembobinados o que no operen al voltaje de diseño. Sólo cuando se realicen los ajustes en la eficiencia necesaria.

La potencia de salida o al eje del motor se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia de salida o en la flecha} = \text{Factor de carga} \times \text{Potencia de placa}$$



Por último, la eficiencia se determina como:

$$\text{Eficiencia del motor} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia demandada}}$$

$$\text{Eficiencia del motor} = \frac{0.746 \times \text{HP de salida}}{\text{kW demandados}}$$

Ejemplo:

DATOS:

RPM síncrona = 1,800

RPM medida = 1,770

RPM de placa = 1,750

HP de placa = 25

kW demandados = 13.1

$$\text{Deslizamiento} = 1,800 - 1,770 = 30$$

$$\text{Factor de carga} = \frac{30}{1800 - 1750} \times 100 = 60\%$$

$$\text{HP de salida} = 0.6 \times 25 = 15$$

$$\text{Eficiencia del motor} = \frac{0.746 \times 15}{13.1} \times 100 = 85.4\%$$

Ejercicio: ¿Cuál es el deslizamiento, factor de carga y eficiencia de un motor de 40 Hp, con una velocidad de placa de 3,570 RPM, el cuál registro una potencia trifásica de 33 kW?. Se midió la velocidad con un tacómetro y fue de 3,580 RPM.



Ejercicio: Los sopladores de una industria son accionados mediante un motor eléctrico con las siguientes características:

MARCA	SIEMENS
POTENCIA	450 HP
RPM	3565
VOLTS	460
AMPERES	487
F.S.	1.15
AMBIENTE	40°C
NEMA DESIG.	B
 AISLAMIENTO	F

Se realizaron mediciones de velocidad en uno de los sopladores a diferentes aperturas de la válvula. Los datos medidos, pies cúbicos por minutos (CFM) entregados como aire, velocidad de giro del motor en revoluciones por minuto (RPM), y potencia eléctrica demandada por el motor.

Soplador 4

Flujo CFM	RPM	kW
10,338	3,568	341
11,066	3,565	382
9,890	3,570	315
7,750	3,582	286
10,890	3,566	365
8,131	3,575	295
7,960	3,578	286

Indique como se relaciona:

- a) Máxima velocidad con el flujo entregado
- b) Máximo Flujo con la velocidad del motor
- c) Mínimo Flujo con el factor de carga
- d) Mínima Velocidad con el factor de carga.
- e) Máximo Flujo con el factor de carga.

Determine la eficiencia del motor para cada condición de operación:



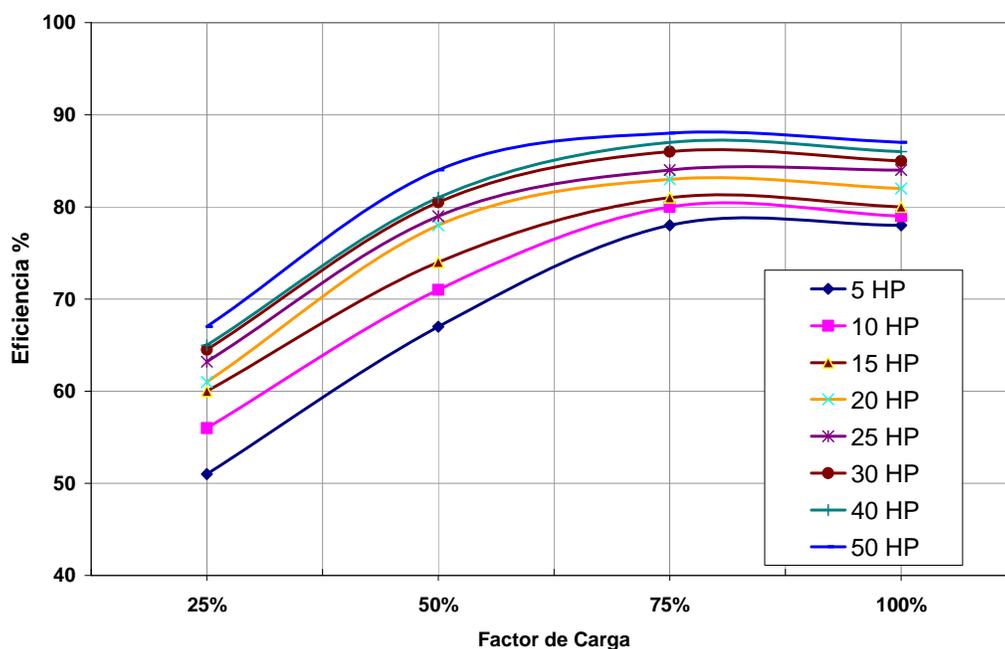
Determinación del factor de carga referido a la potencia de placa.

En este método es necesario conocer la curva del comportamiento del motor, es decir, eficiencia y factor de potencia contra factor de carga.

Curva de comportamiento de motores

Factor de carga	Eficiencia	Factor de Potencia
100%	84%	89%
75	86%	85%
50	79%	76%
25	73%	60%

Factor de Carga y Eficiencia en Motores Estándar



El factor de carga se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{Potencia medida}}{\text{Potencia de placa entre la eficiencia a plena carga}}$$

ó

$$\text{Factor de carga} = \frac{\text{kW demandados} / 0.746}{\text{Potencia de placa} / \text{eficiencia a plena carga}}$$

La eficiencia se determinará interpolando en la curva de comportamiento del motor con base al factor de carga obtenido en la sección anterior.



Las ecuaciones de interpolación utilizadas son las siguientes:

$$\text{Factor de interpolación} = \frac{X_1 - X}{X_1 - X_2}$$

$$Y = Y_1 - \text{Fac. Int.} \times (Y_1 - Y_2)$$

Ejemplo: Un motor de 30 Hp de 3,580 RPM a 440 Volts, tiene un comportamiento en su eficiencia y factor de potencia similar al de la tabla anterior. Por otro lado, se realizaron mediciones de potencia la cuál promedio un valor de 16.5 kW. ¿Cuál es su factor de carga y su eficiencia a ese factor de carga?.

$$\% \text{ de factor de carga} = \frac{16.5 / 0.746}{30 / 0.89} \times 100 = 65.6 \%$$

$$\text{Factor de interpolación} = \frac{75 - 65.6}{75 - 50} = 0.376$$

$$\text{Eficiencia} = (0.86 - (0.376 \times (0.86 - 0.79))) \times 100 = 83.37 \%$$

Ajustes de eficiencia.

La eficiencia se debe ajustar por los siguientes factores:

- Variación de voltaje.
- Desbalanceo de voltaje.
- Motor rebobinado.

Variación de voltaje.

La variación porcentual es la relación entre el voltaje nominal con respecto al voltaje de operación, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Variación de Voltaje} = \left[\frac{\text{Voltaje promedio medido}}{\text{Voltaje Nominal}} - 1 \right] \times 100$$

Una vez obtenido este valor, con ayuda de la gráfica siguiente se determina el porcentaje de cambio en la eficiencia, factor de potencia y corriente.

Ejemplo: El voltaje trifásico que es alimentado a un motor de 25 Hp es de 455 Volts, y el voltaje de placa de este motor es de 440 Volts. La eficiencia del motor es de 87.9% antes de aplicar el factor de corrección, se requiere determinar la eficiencia del motor ajustándola debido a la variación de voltaje.

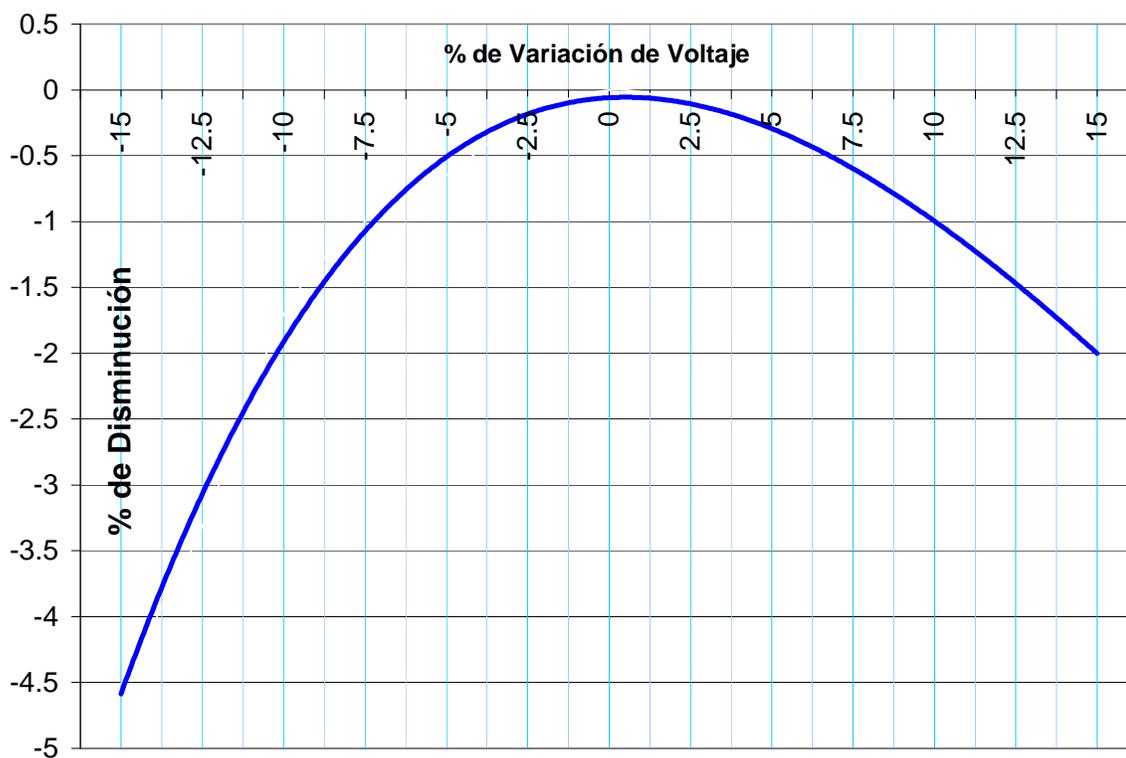
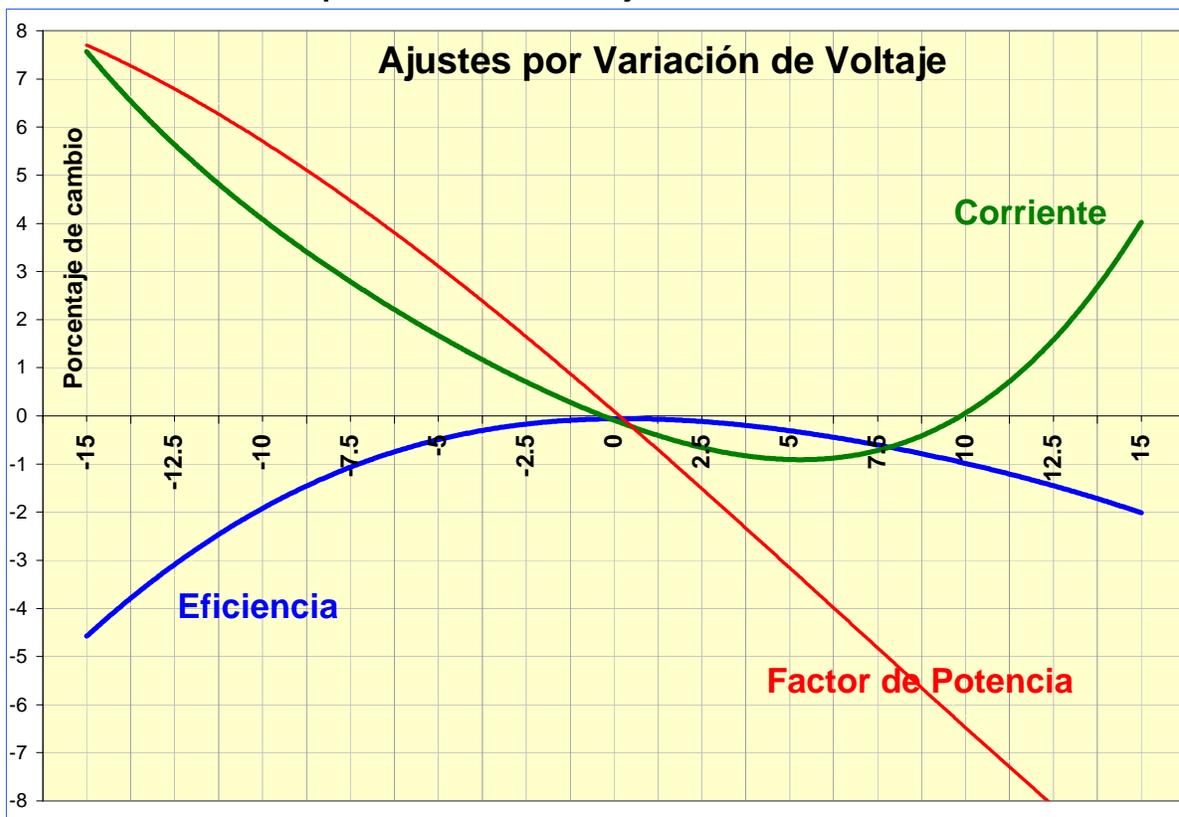
$$\% \text{ Variación porcentual} = \left(\frac{455}{440} - 1 \right) \times 100 = 3.4\%$$

Factor de ajuste de eficiencia = - 0.19

$$\text{Eficiencia} = 87.9 \times (1 - 0.0019) = 87.73\%$$



Gráfica. Efecto por variación de voltaje en el funcionamiento del motor.





Desbalanceo de voltaje.

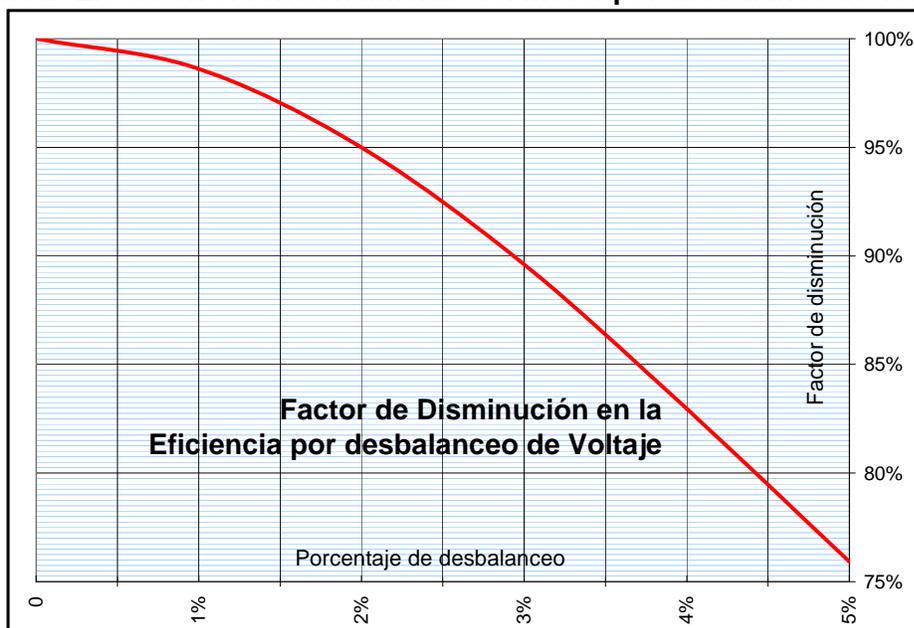
El desbalanceo de voltaje está definido como la máxima desviación del voltaje de línea y el voltaje promedio en un sistema trifásico, dividido entre el voltaje promedio, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Desbalanceo de Voltaje} = \frac{\text{Máxima Diferencia al Promedio}}{\text{Voltaje Promedio}} \times 100$$

$$\text{Máxima Diferencia al promedio} = \text{Volt}_{\text{máximo}} - \text{Volt}_{\text{promedio}}, \text{ ó, } \text{Volt}_{\text{promedio}} - \text{Volt}_{\text{mínimo}}$$

Si los voltajes están desbalanceados, la eficiencia del motor disminuirá a medida que aumente el desbalanceo de voltaje, tal como se muestra en la siguiente gráfica:

Gráfica. Efecto en el funcionamiento del motor por desbalance de voltaje.



Ejemplo:

Se realizaron mediciones de voltaje entre fases y se obtuvieron los siguientes valores 462, 463 y 455 Volts, la eficiencia del motor antes de ajustes es de 87.91%. Con el desbalanceo actual determine la eficiencia real del motor.

El voltaje promedio = $(462 + 463 + 455) / 3 = 460$ Volts.

El máxima diferencia entre voltaje de línea y el promedio se determina de la siguiente manera:

$$\% \text{ Desbalanceo de Voltaje} = ((460 - 455) / 460) \times 100 = 1.1\%$$

De acuerdo a la curva se tiene un factor de ajuste de 0.98 por tanto la eficiencia real se determina como sigue:

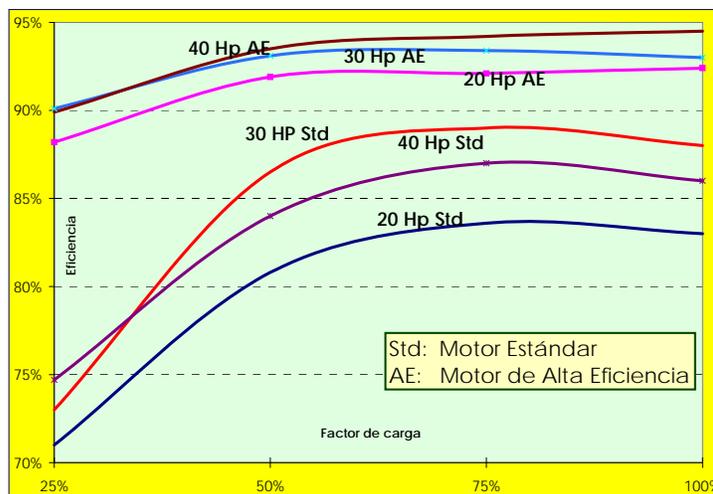
$$\text{Eficiencia real} = 87.91 \times (0.98) = 86.15\%.$$



Ejercicio: Se realizaron mediciones de voltaje entre fases y se obtuvieron los siguientes valores 450, 454 y 445 Volts, la eficiencia del motor antes de ajustes es de 85.9%. Con el desbalanceo actual determine la eficiencia real del motor.

Sustitución de un motor estándar por otro de alta eficiencia.

La siguiente gráfica presenta las curvas de eficiencia en función del factor de carga para 6 motores eléctricos de 1800 rpm. Las curvas superiores corresponden a motores de alta eficiencia de 20, 30 y 40 Hp, las otras tres curvas son de motores estándar de la mismas potencias.



La potencia eléctrica que demande un motor esta totalmente relacionada con la eficiencia del mismo y con el factor de carga.

$$\text{Potencia Demandada} = \frac{\text{Potencia de Salida}}{\text{Eficiencia}}$$

De tal manera que al mejorar la eficiencia del motor la demanda eléctrica para la misma operación disminuye.

Observando la gráfica anterior resulta que es factible el sustituir motores estándar por motores de alta eficiencia bajo las siguientes circunstancias.

- ➔ Aplicación de Motores de Alta Eficiencia de Menor Tamaño. Cuando el motor estándar esta trabajando con bajo factor de carga.
- ➔ Aplicación de Motores de Alta Eficiencia del Mismo Tamaño. Cuando el motor estándar esta trabajando con un factor de carga entre 60 y 90%.
- ➔ Aplicación de Motores de Alta Eficiencia de Mayor Tamaño. Cuando el motor estándar esta trabajando con un factor de carga mayor al 95%.

En todos lo casos de sustitución deben tomarse muy en serio las condiciones de arranque y tipo de motor requerido. Por otro lado la sustitución debe estar avalada por un estudio minucioso de las condiciones de operación del motor, en el que se investigue sobre todos los parámetros eléctricos que alimentan al motor, sobre todo debe tenerse principal precaución en medir el factor de potencia por cada fase ya que una medición simple de corrientes puede llevar a resultados aberrantes.



Otras alternativas de ahorro en motores son:

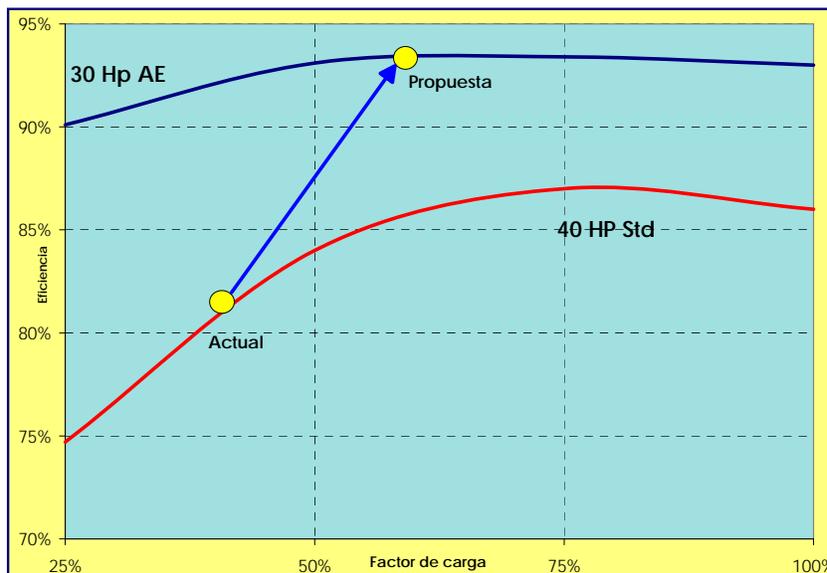
- ➔ La reubicación de motores procurando aprovechar al máximo la eficiencia. El factor de carga óptimo para motores estándar se ubica en un rango del 65 al 85%, de tal manera que los motores que se encuentren más lejos de este rango son candidatos a ser aprovechados en otros puntos de aplicación, donde operen en mejor forma.
- ➔ Mejorar sus condiciones de alimentación eléctrica. Como son el desbalanceo de fases, las variaciones de voltaje, los sistemas sin tierra o mal aterrizados y el bajo factor de potencia.

Ejemplo. Una bomba de solventes de una industria papelera cuenta con un motor de 40 HP, el cual trabaja las 24 horas del día todos los días del mes. Las mediciones realizadas en un diagnóstico energético indican que la potencia que demanda es de 18.18 kW. Se analizó su sustitución por un motor de alta eficiencia de 30 HP y los resultados son los siguientes:

Situación	Estándar	Alta Eficiencia
Potencia del Motor en HP	40	30
Factor de Carga	45%	63%
Eficiencia	82%	93%
Potencia Eléctrica Demandada kW	18.18	16.03
Potencia Mecánica Entregada kW	14.91	14.91
Consumo de Energía Eléctrica	13,089.60	11,541.37
Costo de la Demanda	\$748.09	\$659.61
Costo por Consumo	\$4,026.62	\$3,550.36
Costo por Ajuste en Combustibles	\$1,178.06	\$1,038.72
Costo Mensual por Energéticos	\$5,952.78	\$5,248.68

El reemplazo conduce a un ahorro de 2.15 kW y 1,548 kWh. Los resultados económicos indican un ahorro al año de \$8,449, el costo de adquisición del equipo es de \$13,440 que se recuperan con los mismos ahorros en 1.6 años.

Ahorro Mensual por Sustitución	\$704.09
Ahorro Anual por Sustitución	\$8,449.10
Inversión Aproximada	\$13,440.00
Recuperación de la Inversión en años	1.6



4.2. APLICACIÓN DE CONVERTIDORES DE FRECUENCIA.



La aparición de nuevos conceptos en los procesos industriales sobre la velocidad, eficiencia, factor de potencia y requerimientos adicionales que cada proceso industrial requería, aceleró el desarrollo y optimización de los diseños de máquinas eléctricas.

Uno de los requerimientos más exigentes lo constituye la variación de velocidad la cual obliga a los motores a funcionar en condiciones cambiantes, a veces tan distintas como velocidades se necesitan.

El diseño de los variadores de velocidad en CA ha tenido enormes avances tecnológicos y ha logrado desbancar en muchas aplicaciones al motor de CD. En otras aplicaciones el motor de CD sigue siendo utilizado por su precisión y control de par, por lo que en muchas aplicaciones se puede optar por una u otra con excelentes resultados, sin embargo existen aplicaciones donde la decisión por una tecnología en especial es definitiva y obligada.

Actualmente la aplicación de los variadores de velocidad ya sea en CA o CD está presente en procesos tan variados que su aplicación en el ámbito industrial es cotidiana. Puede decirse que dondequiera que se requiere controlar velocidad, aceleración, par-motor, sentido de giro, el arranque e **incluso ahorrar energía eléctrica** al utilizar motores, se aplica con ventaja, un variador de velocidad.

Enseguida se muestran algunos ejemplos, sin que por ello la lista y descripción sea limitativa:

Procesos de fabricación continúa.

Son procesos donde la fabricación de un producto necesita el flujo constante y continuo de material, tal como la fabricación de papel, película plástica, rollos de lámina metálica, etc. Muchos de los cuáles se fabrican en líneas de producción de gran longitud y el material fluye de inicio a fin sin cortes. A lo largo de la línea se pueden realizar controles de tensión mecánica para mantener constante el espesor y calidad del material, darle acabados, revestimientos o tratamientos de superficie o incluso formado y corte. Terminando la línea generalmente en el enrollado final del producto. Aquí se requiere la variación de velocidad de tal manera que todos los motores permitan la coordinación de velocidades y frecuentemente de par-motor para mantener la línea funcionando sin generar tirones que romperían al material ni aflojamiento que deterioren el mismo, es decir, manteniendo una tensión constante. Conforme el producto se va enrollando al final de la línea, el radio de la bobina o rollo irá aumentando al final y disminuyendo al inicio, por lo que se requiere una variación coordinada de velocidad de giro en los motores de todo el proceso para mantener constante su velocidad de línea y la tensión mecánica de cada sección, Además esto exige velocidad, cambios dinámicos en la respuesta del sistema pues las inercias en juego son variables y las líneas pueden tener velocidades de 90 metros por segundo o más. Dentro de esta categoría están los enrolladores/desenrolladores, calandrias, extrusores, laminados, molinos, etc.

Cintas transportadoras.

En algunos casos las cintas transportadoras utilizan la velocidad variable para coordinar el suministro de piezas a otros procesos ulteriores, disminuyendo automáticamente la velocidad cuando existe aglomeración de material en algún punto de la cinta y aumentándola cuando el suministro es demasiado espaciado, tal es el caso de la industria embotelladora, donde las llenadoras deben ir coordinadas con las cintas transportadoras de botellas. Y dentro de aquellas deben tener un control de la velocidad de llenado según la viscosidad y espumabilidad del líquido y también el tamaño y peso del recipiente.

Otros casos son las máquinas de empaque y de paletizado, donde lo que se requiere en las cintas transportadoras no es la variación de la velocidad en sí, sino que, el variador de velocidad controle las rampas de aceleración y frenado de la cinta, ya sea para evitar golpes mecánicos, frenados bruscos o el contacto entre objetos, con ello se protegen de contaminación o contacto no deseado objetos esterilizados, recién pintados o frágiles.



Bombas y ventiladores.

En estos casos se requiere la variación de velocidad para regular el caudal o la presión de manera que se controle la dosificación y distribución del fluido. Esto es muy útil, por ejemplo, en procesos de mezcla o tipo batch, aire acondicionado y en los quemadores donde se requiere optimizar la combustión. Además las rampas de aceleración y frenado lineales o en forma de “S” que ofrecen los variadores actuales eliminan el golpe de ariete que se presenta en instalaciones hidráulicas o incluso en sistemas neumáticos de grandes dimensiones lo que redundaría en una vida útil de toda la instalación y por si fuera poco, en este tipo de aplicaciones la variación de velocidad ahorra energía eléctrica, pues la energía que se consume es proporcional al caudal que maneja, en contraparte del uso de válvulas de control de fluido por medio de apertura de ventilas, las cuales siempre consumen la misma energía y esta es, en este caso alta y cercana a la nominal.

Grúas.

Antes (y aún hoy) existían sistemas donde el izaje y descenso de cargas en grúas se realizaba por medio de tableros complejos de control eléctrico o electrónico que se cargaban de controlar la aceleración, sentido de giro, secuencias de freno y par-motor de los motores de las grúas, dichos motores son de CD o de rotor devanado de CA. Ahora mediante los variadores electrónicos de velocidad en CA y sus cada vez más completos algoritmos de control permiten realizar las mismas funciones sin la necesidad de equipo tan complejo y con lógicas freno programables; ofreciendo además ayuda al diagnóstico de fallas que no existan en los controles tradicionales.

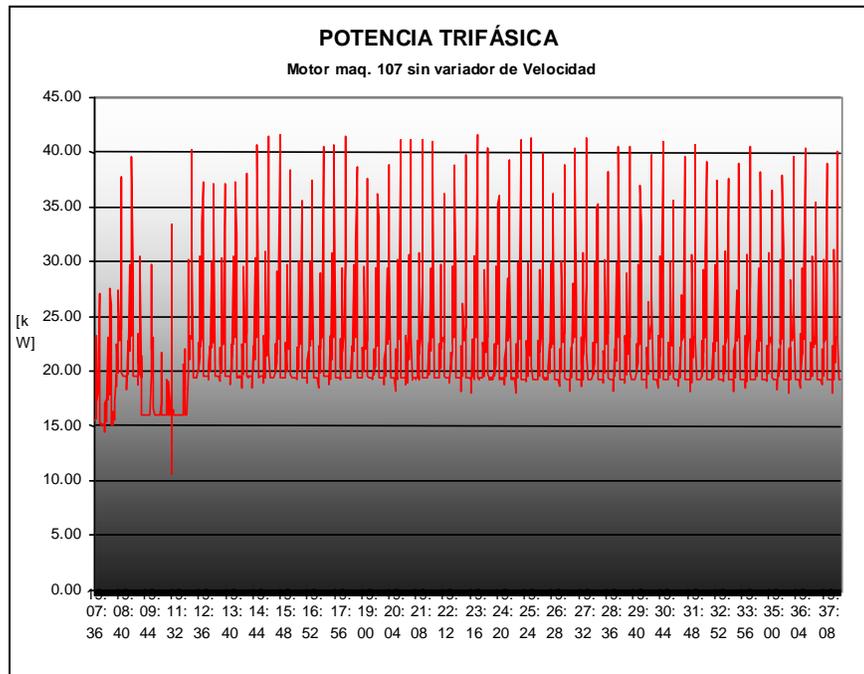
Ejemplo de Aplicación de Convertidores de Frecuencia

El control de velocidad es la mejor manera de acoplar un sistema motriz a las condiciones variables de los procesos involucrados. El convertidor de frecuencia variable (CFV) es un control para el motor de inducción tipo jaula de ardilla; que es el motor más económico, simple y robusto que hay, y que es el más usado por esas características en la industria.

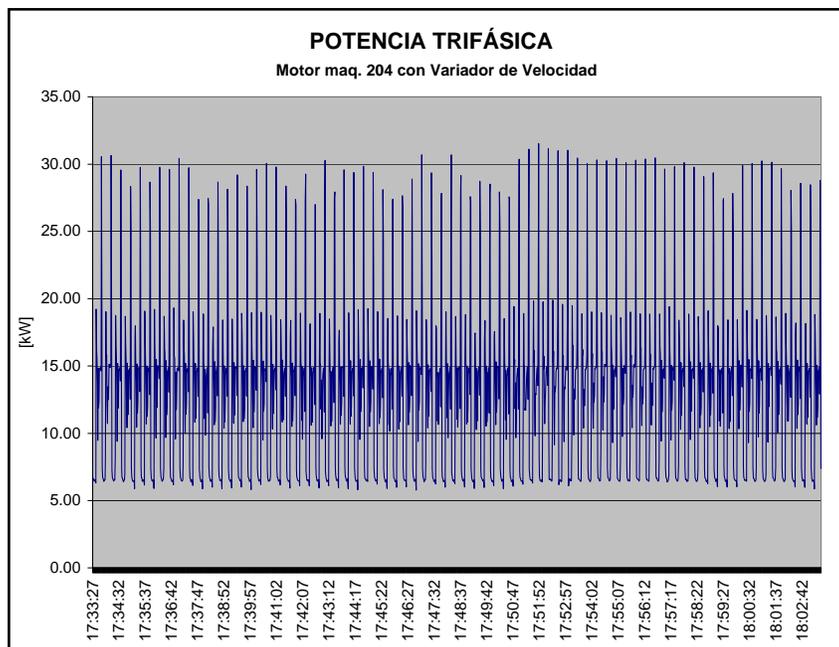
Es el único control que suministra la potencia, permite la variación de velocidad en el motor sin ningún accesorio extra entre el motor y la carga, y además es una excelente protección al mismo, por lo que ha llegado a ser uno de los controles más usados en los últimos años, y estamos seguros que llegará a sustituir casi todas las aplicaciones en donde se usan motores de corriente directa. Nuestra empresa ha aplicado con éxito los convertidores de frecuencia en diversas maquinas con operación variable, a continuación presentamos un ejemplo de los resultados obtenidos recientemente para otra instalación industrial:

Resultados de la Aplicación de Convertidores de Frecuencia en Maquinas de Inyección

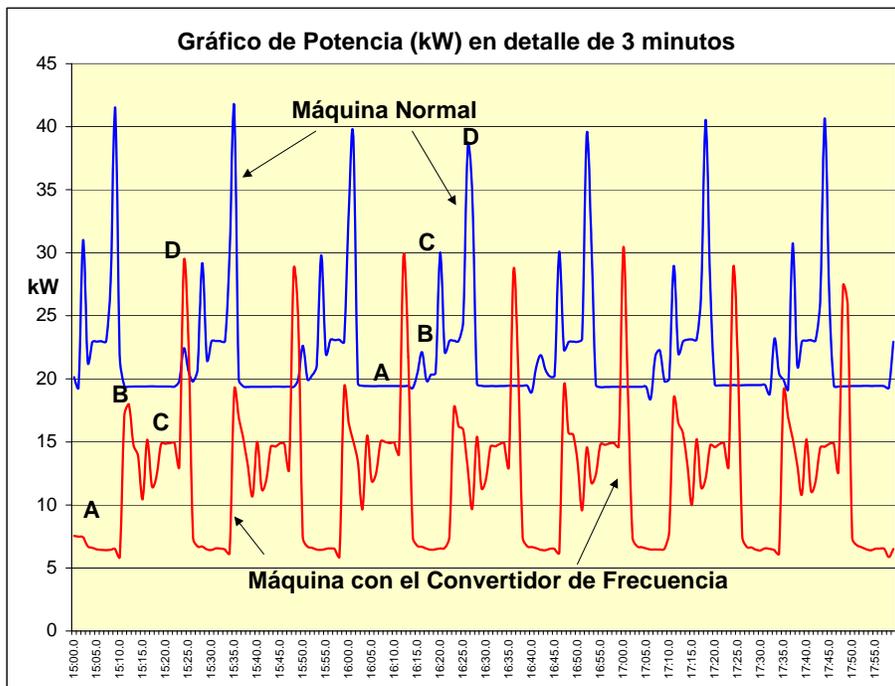
Se realizaron mediciones eléctricas segundo a segundo en condiciones normales de trabajo en la máquina identificada como 107, la máquina opera sin el convertidor de frecuencia. La siguiente gráfica muestra las mediciones de potencia eléctrica.



Se instaló un convertidor de frecuencia con operación similar a la 107, nuevamente se realizaron mediciones eléctricas, observando una reducción de 10 kW en promedio con respecto a lo que demandaría sin el convertidor de frecuencia, tal como lo muestra la gráfica siguiente.



A manera de presentar un mayor detalle de las mediciones, la siguiente gráfica muestra un comparativo de las mediciones de potencia eléctrica en 3 minutos segundo a segundo.

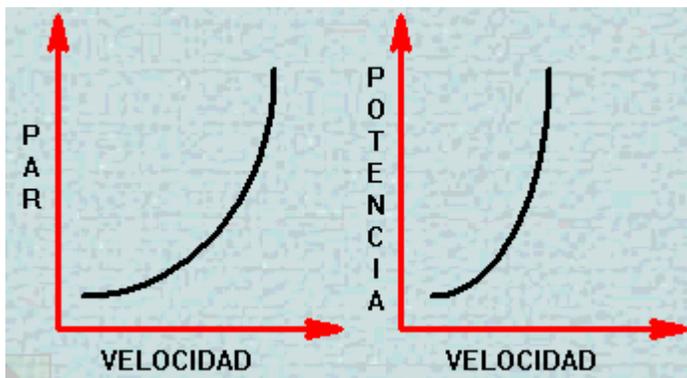


Como se observa en la gráfica el convertidor de frecuencia reporta ahorros que en promedio son de 10 kW. Ambas gráficas muestran 4 estados básicos, señalados como A, B, C y D, que corresponden a situaciones iguales de trabajo.

- ✓ Para el punto A los ahorros son de entre 12 y 13 kW.
- ✓ Para el punto B los ahorros son de entre 3 y 6 kW.
- ✓ Para el punto C los ahorros son de entre 7 y 8 kW.
- ✓ Para el punto D los ahorros son de entre 10 y 12 kW.

Los convertidores de frecuencia variable también pueden proporcionar ahorros de energía en otros equipos como: bombas, ventiladores, compresores centrífugos y tornillo, y demás equipos que operen con un perfil de carga variable.

Ahorro de Energía en Equipos de Cargas Variable. Es el tipo de cargas en el cual las necesidades de potencia van disminuyendo conforme la velocidad de la carga disminuye. Este tipo de cargas se encuentra comúnmente en aplicaciones de flujo variable, como bombas, compresores y ventiladores centrífugos, etc. En este el VV ofrece grandes oportunidades de ahorro de energía, debido a que los requerimientos de potencia disminuyen considerablemente conforme la velocidad es menor.





Aplicación de la ley cúbica.

En el caso de sistemas de impulsión de fluidos líquidos y gaseosos cuando las presiones no son muy altas, como es el caso de bombas y ventiladores respectivamente, existen ciertos parámetros y leyes físicas que rigen su funcionamiento; por los fines y el alcance del presente curso no se detallará la teoría de dónde salen las relaciones que a continuación presentamos como las “leyes de semejanza” para fluidos y sus equipos impulsores.

Las ecuaciones utilizadas en bombas, ventiladores y compresores centrífugos son las siguientes:

$$1. \frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$2. \frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}$$

$$3. \frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt[3]{\frac{Pot_1}{Pot_2}}$$

Estas ecuaciones pueden ser transpuestas en varias formas diferentes.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2; \quad \frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^3$$

Tres de las cuatro variables deben ser conocidas para poder determinar la cuarta.

Q = Flujo

N = Velocidad de la bomba, ventilador, compresor

Pot. = Potencia al freno, requerida por el equipo

D = Diámetro del impulsor

Ejemplo 1:

Determine el comportamiento de una bomba si sus condiciones de operación se reducen mediante un CFV al 75% de la velocidad nominal. Sus características iniciales son:

N = 3498 r.p.m.

Flujo = 0.72 m³ por minuto

H = 70 metros

P = 12 kW

Solución:

Se calcula la nueva velocidad:

$$N_2 = 3498 \times 0.75 = 2623 \text{ r.p.m. tal que } \frac{N_1}{N_2} = 1.333$$

Por tanto, se obtienen los siguientes valores:

$$Q_2 = \frac{0.72}{1.333} = 0.54 \text{ m}^3 \text{ por minuto}$$

$$H_2 = \frac{70}{1.333^2} = 39.4 \text{ metros}$$

$$P_2 = \frac{12}{1.333^3} = 5.1 \text{ kW}$$



Ejemplo 2:

Una bomba tiene un flujo inicial de 48 m^3 por hora, sin embargo se recirculan 8 m^3 por hora, es decir, se requiere un flujo de 40 m^3 . Determinar el comportamiento de la bomba si trabaja únicamente con el flujo requerido.

$N = 1765 \text{ r.p.m.}$
Flujo = 48 m^3 por hora
 $H = 80$ metros
 $P = 14 \text{ kW}$

Mediante las relaciones de afinidad se determinan los siguientes parámetros:

$$N_2 = \frac{40}{48} \times 1765 = 1470 \text{ RPM}$$
$$H_2 = \left(\frac{40}{48}\right)^2 \times 80 = 55.55 \text{ metros}$$
$$P_2 = \left(\frac{40}{48}\right)^3 \times 14 = 8.1 \text{ kW}$$

Ejemplo 3:

Una bomba con un impulsor inicial de 7 pulgadas (0.178 metros), se pretende cambiarlo por uno de 6 pulgadas (0.1524 metros). Las condiciones actuales de operación son las siguientes:

$N = 1755 \text{ r.p.m.}$
Flujo = 30 m^3 por hora
 $H = 60$ metros
 $P = 10 \text{ kW}$

Calcule todos los parámetros de operación con el nuevo impulsor.

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{D_2}{D_1} = 30 \times \frac{0.1524}{0.178} = 25.7 \text{ m}^3 \text{ por hora}$$
$$H_2 = 60 \times \left(\frac{0.1524}{0.178}\right)^2 = 44 \text{ metros}$$
$$P_2 = 10 \times \left(\frac{0.1524}{0.178}\right)^3 = 6.3 \text{ kW}$$

En un sistema de manejo de fluidos no tendría ninguna ventaja instalar un Convertidor de Frecuencia Variable si las necesidades de flujo y presión no tuvieran variaciones, y siempre se requiriesen las máximas condiciones de trabajo, pero generalmente los sistemas de bombeo e inyección de aire se diseñan originalmente considerando el punto máximo de operación.