

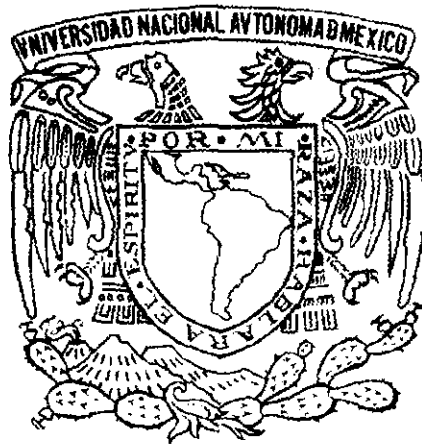
23  
2es

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA



## VARIADORES DE VELOCIDAD HIDRAÚLICOS PARA EL AHORRO DE ENERGÍA

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
(ÁREA MECÁNICA)

P R E S E N T A N :

FERNÁNDEZ SANTIBAÑEZ CESAR  
SÁNCHEZ AVALOS HUGO

DIRECTOR: ING. J. ADRIÁN VALERA NEGRETE

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

271451



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECEMOS

A todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo, muy en especial al Ing. J. Adrián Valera Negrete por su constante apoyo e interés.

A nuestros padres y familiares por su ayuda y comprensión incondicional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darnos una formación profesional en el ramo de la ingeniería.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
Variadores de velocidad, tipos y características.	2
I.1 Variadores de velocidad mecánicos.	2
I.2 Variadores de velocidad electrónicos.	6
I.3 Variadores de velocidad hidráulicos.	12
CAPÍTULO II	
Operación de los variadores de velocidad hidráulicos.	15
II.1 Estructura y funcionamiento del variador de velocidad.	15
II.2 Funcionamiento del accionamiento de velocidad variable.	17
II.3 Detalles constructivos.	19
II.4 Sistema de lubricación.	20
II.5 Mantenimiento.	23
CAPÍTULO III	
Aplicación de los variadores de velocidad hidráulicos.	24
III.1 Generalidades.	24
III.2 Beneficios contra otros tipos de variadores.	28
CAPÍTULO IV	
Ahorro de energía.	30
IV.1 Variadores hidráulicos.	33
IV.2 Variadores mecánicos.	40
IV.3 Variadores electrónicos.	47
IV.4 Análisis comparativo del ahorro de energía.	52
IV.5 Caso práctico.	54
CAPÍTULO V	
Evaluación económica.	58
V.1 Metodología general.	58
V.2 Caso práctico.	60
CAPÍTULO VI	
Conclusiones y recomendaciones.	62
BIBLIOGRAFÍA	64

---

## INTRODUCCIÓN

El ansiado deseo de poder controlar la velocidad de los motores de inducción de corriente alterna, los cuales son mayormente utilizados en la industria, comenzó a ser una realidad a principios de los 80's. Los llamados variadores de velocidad fueron introduciéndose rápidamente en el mercado debido a las múltiples ventajas que ofrecían.

Los constructores de equipo y los ingenieros de planta se dieron cuenta de las ventajas de poder variar la velocidad de las máquinas para poder acoplarlas a las necesidades del proceso. Los modernos variadores de velocidad controlan la corriente de arranque, mantienen fija la velocidad, soportan cambios rápidos de la velocidad, controlan la reversa, permiten paros inmediatos, proporcionan mayor potencia a la salida y control autoajutable de la relación de velocidad; todas estas características dependen de los requerimientos del proceso.

Todo esto hace a la maquinaria de cualquier tipo más productiva, mejora la calidad y permite mayor flexibilidad con cambios rápidos en la marcha y un mínimo de tiempos muertos. Otra de las ventajas es la de poder coordinar múltiples máquinas.

Se observa que el uso de variadores de velocidad es creciente en la industria, comercio y sector privado. Estos variadores de velocidad aportan indudables beneficios como son: el mejoramiento en el control del proceso, la flexibilidad en condiciones variables, la reducción en las necesidades de mantenimiento del equipo y el ahorro de energía.

El total de energía eléctrica desperdiciada en una industria llega a ser hasta de un 25% del suministro que ésta requiere, incluyendo iluminación y otros servicios; siendo los motores eléctricos el equipo que consume más energía eléctrica en el ramo industrial, es necesario implementar el uso de variadores de velocidad para lograr un importante ahorro de energía eléctrica, además de aumentar las utilidades dentro de la empresa. Como un dato importante, al ahorrar energía eléctrica se disminuye el consumo de hidrocarburos, combustibles utilizados en su mayoría para la generación de ésta a nivel nacional, reduciendo en gran parte los contaminantes. Por cada kWh de electricidad ahorrado en México se dejan de emitir 726 gr. de CO<sub>2</sub>, 5.3 gr. de SO<sub>2</sub>, y 2.8 gr. de NO<sub>x</sub>.

## CAPITULO I

### Variadores de velocidad, tipos y características.

#### I.1 Variadores de velocidad mecánicos.

Este tipo de equipo es utilizado en maquinaria donde es indispensable variar la velocidad, por ejemplo en ventiladores o bombas, el variador de velocidad mecánico nos permite obtener de un motor, un par diferente o bien mayor o menor velocidad a la salida; eso depende de nuestras necesidades.

La potencia es transmitida por medio de tracción viscosa, esto ocurre por la fuerza de fricción de la película de aceite en los puntos de contacto entre los discos cónicos y los discos con pestaña, como se puede observar en la figura 1.1. No ocurre por fricción entre los discos. Los discos cónicos son relativamente delgados, con dureza mínima de 60 Rockwell C; esto minimiza la presión por contacto.

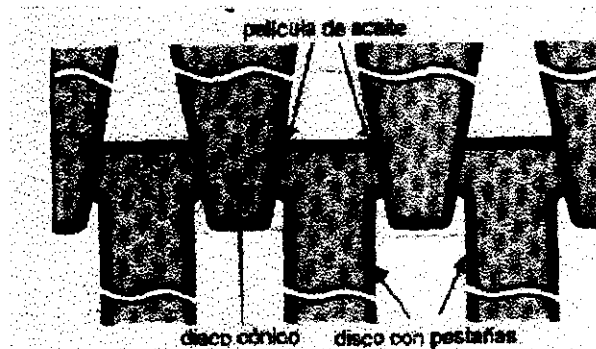


Fig. 1.1 Transmisión a través de la película de aceite entre discos.

Este equipo resiste la sobrecarga gracias a que cuenta con una gran cantidad de puntos de contacto. Debido a la película de aceite los discos no sufren desgaste, además están protegidos contra la corrosión. Ya que la potencia es repartida entre los numerosos puntos de contacto es posible transmitir hasta 150 kW (200 HP).

Las partes rotacionales, incluyendo los discos, son completamente simétricas, contando con un momento de inercia bajo, por lo que se obtiene un mínimo de vibración al operar el equipo.

La alta velocidad de rotación en la flecha de la entrada, es transmitida a través del engrane hacia los discos cónicos alineados que se encuentran en un múltiple arreglo de flechas acufiadas.

En la figura 1.2 se puede apreciar como los discos cónicos mueven a los discos con pestaña, los cuales están conectados a la flecha de salida a través de la camisa y luego por medio de una flecha de transmisión que está asegurada a la flecha de salida. La flecha de transmisión cuenta con una unión sensible al par, y complementada con la compresión de los resortes crean una presión de contacto en los discos correspondiente a la carga del par, con el propósito de prevenir una patinada debido a la carga y reducir la presión bajo carga moderada.

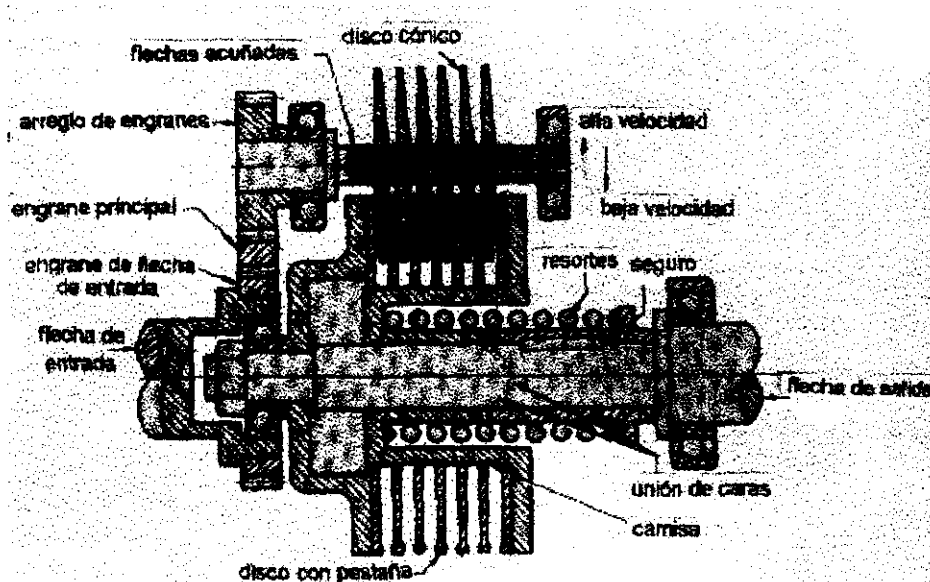


Fig. 1.2 Esquema de funcionamiento del variador mecánico.

El arreglo de flechas ranuradas, donde están montados los discos cónicos, cuenta con un brazo giratorio para cada flecha (véase figura 1.3). El movimiento rotacional de los brazos giratorios alrededor del engrane fuerza los centros de las flechas ranuradas, con los discos cónicos, a moverse ya sea acercándose o alejándose del centro de los discos con pestaña. Un anillo circular móvil conecta los brazos giratorios al tornillo sin fin, de modo que los brazos giratorios se muevan al mismo tiempo por la acción del tornillo. Cuando el punto de contacto de los discos con pestaña está cerca de la periferia de los discos cónicos, se obtiene alta velocidad a la salida, y cuando el punto de contacto de los discos con pestaña está cerca del centro de los discos cónicos se obtiene baja velocidad a la salida.

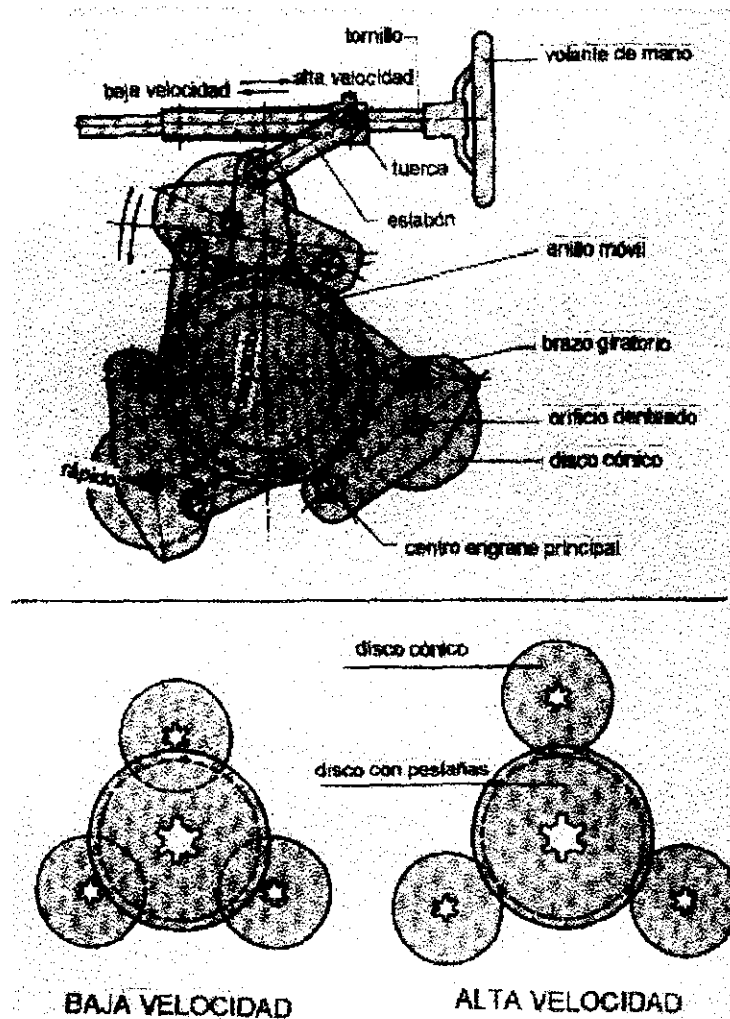


Fig. 1.3 Aumento o reducción de la velocidad.



Como todos los equipos usados en la industria, el variador de velocidad mecánico presenta ventajas y desventajas, que a continuación se exponen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Ventajas y desventajas del variador de velocidad mecánico.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Buena variación de par.	Varía la velocidad de un solo motor.
No existe fricción en las piezas metálicas.	Máximo de transmisión 150 kW (200 H. P.)
Auto lubricación.	Eficiencia de transmisión de par de 85%.
Fácil mantenimiento.	Movimiento circular para variar la velocidad.
No consume energía eléctrica.	El motor requiere de arrancador.
Construido para trabajar 24 Hrs.	

---

## 1.2 Variadores de velocidad electrónicos.

Las aplicaciones del variador de velocidad son tan extensas como el número de motores de inducción instalados o por instalar, que requieran una velocidad diferente a la que suministra él mismo.

El variador de velocidad es un control para el motor de inducción tipo jaula de ardilla, que es el motor más económico, simple y robusto que existe y se distingue por ser el más usado en la industria.

Una de las limitaciones del motor de inducción es el tener velocidades fijas, sin posibilidades de variación, contrariamente a lo que ocurre con el motor de corriente continua. Siendo que los procesos y aplicaciones requieren de diferentes velocidades y pares, se han desarrollado infinidad de métodos para cambiar y variar las velocidades en los motores de inducción.

La ventaja principal de este tipo de variadores de velocidad es que disminuye los consumos de energía eléctrica en algunos de los procesos que controla, dando como resultado un ahorro considerable en los costos de operación.

El variador de velocidad es conocido con diferentes nombres: convertidor de frecuencia variable o inversor, siendo su nombre correcto el de convertidor de frecuencia variable; pues incorpora el término de frecuencia que lo diferencia de los demás variadores de velocidad que utilizan métodos mecánicos o de corriente directa. Por otro lado, el término inversor solo se refiere a uno de los pasos del variador de velocidad electrónico.

La manera como un variador de velocidad convierte el voltaje y frecuencia variable, se basa en un proceso de dos pasos principales: 1) la corriente alterna (c.a.) es rectificadora y convertida a corriente directa (c.d.), 2) la corriente directa es invertida y se vuelve a entregar como corriente alterna pero con diferente frecuencia y voltaje.

**Rectificador.** La parte rectificadora convierte el voltaje de c.a. en voltaje en c.d. por medio de un puente de diodos o rectificadores controlados de silicio, que permiten el paso de corriente en un solo sentido. Una vez que se tiene la c.d., ésta se filtra a través de capacitores para linealizarla lo más posible y poder entregar a la parte inversora un voltaje en c.d. lineal que facilita la generación de frecuencia variable.

**Inversor.** En esta sección el voltaje c.d. se invierte y vuelve a tomar la forma alterna por medio de rectificadores controlados de silicio (tiristores SCR de potencia), conectados directamente a la línea de c.d. y controlados por microprocesadores, pero éstos con una frecuencia y voltaje variable al mismo tiempo.

En la figura 1.4 se muestra la posición de el rectificador y del inversor dentro del variador de velocidad electrónico.

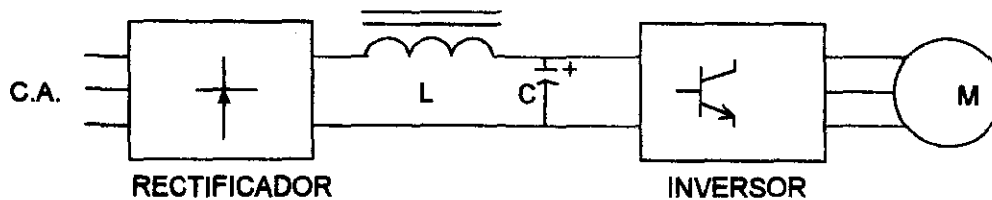


Fig. 1.4 Elementos del variador electrónico.

La instalación de los variadores de velocidad nace de dos motivos principales; el control de los flujos para el proceso y el ahorro de energía eléctrica; la instalación de los variadores de velocidad puede conllevar los dos fines o uno solo; para esto es importante conocer los procesos industriales y las necesidades de los mismos, lo que implica conocer los tipos y clases de cargas que existen, las cuales se dividen en tres:

a) Par constante. Es la carga que demanda del motor un par constante en cualquier rango de velocidad.

Este tipo de carga se aplica en:

1. Elevadores
2. Bandas transportadoras
3. Maquinaria textil
4. Bombas de desplazamiento positivo
5. Extrusoras
6. Mezcladoras
7. Compresores de émbolo

En este tipo de carga, el motivo principal para la aplicación de los variadores de velocidad es el control de flujo en el proceso. El ahorro de energía se genera cuando se cumplen las siguientes condiciones: que la potencia demandada sea menor a la nominal y que se realice a velocidades menores al 100 %, como se muestra en la figura 1.5.

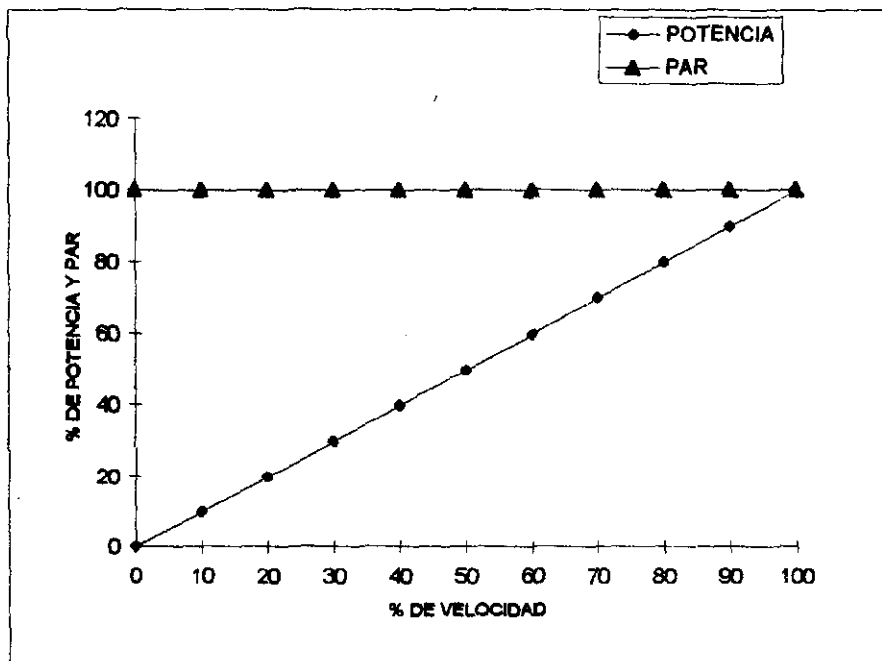


Fig. 1.5 Par constante.

b) Par variable. Es el tipo de carga donde las necesidades de par disminuyen conforme lo hace la velocidad del motor, y por consiguiente la potencia también disminuye. Este tipo de carga se encuentra comúnmente en aplicaciones de flujo variable como bombas y ventiladores. El variador de velocidad ofrece grandes oportunidades de ahorro (como se muestra en la figura 1.6) pues sus requerimientos de potencia disminuyen considerablemente conforme la velocidad es menor.

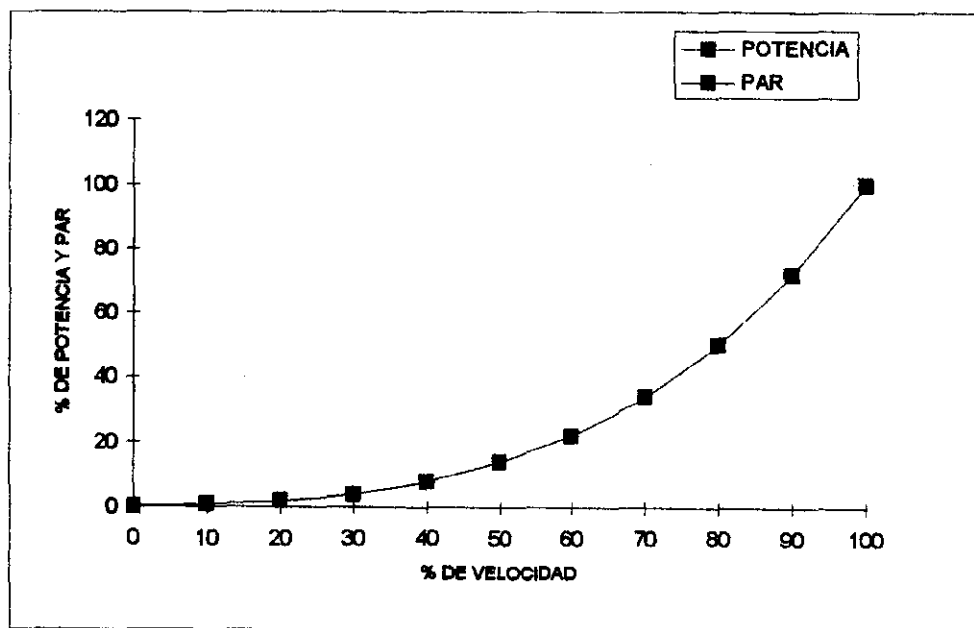


Fig. 1.6 Par variable.

c) Potencia constante. Es el tipo de carga, donde no importa la velocidad a la que este girando el motor, ya que siempre estará demandando la potencia máxima, pues así lo exige la carga.

Estas cargas se encuentran en:

1. Máquinas herramientas
2. Bobinadores
3. Dobladoras
4. Troqueladoras
5. Bombas centrifugas de alta inercia

En esta carga difícilmente podremos encontrar ahorros de energía, debido a que el proceso exige el máximo de la potencia, en la figura 1.7 observamos que la potencia se mantiene constante a 100% a partir del 100% de velocidad, sin embargo en el mismo punto el par comienza a disminuir y se mantiene constante en un rango aproximado al 85%, lo que indica que no se logran importantes ahorros de energía.

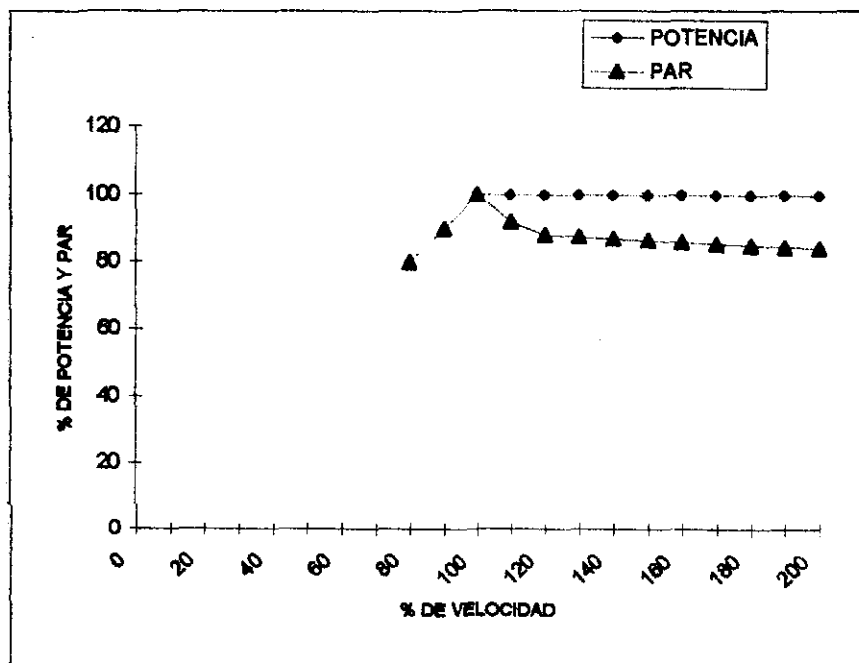


Fig. 1.7 Potencia constante.

De acuerdo con las características de los variadores de velocidad electrónicos, se han enlistado en la tabla 1.2 las ventajas y desventajas que se consideran importantes.

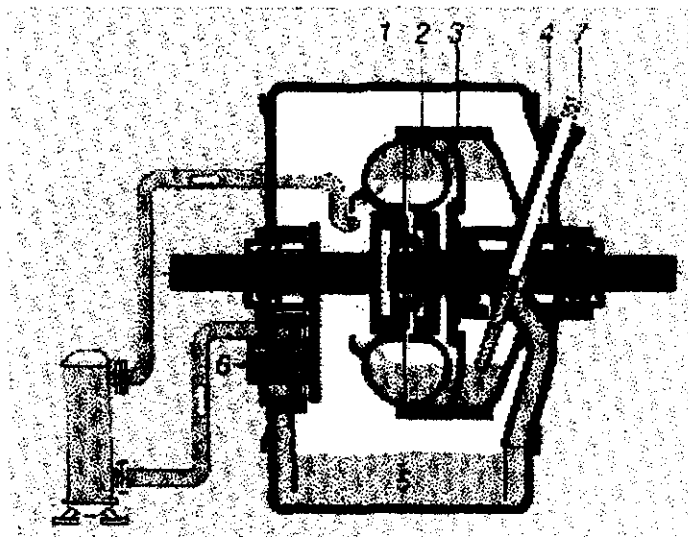
Tabla 1.2 Ventajas y desventajas del variador de velocidad electrónico.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
El motor no necesita arrancador ni protector.	Usado en motores jaula de ardilla.
Reduce los consumos de energía eléctrica.	Consume energía eléctrica.
Fácil operación.	Produce picos de voltaje.
Fácil instalación.	Equipo de gran tamaño para motores de elevada potencia con alto costo.
Menor desgaste de los equipos acoplados.	Alta distorsión de armónicas.
Maneja uno o varios motores.	
Acoplamiento alámbrico.	
Es programable.	
Eficiencia de transmisión de par 95%	
Poco mantenimiento.	

### 1.3 Variadores de velocidad hidráulicos.

El variador de velocidad hidráulico es un arreglo de dispositivos aplicables al ahorro de energía eléctrica, también llamado turbo-acoplador regulable, el cuál es un acoplamiento hidrodinámico que transmite la energía generada por fuerzas dinámicas de un fluido que circula entre el rodete-bomba, en el eje conductor (rodete primario) y el rodete-turbina, en el eje conducido (rodete secundario) en una cámara de trabajo cerrada (ver figura 1.8).

Algunas de las características del turbo-acoplador regulable son la forma de los rodetes de álabes del acoplador y la disposición de los álabes que están colocados en dirección radial y axial en la cámara de trabajo. En el turbo-acoplador regulable puede variarse a voluntad la cantidad de fluido dentro de las secciones que lo componen, que va desde llenado total hasta vacío. De este modo es posible lograr una variación de las revoluciones en las máquinas de trabajo.



- 1 rodete primario
- 2 rodete secundario
- 3 campana
- 4 carcasa del tubo captador
- 5 depósito de aceite
- 6 bomba de circulación de aceite
- 7 tubo captador

Fig.1.8. Partes de un turbo-acoplador regulable.

La circulación de aceite de trabajo en el acoplador es mantenida por medio de una bomba que funciona continuamente y que impulsa el fluido del depósito colector dispuesto debajo del acoplador hacia la cámara de trabajo.



---

Por cámara de trabajo se denomina el espacio entre el rodete primario y el rodete secundario, que está unida de modo comunicante con la cámara extractora, que gira conjuntamente con el rodete primario, la cuál consta de una cubeta interior y otra exterior. La cantidad de fluido en la cámara de trabajo, que es importante para la velocidad a variar en el lado de salida del acoplador, viene determinada por la posición radial de un tubo captador dispuesto en la cámara extractora.

La capacidad de extracción de aceite de este tubo captador es sensiblemente superior al caudal de la bomba, por lo que se consiguen tiempos de respuesta muy reducidos en las maniobras de mando.

El accionamiento del tubo de extracción o de la válvula de mando se efectúa, dependiendo del tipo de aplicación, ya sea manual o mediante un accionamiento automático que puede incorporarse también al sistema de regulación.

El calor generado por el deslizamiento del turbo-acoplador se elimina por medio de un intercambiador de calor.

Los variadores de velocidad hidráulicos están equipados en la transmisión principal con cojinetes de deslizamiento y en la transmisión secundaria con rodamientos. Los cojinetes radiales y axiales sometidos a grandes cargas disponen de capas antifricción.

Los variadores de velocidad hidráulicos se caracterizan por contar con un mayor número de ventajas que desventajas, lo que indica que proporcionan grandes beneficios a la industria en general. Así lo demuestra la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Ventajas y desventajas del variador de velocidad hidráulico.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Ahorra energía eléctrica.	Varia la velocidad de un solo motor.
Poco mantenimiento.	Altos costos para capacidades menores.
Eficiencia de transmisión de par 93%.	
Uso industrial pesado.	
Transmisión sin desgaste.	
Fácil manejo al variar la velocidad.	
Larga duración.	
Mayor duración a la máquina.	
Fácil instalación.	
Tamaño regular para alta potencia.	
Amortiguación de choques y vibraciones.	
No presenta distorsión armónica.	

## CAPITULO II

### Operación de los variadores de velocidad hidráulicos.

#### II.1 Estructura y funcionamiento del variador de velocidad hidráulico

La estructura del variador de velocidad hidráulico esta formada por un conjunto de compartimentos distribuidos horizontalmente como se puede observar en la figura 2.1, la estructura es compacta por lo que ahorra espacio, en ella se incluyen los siguientes grupos individuales:

- A) Acoplamiento de velocidad variable hidrodinámico.
- B) Embrague.
- C) Convertidor de par hidrodinámico.
- D) Freno hidrodinámico.
- E) Engrane planetario.

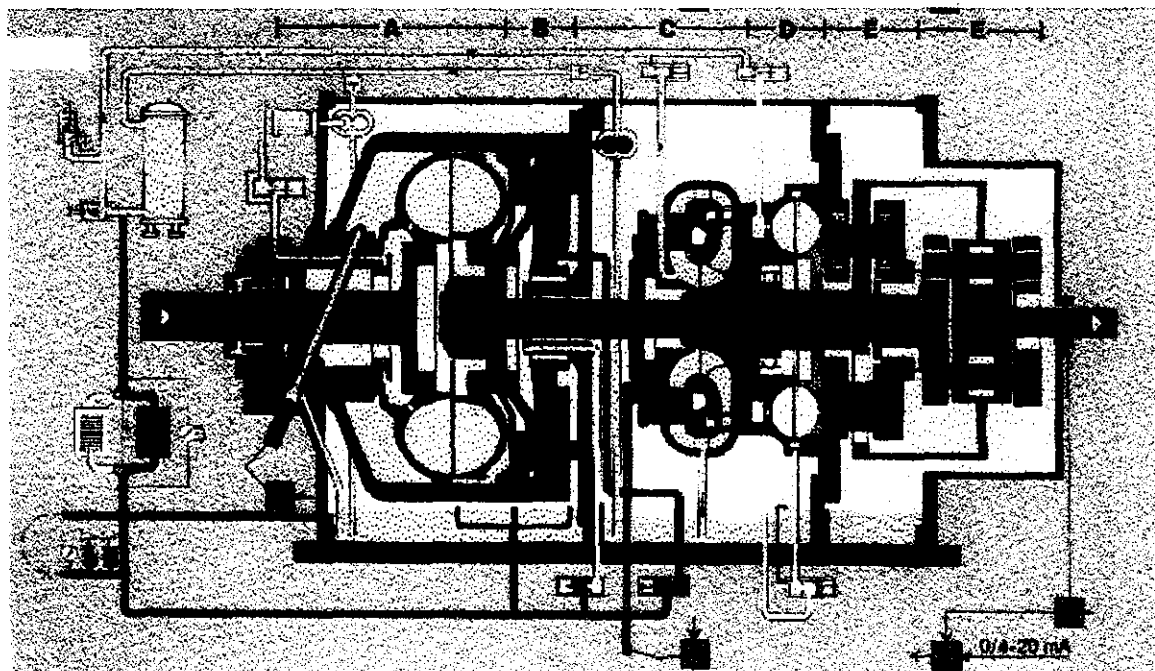


Fig. 2.1 Compartimentos del variador de velocidad hidráulico.

---

Los elementos individuales están colocados de forma coaxial a lo largo de un tramo de eje. El suministro de aceite de trabajo, que también tiene la función de lubricante, es transportado por medio de una bomba accionada mecánicamente; ya que el aceite es utilizado en todos los elementos del variador, se cuenta con un depósito de aceite común en la parte inferior del variador de velocidad.

Para poder variar la velocidad es necesario que en los grupos se tengan cambios, los cuales tienen lugar mediante el llenado y vaciado de componentes hidrodinámicos, de manera que ocurren en forma suave y sin problemas. Estos cambios se llevan a cabo a través de robustas válvulas de accionamiento magnético o los usuales accionamientos electromecánicos y/o neumáticos.

El principio de funcionamiento es una bifurcación de potencia a través de un engranaje superpuesto en forma de engranaje planetario y el ajuste de la velocidad; todo esto exclusivamente mediante la variación de llenado en las piezas inducidas del turboacoplador regulable con ayuda del tubo extractor. El intervalo de regulación de 0 hasta casi el 80% de velocidad queda de esta forma cubierto. El freno hidrodinámico está lleno y produce el momento antagónico para que el engranaje planetario quede en forma de engranaje de superposición. El freno hidrodinámico mantiene constantemente una velocidad baja en el engranaje, evitando así la oxidación por fricción y huellas de posición.

La regulación restante se caracteriza por que ambos rodets del turboacoplador regulable se acoplan mecánicamente por medio del embrague, sin ser necesario el funcionamiento regulador del turboacoplador regulable, y de forma que el motor de accionamiento también podrá ser acoplado mecánicamente a la máquina accionada. Se superpondrá una transmisión de fuerza paralela a través del convertidor de par ahora lleno, lográndose así llegar al 100% de velocidad mediante el ajuste de las paletas en la rueda guía. El freno hidrodinámico permanecerá mientras tanto sin aceite.

## II.2 Funcionamiento del accionamiento de velocidad variable.

Una bomba de aceite accionada en el lado primario suministrará aceite, desde el depósito de aceite común hasta el compartimento de trabajo, a través de una válvula de regulación. La altura del nivel de aceite en el compartimento de trabajo, regula la capacidad de transmisión, y será determinada por medio de la disposición radial de un tubo extractor desplazable, cuya capacidad de aspiración es mayor que el caudal de transporte de la bomba. El fluido tomado por el tubo extractor será conducido a través de un refrigerador de aceite hasta la válvula de regulación, para de ahí partir nuevamente al circuito del turboacoplador y al depósito común. El desplazamiento del tubo extractor es lo que produce la variación de la velocidad, ya que influye en la cantidad de fluido que es recirculado por el sistema de aceite en el acoplamiento.

El desplazamiento del tubo captador se efectúa girando el disco de leva por medio del mecanismo de ajuste. La espiga gobernadora se mueve a través del rodillo guiado por la presión del muelle en el disco de leva. Al girar el disco de leva en dirección de plena velocidad de salida, la espiga gobernadora se mueve en dirección del tubo captador. El aceite de presión pasa por el espacio anular abierto en los bordes de mando en dirección positiva (+) en el cilindro de ajuste del tubo captador y presionando al tubo captador unido con el émbolo asimismo en dirección positiva (+), con ello el acoplamiento puede seguir llenándose (véase figura 2.2). El casquillo de mando cargado por muelle, se desliza en el bisel del tubo captador y cierra la sección abierta por la espiga gobernadora en el momento de haberse alcanzado la posición predeterminada por el mecanismo de ajuste. Al girar el mecanismo de ajuste, en la dirección de baja velocidad (-), el rodillo cargado por muelle se mueve en dirección del piso de la leva. Por ello, el aceite de presión produce los movimientos opuestos del proceso arriba descrito.

Excitando las dos válvulas de 3/2 vías, independientemente de la posición del mecanismo de ajuste, el tubo captador puede moverse a la posición de baja velocidad, es decir, "acoplamiento vacío". Esto puede ser necesario en todos aquellos casos, en los que el motor o la máquina operadora deben descargarse del par de giro, como por ejemplo en el arranque del motor, a la sobrevelocidad producida por un aumento de frecuencia, etc.

Si el tubo captador debe desplazarse sólo a una velocidad intermedia, será necesaria la válvula magnética de 2/2 vías. Por la maniobra de las válvulas de 3/2 vías se interrumpe la función normal del mando hidráulico. El aceite de presión se envía directamente al cilindro del tubo captador, que mueve al tubo captador en dirección de baja velocidad (-) y deja salir el volumen de aceite que se encuentra en el cilindro del tubo captador directamente al depósito común de aceite.

1. Mecanismo de ajuste.
2. Rodillo.
3. Espiga gobernadora.
4. Casquillo de mando.
5. Tubo captador.
6. Válvula de 3/2 vías.
7. Válvula de 2/2 vías.

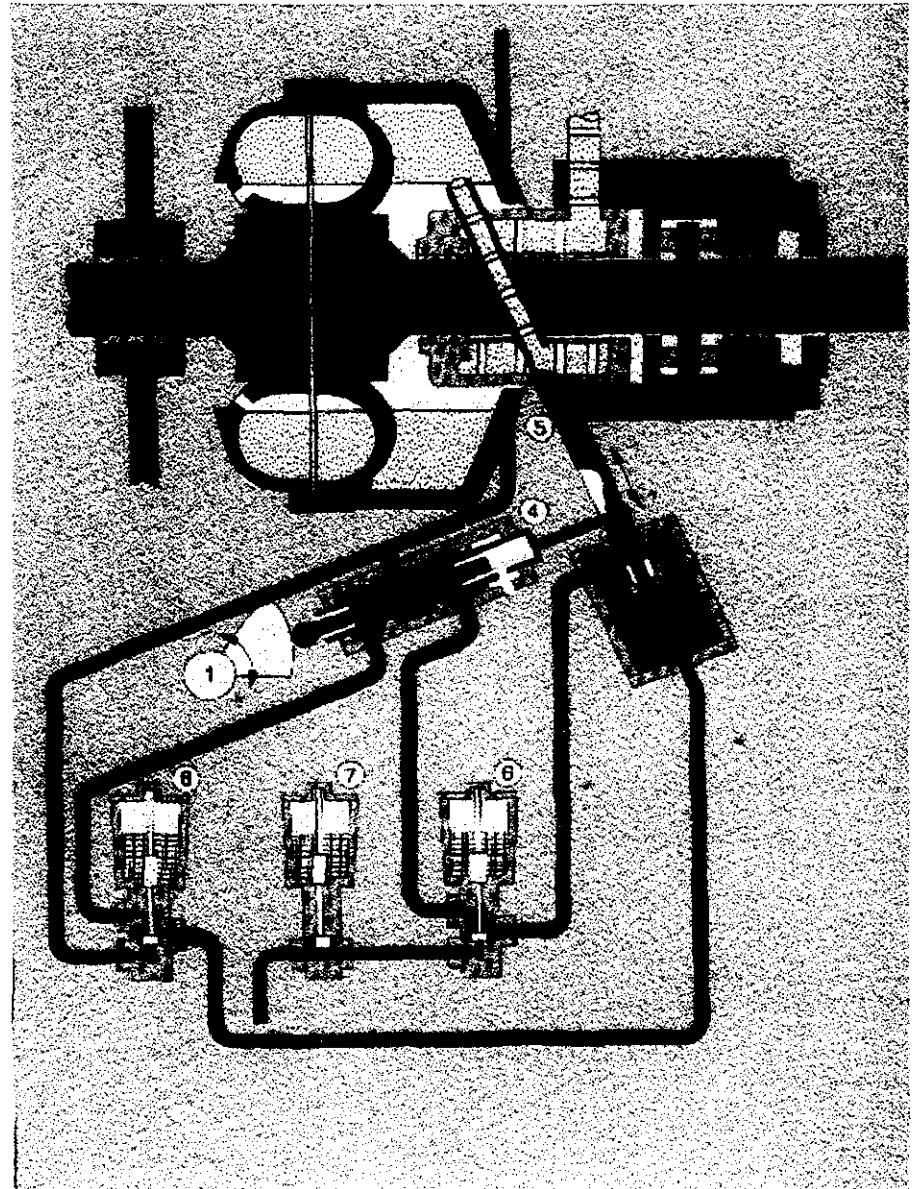


Fig. 2.2 Mando del tubo extractor.

---

### II.3 Detalles constructivos.

Los turboacopladores regulables con engranaje serán conectados con acoplamientos de unión de elasticidad regular (acoplamientos de dientes con lubricación de flujo de aceite o acoplamientos de membrana) a la máquina de accionamiento y de trabajo. Todas las partes giratorias están localizadas en un compartimento lleno de aceite.

Un engranaje planetario postconectado al accionamiento de velocidad variable permite ajustar las velocidades usuales de motores de inducción en corto circuito de 2 o 4 polos a máquinas de marcha rápida.

Las piezas rotativas del turboacoplador regulable (rueda primaria, secundaria y caja), suelen estar construidas de acero fundido o aceros especiales.

Todos los turboacopladores regulables están equipados con cojinetes de deslizamiento, los cojinetes radiales ó axiales, sometidos a una gran carga, poseen una capa de lubricación, la cual se explica con más detalle en el subtema II.4 Sistema de lubricación.

## II.4 Sistema de lubricación.

Una de las bombas de aceite de trabajo, accionada por el eje de entrada del engranaje, aspira el líquido de servicio de la parte inferior de la carcasa constituida como depósito común de aceite, y lo transporta a través de la válvula de mando de circulación al compartimento de trabajo del turboacoplador. Este compartimento de trabajo está constituido por una rueda primaria y una secundaria. El compartimento de trabajo y la campana del turboacoplador que rodea a la rueda secundaria son vasos comunicantes. Por la fuerza centrífuga, el líquido de su interior constituye un anillo, cuyo diámetro interior podrá determinarse por la disposición radial de los conductos de aspiración desplazables en el tubo extractor.

El aceite tomado por el tubo extractor será conducido a través del refrigerador de trabajo a la válvula de mando de circulación, de ahí al recinto de trabajo y/o al depósito común de aceite nuevamente. Por medio de la válvula de mando de circulación que trabaja en función de la posición del tubo extractor, se regulará la carga de aceite en relación con el calor que produce el desplazamiento del turboacoplador. El caudal sobrante volverá al depósito de aceite.

Para conseguir tiempos de reacción más cortos en el proceso de regulación, la válvula de mando de circulación deja libre todo el caudal de la bomba de aceite de trabajo al comenzar la regulación e impide el flujo al recinto de trabajo al finalizar esa regulación. El suministro de aceite de lubricación se lleva a cabo por medio de un sistema separado del circuito de trabajo, aunque el aceite es el mismo. La bomba de lubricación auxiliar, suministra aceite de lubricación del depósito de aceite, el cual pasa por un refrigerador de aceite y un filtro doble postconectado, hasta cada uno de los cojinetes y ruedas dentadas, con el fin de lograr que los puntos de carga dispongan de aceite antes de la puesta en marcha del turboacoplador regulable con engranaje, la bomba de lubricación auxiliar dejará de suministrar aceite hasta que la bomba principal de lubricación de accionamiento mecánico asuma esta función después de que se encuentre a plena marcha. La bomba de lubricación de arranque dejará de funcionar a través de instrumentos para la vigilancia del aceite de lubricación, y cuando descienda la presión, por ejemplo al desconectar el grupo de accionamiento volverá a ponerse en marcha (véase figura 2.3).



- |   |  |
|---|--|
| 1. Depósito común de aceite.            | 9. Válvula de mando de circulación.                      |
| 2. Bomba de lubricación auxiliar.       | 10. Compartimento de trabajo.                            |
| 3. Bomba principal de lubricación.      | 11. Mando del tubo captador.                             |
| 4. Enfriador del aceite de lubricación. | 12. Tubo extractor.                                      |
| 5. Filtro doble.                        | 13. Conductos de aspiración.                             |
| 6. Instrumentos de vigilancia.          | 14. Enfriador del aceite principal de trabajo.           |
| 7. Alimentación asegurada.              | 15. Pistón de accionamiento del tubo captador de aceite. |
| 8. Bomba de aceite de trabajo.          |  |

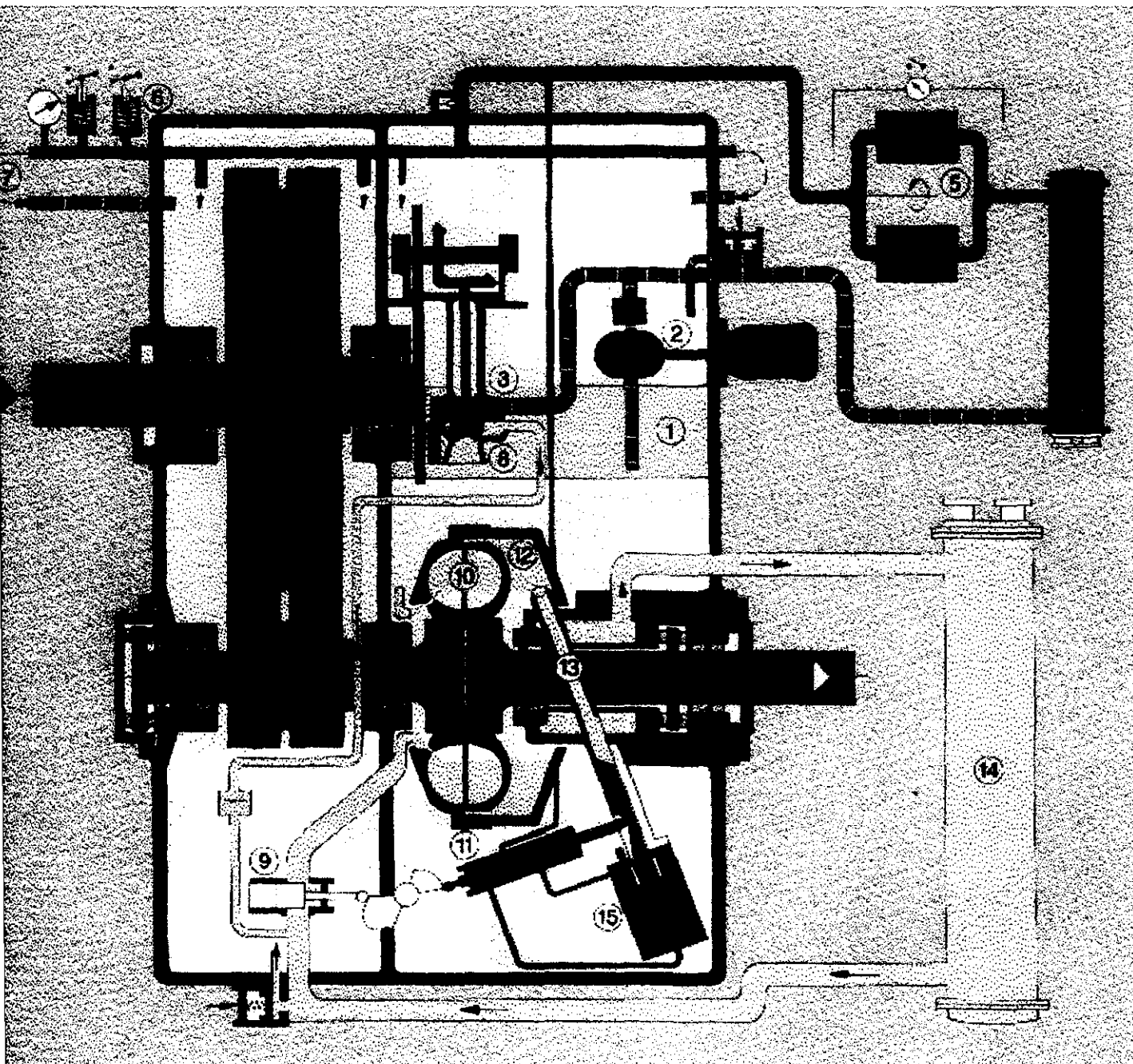


Fig. 2.3 Sistema de lubricación.

---

Para asegurar un funcionamiento continuo, el filtro incorporado al sistema de aceite de lubricación forma un doble filtro. Cada vez será impulsada una parte de aceite al filtro, cuando el filtro esté sucio un manómetro diferencial con contacto de alarma emitirá una señal para que se cambie el filtro. Entonces habrá que parar y limpiar la parte del filtro sucia.

Para la alimentación de motores de accionamiento y de máquinas de trabajo, la cantidad de aceite de lubricación necesaria también podrá ser asegurada por el turboacoplador regulable con engranaje.

El aceite de lubricación es de tipo comercial y debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- Viscosidad ISO VG 22 o ISO VG 32.
- Punto de fluidez máximo 4°C bajo la temperatura ambiental mínima existente.
- Viscosidad de arranque inferior a 15,000 mm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> (cSt).
- Punto de inflamación superior a 175°C.
- Compatibilidad de juntas NBR (nitrilo - butadieno - caucho) y FPM/FKM (caucho fluorado).

## II.5 Mantenimiento.

El mantenimiento en los variadores de velocidad hidráulicos se reduce prácticamente al aceite de transmisión, ya que los rodamientos de las flechas se encuentran lubricados por el mismo aceite, la fricción suele ser mínima. En caso de que los rodamientos sufran desgaste se sustituyen, esta parte del mantenimiento se realiza cuando el variador se encuentra fuera de operación, por lo que el fluido se localiza en el fondo del depósito común de aceite, lo cual garantiza que no existe contacto directo con el aceite evitándose así su contaminación.

Durante los primeros años de operación del variador de velocidad, se le realiza un chequeo del nivel de aceite, el cual es muy sencillo. Sin destapar el equipo de transmisión se observa por medio de una mirilla graduada (ver figura 2.4) el nivel de aceite dentro del depósito común, la cantidad de aceite se especifica de acuerdo con las necesidades del usuario. En caso de que el nivel del aceite se encuentre por debajo de los límites de operación, al variador de velocidad deberá agregársele el aceite faltante, evitándose así que se incremente la temperatura al estar en operación el equipo, el aceite utilizado es de tipo comercial con ciertas especificaciones y se recomienda cambiar después de 15,000 horas de servicio.

Las piezas que actúan directamente en la transmisión de potencia y que forman parte esencial del variador de velocidad, cumplen con la vida útil que especifica el fabricante que es de 30 años; debido a las características del sistema dichos componentes suelen estar lubricados, evitándose la corrosión; además se encuentran protegidos contra la fricción y vibraciones ya que la transmisión se realiza por medio del fluido.

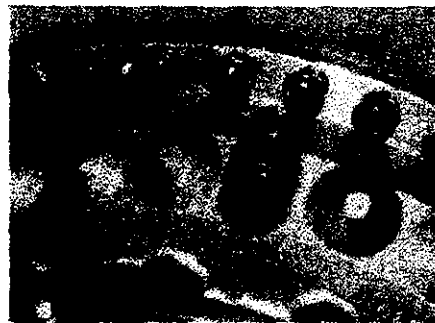


Fig. 2.4 Mirilla de nivel de aceite.

## CAPÍTULO III

### Aplicación de los variadores de velocidad hidráulicos.

#### III.1 Generalidades.

Los variadores de velocidad hidráulicos son usados para todas aquellas aplicaciones donde se requiere confiabilidad al realizar la variación de velocidad y eficiencia económica. Además presenta alta eficiencia de operación del equipo, y excelente control de operación.

Este tipo de variadores de velocidad son utilizados en grandes industrias como lo son: centrales eléctricas, industrias acereras, industrias químicas, industria petroquímica en alta mar o terrestre, industria de materia prima, industria naval, minería, industria de transportación, etc. Los principales usos que se le dan son en:

- **Centrales eléctricas**



Bombas de alimentación de calderas.

Bombas de alimentación de reactores.

Bombas de circulación de líquido refrigerante.

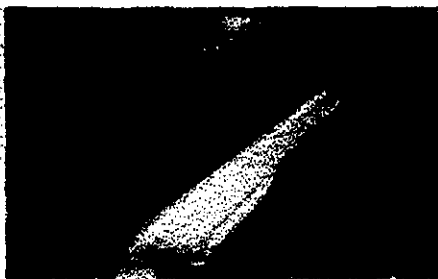
Grupos generadores de motores.

Molinos de carbón.

Ventiladores de calderas.

Turbinas de gas.

- **Industria acerera.**



Compresores.

Ventiladores.

Molinos de carbón.

Bombas de proceso.

- **Industria química.**



**Compresores.**

**Bombas.**

**Centrifugadoras.**

**Ventiladores.**

- **Industria petroquímica.**



**Bombas de alimentación de crudo.**

**Bombas de inyección.**

**Compresores.**

- **Industria de transportación.**



**Bandas transportadoras.**

**Ventiladores variables.**

**Bombas para tubos.**

---

En las siguientes figuras se muestran algunos variadores de velocidad hidráulicos instalados en plantas industriales.

En la figura 3.1 se ilustra un variador de velocidad hidráulico de varios compartimentos, acoplado a una bomba de alimentación de combustible, el variador es impulsado por un motor de 8,500 kW (11,300 H. P.).

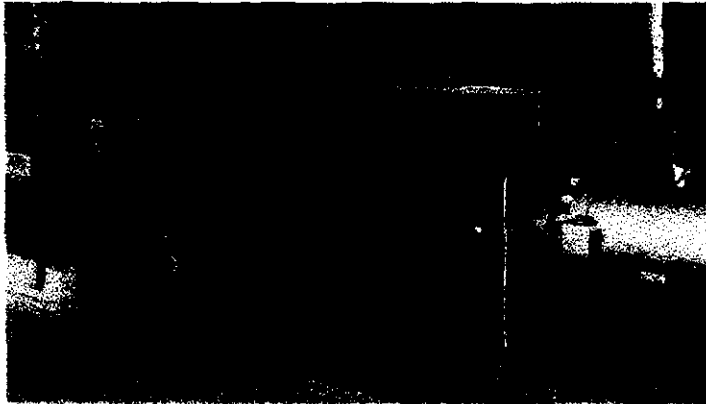


Fig. 3.1.

En la figura 3.2 se muestra un variador de velocidad hidráulico acoplado al compresor de una planta generadora de energía eléctrica que opera con carbón y gas, el variador es impulsado por un motor de 7,300 kW (9,750 H. P.).



Fig. 3.2.

---

En la figura 3.3 se ilustra un variador de velocidad hidráulico que cuenta con convertidor de torque acoplado a una turbina de gas, el variador es impulsado por un motor de 5,300 kW (7,060 H. P.).



Fig. 3.3.

En la figura 3.4 se muestra un variador de velocidad hidráulico acoplado a una bomba de circulación.



Fig. 3.4.

---

### III.2 Beneficios contra otros tipos de variadores de velocidad.

- Equipos de aplicación universal para la regulación o variación de revoluciones para un manejo y un mantenimiento sencillos.
- Transmisión sin desgaste de potencia mediante la energía hidrodinámica de un fluido.
- Arranque del motor sin carga, luego carga controlada según necesidades.
- Aceleración suave, protegiendo motor y máquina de trabajo, incluso máquinas de gran inercia.
- Ejecución robusta de larga duración y gran disponibilidad; mantenimiento sencillo.
- Ventajas del rendimiento de la regulación de las revoluciones frente a la regulación por estrangulamiento para carga parcial; ahorro de potencia y desgaste en los sistemas de estrangulación.
- Funcionamiento seguro con los diferentes sistemas de ajuste y regulación (mecanismos electromecánicos de ajuste, cilindros neumáticos o sistemas hidráulicos).
- Realización de condiciones especiales, tales como arranque sin carga y/o rápido, limitación del par de arranque o de la aceleración y/o desaceleración.



- 
- Separación de la máquina de accionamiento y de la máquina de trabajo durante el funcionamiento, aumentando la duración de la máquina accionada mediante el vaciado del turboacoplador.
  - Desacoplamiento por vibraciones torsionales.
  - Amortiguación de vibraciones de torsión y choques.
  - Alimentación de aceite de los grupos conectados.
  - Empleo de un aceite comercial como fluido de trabajo.
  - Posible mejora del rendimiento reintegrando el calor generado por el deslizamiento al proceso de trabajo.
  - Ideal para diferentes condiciones tropicales, en climas desérticos, en bajas temperaturas o en ejecuciones antiexplosión.
  - Alta velocidad de reacción y precisión al regular la velocidad.
  - No proporciona distorsión armónica en el sistema eléctrico.

---

## CAPÍTULO IV

### Ahorro de energía.

En los capítulos anteriores se han comentado algunas de las características de los variadores de velocidad tanto, mecánicos, electrónicos como hidráulicos; en este capítulo analizaremos el ahorro de energía que proporciona cada uno de los variadores de velocidad, en especial el de tipo hidráulico, ya que por los ahorros de energía obtenidos con los variadores de velocidad se logra también un importante ahorro económico en la industria, cuyas inversiones pueden resultar muy atractivas actualmente.

Hoy en día en las industrias es de gran importancia el eficiente aprovechamiento de los energéticos, tanto para disminuir los costos de producción, como para reducir la emisión de gases contaminantes (y así cumplir con las leyes ecológicas).

En los procesos donde es indispensable controlar el flujo de algún fluido, los variadores de velocidad son la respuesta a un gran número de industrias. Regularmente para controlar el flujo de un fluido se emplean válvulas de todo tipo, esto ocurre por el bajo costo que requieren para adquirirlas y operarlas, las válvulas cumplen con la función de reducir el caudal del fluido pero, por su operación de reducir el paso, el motor que acciona la máquina hidráulica que impulsa el fluido se ve afectado con la carga que presenta la válvula al reducir el área del ducto. De un modo más claro, las válvulas impiden el paso del flujo mientras el motor tiene que realizar un gran esfuerzo para vencer la carga hidráulica que esto representa, por lo tanto el motor demanda más potencia eléctrica y así el consumo de energía eléctrica aumenta de manera considerable.

En la industria donde los procesos requieren de variaciones de caudal, es necesario implementar el uso de los variadores de velocidad, los cuales disminuyen la carga de trabajo aplicada al motor, con esto se reduce la potencia demandada por el mismo. Al variar el flujo de fluido destinado al proceso se puede también variar la velocidad de operación, cada variador de velocidad funciona de manera diferente y en todos los tipos de variador se cumple la doble función de variar el caudal para mejorar el proceso y de reducir la demanda de potencia del motor.

---

Todos los variadores de velocidad ya sean mecánicos, electrónicos o hidráulicos reducen la potencia demandada debido a la disminución de la carga, ahora bien el variador de velocidad es utilizado dependiendo de las características de cada proyecto, es decir, que dicho variador de velocidad es funcional al ser utilizado en las condiciones para lo cual fué seleccionado.

Los variadores de velocidad permiten disminuir el caudal en el proceso además de proporcionar reducciones en la potencia demandada, para controlar el fluido utilizado en el proceso es necesario aminorar la velocidad en la flecha de transmisión (la cual transmitirá la potencia a la máquina hidráulica que impulsará el fluido) y para ello contamos con dos métodos muy sencillos:

1) En este método se utiliza un sistema variador - motor - máquina hidráulica, donde la energía eléctrica pasa por el variador de velocidad (electrónico) el cual transforma la corriente y el voltaje con la finalidad de variar la frecuencia, gracias a esta transformación el motor gira a velocidad variable y por lo tanto la máquina hidráulica también, cumpliéndose así con los requerimientos del proceso.

2) Este método tiene un sistema motor - variador - máquina hidráulica, en este caso el motor se mantiene girando a su velocidad nominal (constante), y por medio de una flecha el motor transmite potencia mecánica al variador de velocidad (mecánico o hidráulico) el cual se encarga de reducir la velocidad que se transmite a la máquina hidráulica para cumplir con las necesidades del proceso.

En ambos casos el sistema termina con una máquina hidráulica y es que en la mayoría de los procesos son fluidos los que se tienen que controlar, como se mostró en las aplicaciones del variador de velocidad (capítulo III), en algunos otros sistemas se aplican para variar la velocidad de molinos, rodillos de transportación, etc.

En las curvas potencia / velocidad que veremos a continuación, se hace una comparación de la reducción de potencia al utilizar los variadores de velocidad en los rangos de operación que especifica el fabricante. La reducción de potencia se representa por medio de una curva y el comportamiento de ésta depende de cada variador de velocidad, esta

---

reducción de potencia se observa como la diferencia que existe entre la curva de operación sin utilizar variador de velocidad y la curva de operación utilizando variador de velocidad.

La reducción de potencia multiplicada por el tiempo de operación da como resultado el ahorro de energía.

#### IV.1 Variadores hidráulicos.

El ahorro de energía al utilizar un variador de velocidad hidráulico se presenta en el momento en que se reduce la carga de trabajo al motor, esto ocurre cuando en el proceso es necesario disminuir el flujo, lo que implica variar la velocidad de la máquina hidráulica con el uso del variador de velocidad hidráulico. La reducción de carga de trabajo en el motor es debida a que en el variador de velocidad hidráulico el rodete secundario demanda menor potencia transmitida para proporcionar el par necesario al proceso, mientras el tubo captador limita el flujo de aceite en la cámara de trabajo y el rodete primario sigue girando a la velocidad nominal del motor de inducción; lo que significa que la cantidad de aceite en la cámara es la que proporciona el aumento o reducción en la velocidad transmitida.

La reducción de potencia demandada por el motor de inducción se debe a que se disminuye la carga de trabajo, esto ocurre porque la cantidad de aceite que impulsa el rodete primario (el cual se encuentra girando a la velocidad nominal del motor) es reducida por medio del tubo captador, así el motor impulsará a través del rodete primario una menor cantidad de aceite, lo que se traduce en menor carga de trabajo para el motor, como se observa en la figura 4.1.

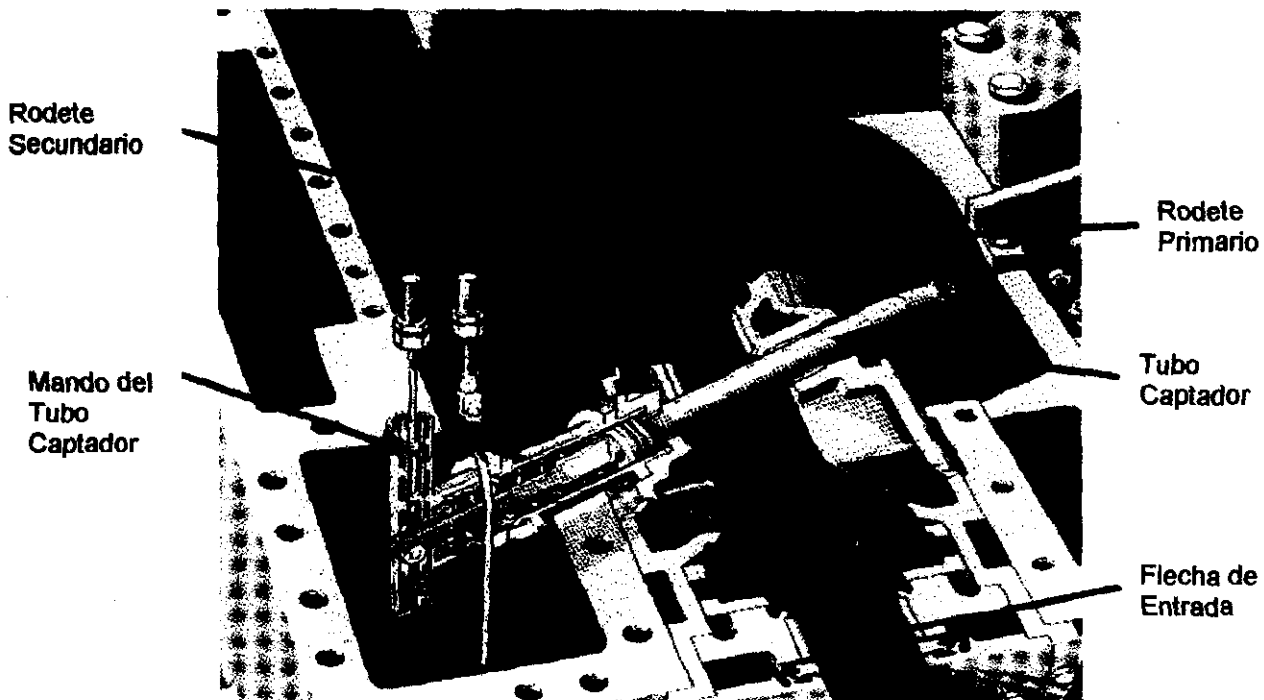


Fig. 4.1 Reducción de caudal por medio del tubo captador.

Se sabe que el motor trasmite directamente su potencia mecánica al rodete primario del variador de velocidad, y como necesidad del proceso hay que reducir la velocidad, para ello en el variador de velocidad se aminora el caudal (Q) por medio del tubo captador, como se puede apreciar en la siguiente ecuación.

$$Q = v A.$$

Ec. (4.1)

Donde A es el área por donde pasa el aceite que impulsa al rodete primario, la cual permanece constante, y al reducir el caudal se reduce la velocidad (v) transmitida al flujo. También al disminuir el caudal se reduce el momento hidráulico (M) comunicado al fluido como lo podemos apreciar en la siguiente ecuación.

$$M = Q \rho ( r_2 c_2 \cos \alpha_2 - r_1 c_1 \cos \alpha_1 ).$$

Ec. (4.2)

Donde Q es el caudal del fluido y se regula por la acción de mover el tubo captador,  $\rho$  es la densidad del aceite, el producto  $Q \rho$  nos proporciona la masa del fluido por unidad de tiempo a través de la máquina y los valores que se encuentran dentro del paréntesis se deducen de la geometría de los álabes de la máquina hidráulica y de la velocidad del fluido, donde c es la velocidad absoluta del fluido, u es la velocidad periférica del rodete, w es la velocidad del fluido relativa al rodete,  $\alpha$  es el ángulo que la velocidad absoluta c forma con la velocidad periférica u y r es el radio medido del centro giratorio de la máquina a la perifería del álabe, como se muestra en la figura 4.2.

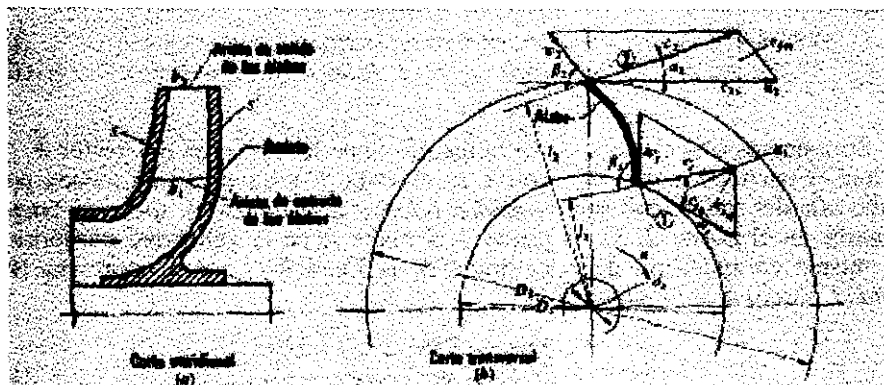


Fig. 4.2 Triángulos de velocidad.

La potencia que requiere el rodete para impulsar el fluido es la potencia de salida del motor ( $P_{\text{salida}}$ ) y se expresa en la siguiente ecuación.

$$P_{\text{salida}} = M \omega_1.$$

Ec. (4.3)

Donde  $\omega_1$  es la velocidad angular proporcionada por el motor, la cual permanece constante ya que el motor gira a velocidad nominal, y  $M$  es el momento total comunicado al fluido, y éste depende de el caudal que a su vez es regulado por el tubo captador. La variable que relaciona la potencia de entrada del motor con la potencia de salida del motor es la eficiencia del motor y se representa con la siguiente ecuación.

$$\eta_{\text{motor}} = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}}.$$

Ec. (4.4)

Donde se conoce la potencia de salida, la cual es proporcionada por el motor y requerida en el proceso; el fabricante del motor proporciona una gráfica en la que se muestra el comportamiento de la eficiencia del motor, como se observa en la figura 4.3.

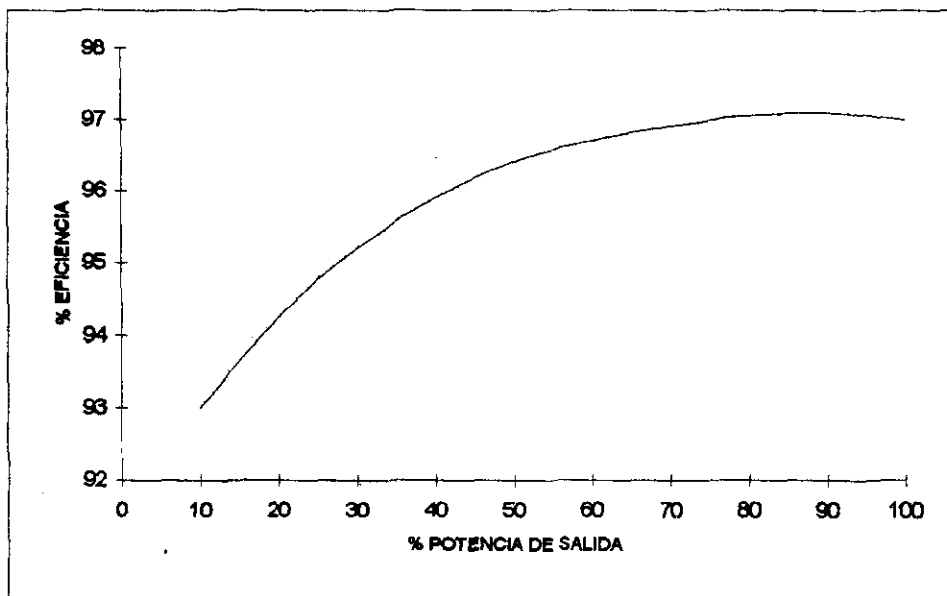


Fig. 4.3 Curva de eficiencia del motor de inducción.

En esta curva se indica en el eje de las abscisas el porcentaje de potencia a la salida del motor respecto a la máxima potencia de salida del mismo, y en el eje de las ordenadas el porcentaje de eficiencia del motor, analizando la curva anterior, si se conoce el porcentaje de potencia a la salida del motor es posible obtener la eficiencia de la máquina, con estos dos valores y utilizando la ecuación (4.4) se obtiene de manera directa el valor de la potencia de entrada al motor ( $P_{\text{entrada}}$ ), que se considera la demanda eléctrica que requiere el motor, como se ve en la siguiente ecuación.

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} / \eta$$

Ec. (4.5)

Por otro lado, una vez que se conoce la potencia de entrada, se analizan las variables afectadas al reducir la carga aplicada al motor, en este caso se recurre a la siguiente ecuación.

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} V I \text{ f. p.}$$

Ec. (4.6)

Donde  $\sqrt{3}$  es una constante utilizada en motores trifásicos, el voltaje entre fases (V) permanece constante, mientras que la corriente (I) y el factor de potencia (f. p.) son las variables a estudiar debido a que no se conocen sus valores.

El factor de potencia (f. p.) se analiza por medio de triángulos de potencia, los cuales se ilustran en la siguiente figura.

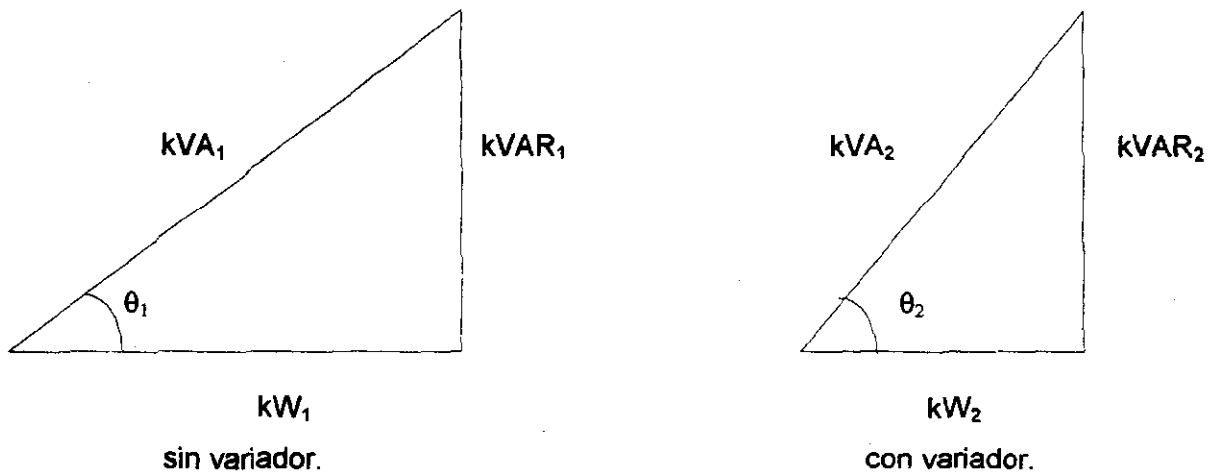


Fig. 4.4 Triángulos de potencia.



Donde el factor de potencia depende directamente del valor del ángulo  $\theta$ , otra forma de considerarlo es como  $\cos \theta$ , por medio de los triángulos de potencia se obtiene la ecuación del factor de potencia la cual es:

$$f. p. = \cos \theta = \cos \text{ang} \text{ sen } (kW / kVI).$$

Ec. (4.7)

Los kVAR es la potencia que requiere el motor para magnetizarse, es por ello que en ambos casos (con variador y sin variador) tiene el mismo valor. Los kW son la potencia de entrada al motor, los cuales disminuyen al utilizar un variador de velocidad, por consiguiente los kVA que son la potencia aparente, y que se representan con la multiplicación del voltaje (V) por la corriente (I), también se reducen por la disminución de I.

El factor de potencia se expresa con la ecuación (4.7), de esta forma se ve que el factor de potencia depende directamente de la corriente (I), así que de la ecuación (4.8) se despejan las constantes de las variables dependientes de la corriente (I).

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} V I f. p.$$

Ec. (4.6)

Sustituyendo.

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} V I \cos \text{ang} \text{ sen } (kW / kVI).$$

Ec. (4.8)

Despejando las constantes.

$$1 / \sqrt{3} V = (I / kW) \cos \text{ang} \text{ sen } (kW / kVI).$$

Ec. (4.9)

De esta ecuación el único valor desconocido es la corriente ( $I$ ), la cual es calculada por tanteos ya que se conoce la potencia de entrada (kW) de la ecuación (4.5). Por ejemplo al reducir el flujo del fluido al proceso en un 25% por medio del variador de velocidad hidráulico, el momento hidráulico ( $M$ ) disminuye en un 40% debido a la baja velocidad con la que entra el fluido en el tubo captador dentro del variador de velocidad hidráulico y a la menor velocidad con la que el fluido hace contacto con el rodete secundario, por lo tanto la potencia a la salida del motor ( $P_{salida}$ ) se ve afectada en un 40%; ésto se refleja en la curva de eficiencia del motor, donde para una potencia de salida con un valor del 60%, la eficiencia del motor es de 96.6%, de esta manera el valor de la potencia de entrada al motor ( $P_{entrada}$ ) se reduce en un 42%, asimismo la corriente disminuye en un 44%. Con este cálculo se observa que al disminuir la carga aplicada al motor, la corriente eléctrica se reduce y con ello se nota que la corriente eléctrica es la responsable de la reducción de potencia consumida por el motor.

La reducción de potencia se puede observar en el comportamiento de la curva de operación del variador de velocidad hidráulico, esta curva es de tipo cúbica, por lo tanto los ahorros se obtienen cuando el variador se encuentra operando con velocidades de 50 a 85% donde el consumo de energía es menor significativamente en comparación con la curva de operación sin variador, como lo podemos constatar en la figura 4.5.

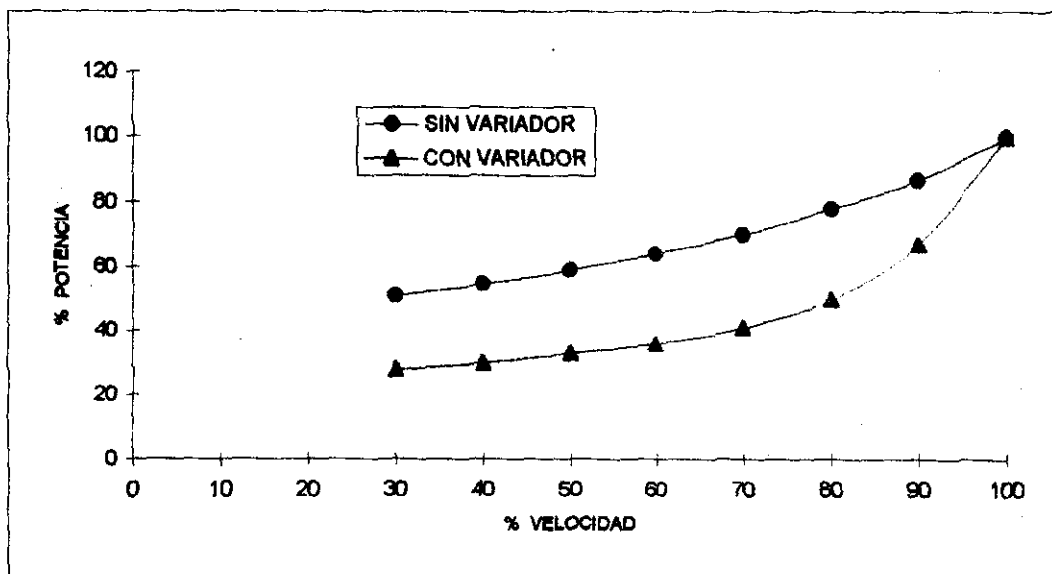


Fig. 4.5 Ahorro de energía del variador de velocidad hidráulico.

Los variadores de velocidad hidráulicos son la novedad en la transmisión de potencia, es por ello que aun no son tan populares, sin embargo nos permiten obtener muy buenas relaciones de velocidad y par a la salida, esto se refleja en la eficiencia del variador como lo podemos observar en la figura 4.6.

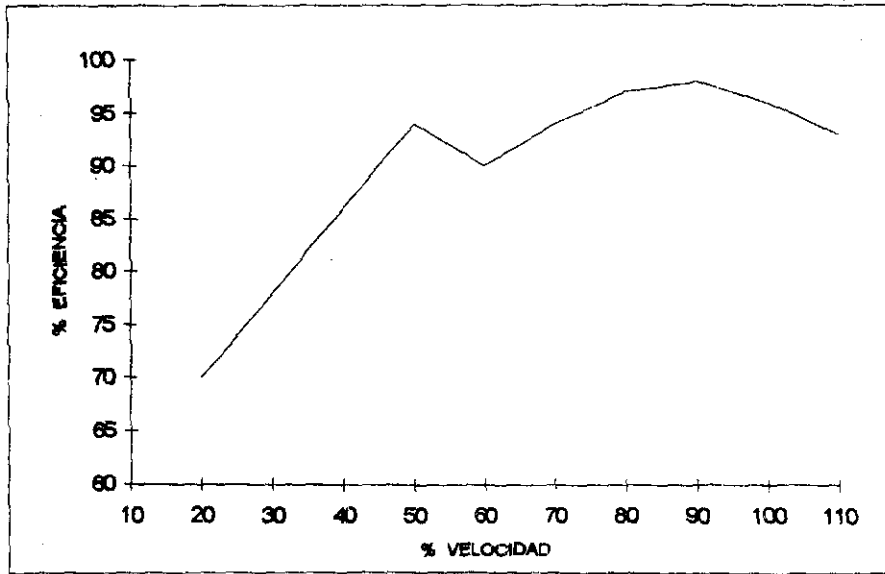


Fig. 4.6 Eficiencia del variador de velocidad hidráulico.

En la gráfica anterior vemos que la eficiencia del variador de velocidad al alcanzar el 50% de la velocidad se mantiene mayor al 90% y que en algunos puntos rebasa el 96%, manteniendo un promedio del 93% entre el 50 y el 100% de velocidad. Esta curva con altos porcentajes de eficiencia es la que nos da la confianza necesaria para cuando se trabaja con elevada potencia de transmisión y pueda competir con los variadores electrónicos, lo que nos demuestra la poca energía que se consume al transmitir la potencia con un variador de velocidad hidráulico.

La no linealidad que presenta la curva de eficiencia del variador de velocidad hidráulico es debida al accionamiento de cada una de las etapas que forman parte del variador las cuales son: acoplamiento de velocidad variable hidrodinámico, convertidor de par hidrodinámico, freno hidrodinámico y engranaje planetario.

---

## IV.2 Variadores mecánicos.

El ahorro de energía al utilizar un variador de velocidad mecánico ocurre al reducir la potencia demandada por el motor. Si en el proceso se requiere disminuir el caudal del fluido destinado al proceso, lo que implica variar la velocidad de la flecha que transmite potencia a la máquina hidráulica, esto se logra con la aplicación del variador de velocidad mecánico el cual permite que el motor gire constantemente a velocidad nominal, mientras el caudal del fluido de proceso es regulado. El variador de velocidad recibe el par entregado por la flecha del motor y lo reduce a través de los discos, transmitiendo así la velocidad y el par necesarios a la máquina hidráulica para el óptimo funcionamiento del proceso.

El motor gira a velocidad nominal por lo tanto lo único que puede variar es el par, esto depende directamente de la carga aplicada al motor. La carga aplicada al motor la proporciona el variador de velocidad mecánico, el cual demanda del motor cierto par, mientras que a la salida del variador de velocidad se proporciona la velocidad y el par requeridos por el proceso. Al reducir el caudal destinado al proceso el variador demanda menor par al motor, es decir, que el motor no tendrá que someterse a grandes esfuerzos, por lo que el motor requiere menos potencia para seguir girando a velocidad constante y transmitir el par suficiente al proceso.

El variador de velocidad mecánico opera con discos, los cuales se comportan de manera muy similar a los engranes, es por ello que podemos considerar las ecuaciones de los engranes aplicables a los discos de los variadores. Los discos con pestaña se encuentran acoplados a la flecha que transmite la potencia a la máquina hidráulica, estos discos permanecen en una sola posición y cuentan con un diámetro  $D_2$  y la velocidad angular empleada en el proceso será  $\omega_2$ , la cual es variable; los discos cónicos están unidos a la flecha que recibe la potencia proporcionada por el motor y son ajustables por medio del volante del variador, este ajuste se considera como una reducción de diámetro  $D_1$ , mientras la velocidad angular dada por el motor permanece constante (velocidad nominal), como se observa en la figura 4.7.

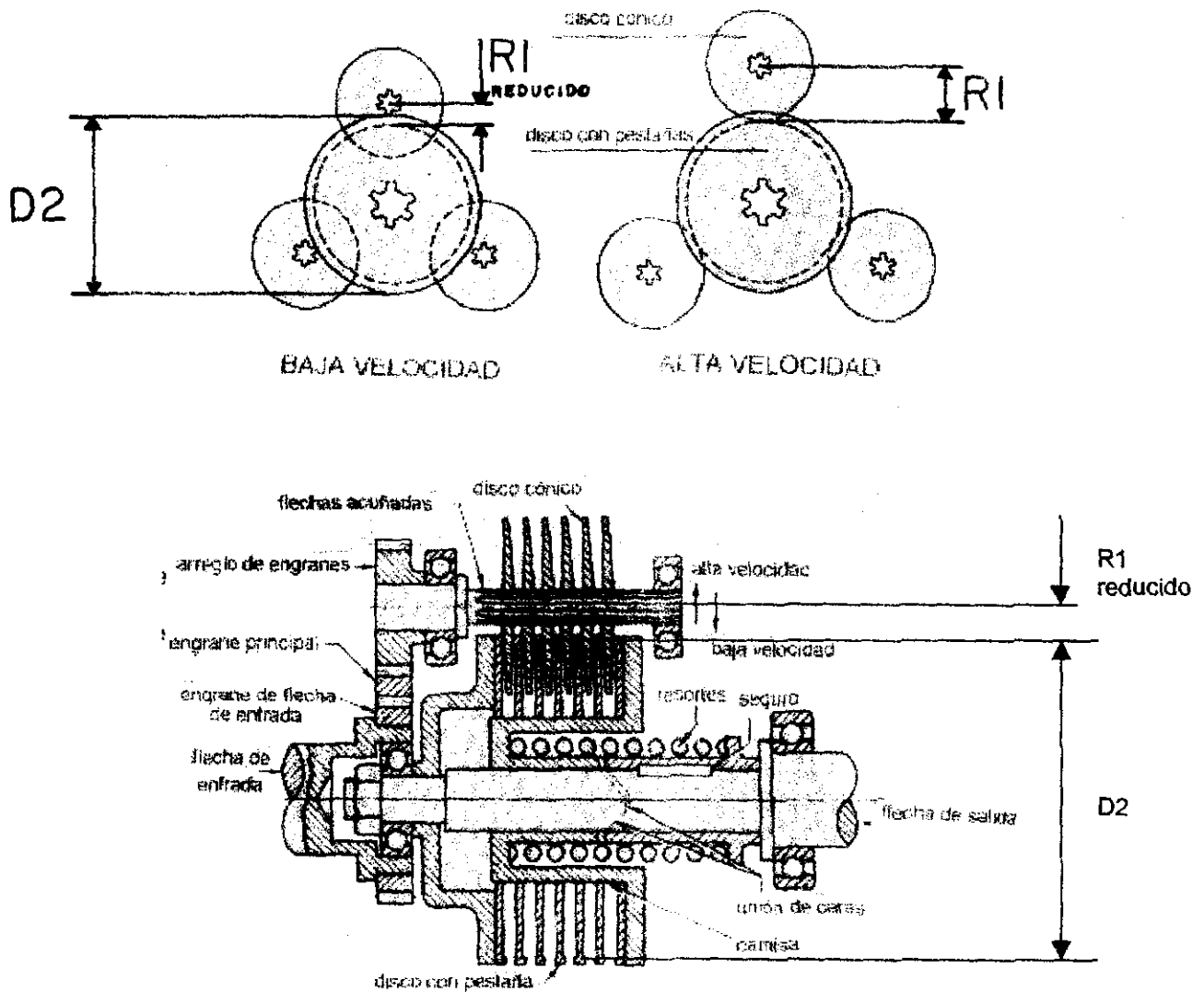


Fig. 4.7 Reducción del diámetro.

En la siguiente ecuación se ve la relación que guardan los diámetros con la velocidad angular.

$$\omega_1 / \omega_2 = D_2 / D_1.$$

Ec. (4.10)

Despejando la velocidad angular a la salida ( $\omega_2$ ), la cual es variable, se tiene.

$$\omega_2 = (D_1 / D_2) \omega_1.$$

Ec. (4.11)

Donde el diámetro de los disco con pestaña ( $D_2$ ) y la velocidad angular proporcionada por el motor ( $\omega_1$ ) son constantes, por lo tanto si se reduce el diámetro ( $D_1$ ) con el volante, obtendremos una velocidad angular menor a la salida del variador.

Al reducir la distancia entre los centros de los discos, se obtiene una reducción en el par proporcionado por el motor, esto se representa con la siguiente ecuación.

$$\tau_{\text{carga}} = F * d$$

Ec. (4.12)

Donde la fuerza ( $F$ ) proporcionada por el motor se mantiene prácticamente constante debido al funcionamiento del variador de velocidad, en el cual la distancia ( $d$ ) del centro de la flecha de entrada al centro de los discos cónicos se reduce en una proporción menor a la distancia entre el centro de los discos cónicos y la superficie de contacto de los discos con pestaña, como se observa en la figura 4.8.

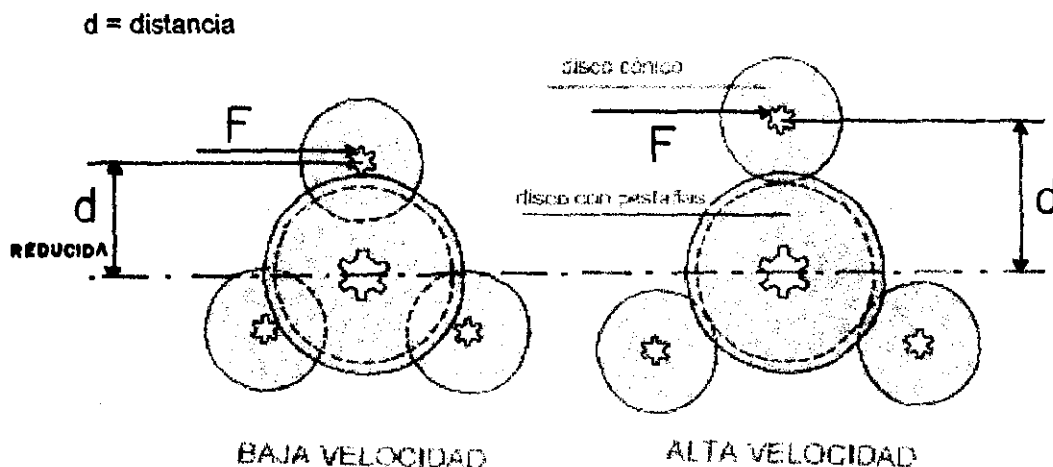


Fig. 4.8 Distancias relacionadas al par.

Así la potencia a la salida del motor necesaria para el proceso es:

$$P_{\text{salida}} = \tau_{\text{carga}} * \omega_1.$$

Ec. (4.13)

Esta ecuación involucra un par relativamente bajo, proporcionado por el motor y necesario para el proceso, además la velocidad angular  $\omega_1$  permanece constante al ser la nominal del motor; por lo tanto la potencia a la salida del motor, la cual es la demandada por el proceso es baja.

La ecuación de eficiencia del motor es la que relaciona la potencia de entrada con la potencia de salida, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\eta_{\text{motor}} = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}}.$$

Ec. (4.4)

Donde se conoce la potencia de salida, la cual es proporcionada por el motor; el fabricante del motor proporciona una gráfica en la que se muestra el comportamiento de la eficiencia del motor, como se observa en la figura 4.3. del subtema IV.1 (variador hidráulico).

En la curva antes mencionada se indica en el eje de las abscisas el porcentaje de potencia a la salida del motor, y en el eje de las ordenadas el porcentaje de eficiencia del motor, analizando la curva anterior, si se conoce el porcentaje de potencia a la salida del motor es posible obtener la eficiencia de la máquina, con estos dos valores y utilizando la ecuación (4.4) se obtiene de manera directa el valor de la potencia de entrada al motor ( $P_{\text{entrada}}$ ), que se considera la demanda eléctrica que requiere el motor, como se ve en la siguiente ecuación.

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} / \eta$$

Ec. (4.5)

Una vez que se conoce la potencia de entrada, se analizan las variables afectadas al reducir la carga aplicada al motor, en este caso se recurre a la siguiente ecuación.

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} V I \text{ f. p.}$$

Ec. (4.6)

---

Donde  $\sqrt{3}$  es una constante utilizada en motores trifásicos, el voltaje entre fases (V) permanece constante, mientras que la corriente (I) y el factor de potencia (f. p.) son las variables a estudiar debido a que no se conoce su comportamiento.

El factor de potencia (f. p.) se analizó en el subtema anterior por medio de los triángulos de potencia, donde se obtiene la ecuación del factor de potencia la cual es:

$$\text{f. p.} = \cos \theta = \cos \text{ang sen (kW / kVI)}.$$

Ec. (4.7)

Los kVAR es la potencia que requiere el motor para magnetizarse, es por ello que en ambos casos (con variador y sin variador) tiene el mismo valor. Los kW son la potencia de entrada al motor, los cuales disminuyen al utilizar un variador de velocidad, por consiguiente los kVA que son la potencia aparente, y son la multiplicación del voltaje (V) por la corriente (I), también se reducen por la disminución de (I).

El factor de potencia se expresa con la ecuación (4.7), de esta forma se ve que el factor de potencia depende directamente de la corriente (I), así que de la ecuación (4.8) se despejan las constantes de las variables dependientes de la corriente (I).

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} V I \text{ f. p.}$$

Ec. (4.6)

Sustituyendo.

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} V I \cos \text{ang sen (kW / kVI)}.$$

Ec. (4.8)

Despejando las constantes.

$$1 / \sqrt{3} V = (I / \text{kW}) \cos \text{ang sen (kW / kVI)}.$$

Ec. (4.9)



De esta ecuación el único valor desconocido es la corriente ( $I$ ), la cual es la que proporciona la reducción en el consumo de energía eléctrica en el motor de inducción.

La reducción de potencia al utilizar el variador de velocidad mecánico es relativamente pequeña ya que las curvas de operación con variador mecánico y sin variador presentan comportamiento semejante y de tipo cuadrático. La diferencia en la demanda de potencia entre estas curvas es similar en el rango del 30 al 70% de velocidad, mientras que en un rango mayor al 70% la distancia entre las curvas se reduce en forma considerable, lo que implica tener un menor ahorro de energía como se puede observar en la figura 4.9.

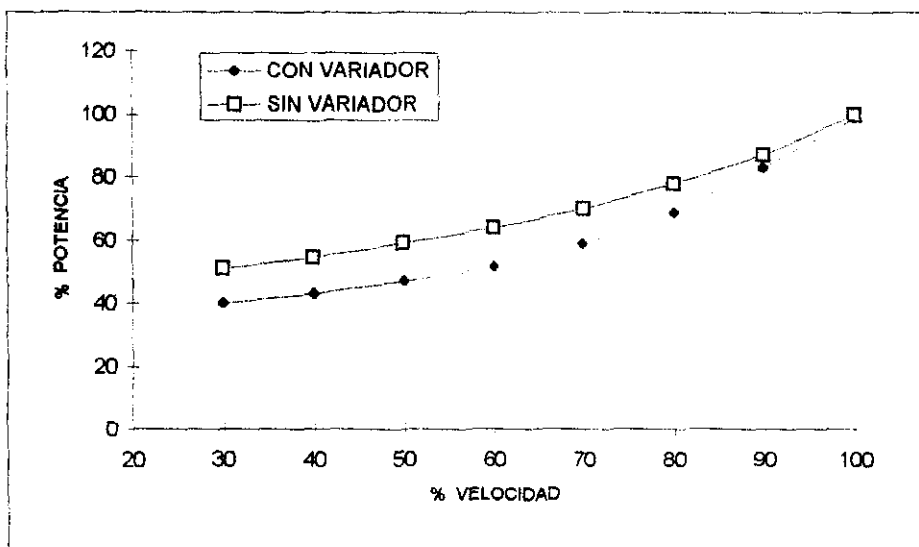


Fig. 4.9 Ahorro de energía del variador de velocidad mecánico.

La eficiencia del variador de velocidad mecánico se ve afectada de manera directa por la variación de la velocidad, ya que se tienen pérdidas por el deslizamiento entre los discos al obtener baja velocidad, como se aprecia en la figura 4.10, donde al reducir el porcentaje de velocidad, la eficiencia disminuye. La eficiencia que proporciona un variador de velocidad mecánico es en promedio de un 85%, la cual es menor comparada con las eficiencias de los otros variadores de velocidad.

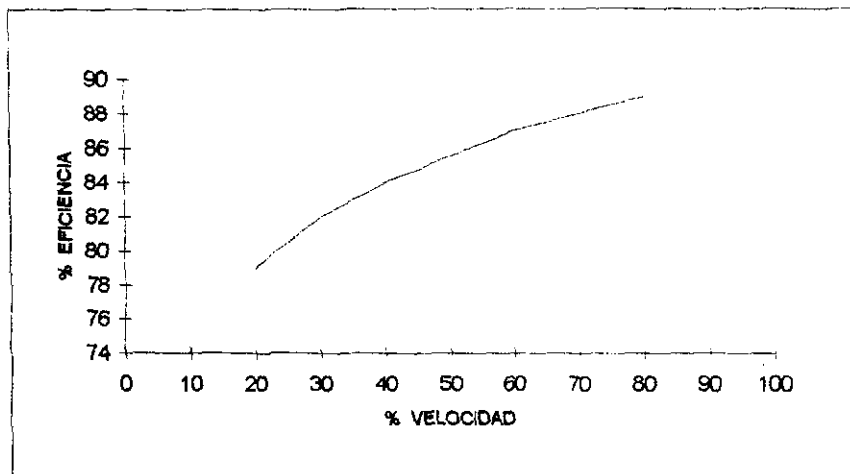


Fig. 4.10 Eficiencia del variador de velocidad mecánico.

Los variadores de velocidad mecánicos nos permiten obtener una menor relación entrada / salida de par en comparación con las velocidades en las mismas flechas, ya que su transmisión es completamente mecánica y esta conformada por una transmisión de discos con una delgada y fina película de aceite la cual evita el desgaste de los discos, el variador de velocidad mecánico no es eficiente para transmitir par. Por otro lado contamos con un ajuste manual de volante que varía la velocidad, esto implica manualmente operar la máquina, aunque se han implementado algunos dispositivos que automáticamente giren el volante no proporcionan la velocidad de respuesta necesaria para variar la velocidad en los procesos actuales.

### IV.3 Variadores electrónicos.

El ahorro de energía en el variador de velocidad electrónico se presenta como en los otros variadores de velocidad al reducir la carga de trabajo en el motor, esto ocurre de una manera particular, el principio básico es la necesidad de reducir la carga en el proceso, a través de variar la velocidad del motor con un variador de velocidad electrónico, el cual va instalado en la línea de alimentación al motor de inducción.

La energía eléctrica llega al variador de velocidad en forma de corriente alterna y con voltaje constante, posteriormente el variador transforma la corriente alterna en corriente directa a través de componentes electrónicos, una vez que la corriente es convertida en forma de corriente directa, la energía vuelve a ser transformada en corriente alterna con la peculiaridad de contar con una frecuencia diferente, la cual es controlada por el variador de velocidad electrónico; esta corriente alterna con frecuencia y voltaje variables es la que recibe el motor de inducción y lo pone en movimiento a la velocidad requerida por el proceso.

Usando el variador de velocidad electrónico es posible ajustar la velocidad del motor ya sea por encima o por debajo de la velocidad nominal del mismo.

Para entender el resultado de la disminución de la capacidad nominal, recuérdese que el motor de inducción es básicamente un transformador giratorio. Como con cualquier transformador, el flujo de corriente eléctrica en el núcleo de un motor de inducción puede hallarse por medio de la Ley de Faraday.

$$V(t) = N (dI / dt).$$

Ec. (4.14)

Al despejar el flujo de corriente eléctrica ( $I$ ), y considerando la frecuencia ( $f$ ):

$$dI = 1 / N \int V(t) dt$$

Ec. (4.15)

$$dI = 1 / N \int V \text{ sen } f t dt$$

Ec. (4.16)

Integrando se obtiene:

$$I = (V / f N) * \cos f t.$$

Ec. (4.17)

Donde (N) es el número de vueltas en la bobina de alambre y (f) la frecuencia eléctrica, aparecen en el denominador de esta expresión. Por tanto, si la frecuencia aplicada al estator se disminuye en un 10% por decir, mientras la magnitud del voltaje aplicado al estator (V) permanece constante, el flujo de corriente en el núcleo del motor se incrementará en cerca de un 10% y la corriente de magnetización del motor aumentará. Los motores de inducción están diseñados normalmente para operar cerca del punto de saturación de sus curvas de magnetización, de donde el aumento en el flujo de corriente debido a una disminución en la frecuencia, causa corrientes de magnetización excesivas que circulan por el motor.

Para evitar el exceso de corrientes de magnetización, se acostumbra disminuir el voltaje utilizado por el estator en proporción a la disminución de frecuencia, cuando ésta cae por debajo de la frecuencia nominal del motor. Puesto que el voltaje utilizado (V), aparece en el numerador de la ecuación y la frecuencia (f) aparece en el denominador de la ecuación, los dos efectos se contraponen entre sí y la corriente de magnetización no se afecta.

Cuando el voltaje utilizado por un motor de inducción varía linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad nominal, el flujo de corriente en el motor permanecerá aproximadamente constante. La potencia suministrada por un motor de inducción trifásico se halla por medio de.

$$P_{\text{entrada}} = \sqrt{3} V I \cos \theta.$$

Ec. (4.6)

Si el voltaje (V) se disminuye, entonces la máxima potencia también se debe disminuir o de lo contrario la corriente que fluye por el motor se vuelve excesiva y el motor se recalientará. Cuanto más elevada sea la frecuencia eléctrica por encima de la velocidad nominal, más grande se volverá el denominador de la ecuación del flujo de corriente (Ec. 4.17). Cuando la frecuencia eléctrica proporcionada por el variador electrónico que utiliza el motor sobrepasa su frecuencia nominal, el voltaje (V) del estator mantiene constante su valor nominal. Por lo tanto, cuando el motor trabaja a velocidades mayores de la nominal

---

(sobrevelocidad), el flujo de corriente eléctrica aumenta muy poco (Ec 4.17) y el par proporcionado por el motor se incrementa debido a la frecuencia de la corriente. Puesto que el término del numerador ( $V$ ) se mantiene constante por encima de la frecuencia nominal, tanto el flujo de corriente eléctrica resultante como el momento de torsión máximo sufren un pequeño incremento en la máquina.

El ahorro de energía ocurre en el momento en que por el variador de velocidad, la corriente alterna que entra al motor de inducción es con frecuencia variable, ya que la corriente alterna se presenta en forma senoidal y la frecuencia de la senoide es variable, el motor recibe más o menos pulsos de la corriente dentro del devanado, lo que podría significar como si el motor contara con los polos necesarios en el rotor para mover una carga predeterminada; por lo tanto, para mover una carga de trabajo reducida el motor debe proporcionar una menor velocidad, para ello el variador electrónico reduce tanto la frecuencia de la corriente como del voltaje de operación para no sobrecalentar el motor (Ec. 4.17), la corriente de magnetización presenta variaciones poco significativas por lo que se considera relativamente constante, pero el voltaje disminuye proporcional a la frecuencia, de esta forma en la (Ec. 4.6) puede notarse que la potencia consumida por el sistema variador electrónico - motor es reducida al operar a baja velocidad.

La curva del variador de velocidad electrónico tiene un comportamiento cúbico como se muestra en la figura 4.11, lo que proporciona elevadas disminuciones de potencia en el rango de velocidad del 30 al 70%, la reducción de potencia en el resto del rango de operación es considerablemente menor.

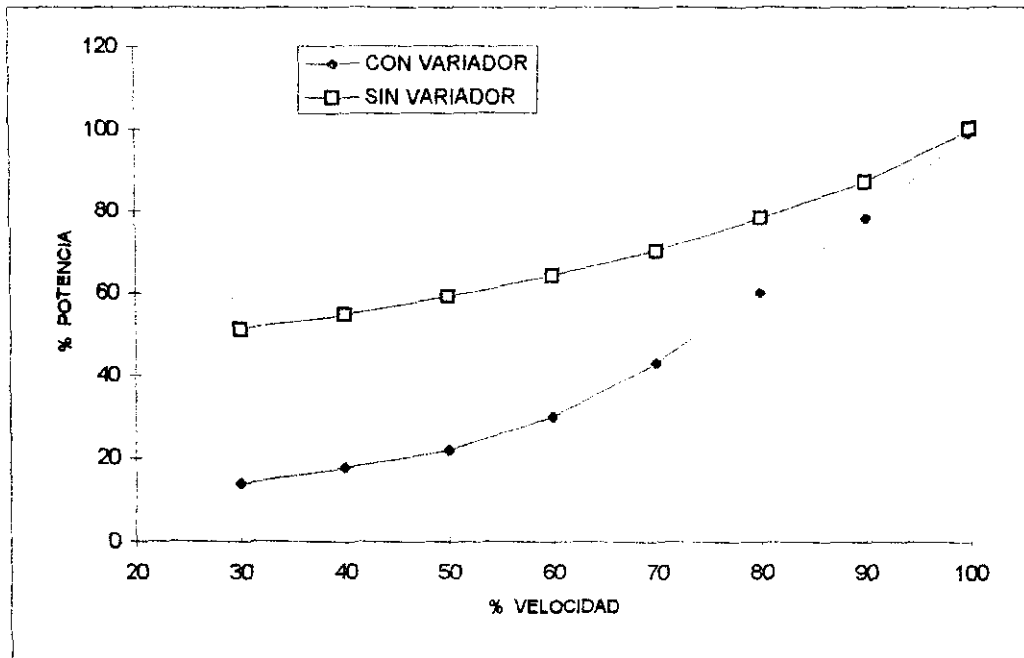


Fig. 4.11 Ahorro de energía del variador de velocidad electrónico.

Los variadores de velocidad electrónicos son la moda actualmente de los variadores de velocidad, y pueden ser utilizados en forma económicamente satisfactoria cuando son acoplados a motores cuya potencia de entrada sea menor a los 150 kW (200 H. P.); cabe mencionar que son funcionales por su versatilidad ya que pueden ser programados para no exceder los límites de operación, permiten relaciones de velocidad entrada / salida con una exactitud de milésimas y pueden ser controlados inalámbricamente; todo esto debido a su simple funcionamiento que transforma la corriente alterna entrante al motor. En este variador aunque existen pérdidas por la transformación de la energía, es importante notar que se generan ahorros económicos adicionales al eliminar el costo de cualquier tipo de arrancador y protección para el motor, además es mucho más factible automatizar un sistema electrónico que uno mecánico.

La eficiencia en los variadores de velocidad electrónicos es elevada, ya que se tiene un excelente control en la variación de la velocidad, debido a sus componentes de estado sólido. La eficiencia que se obtiene con el variador electrónico es en promedio de un 95% (véase figura 4.12).

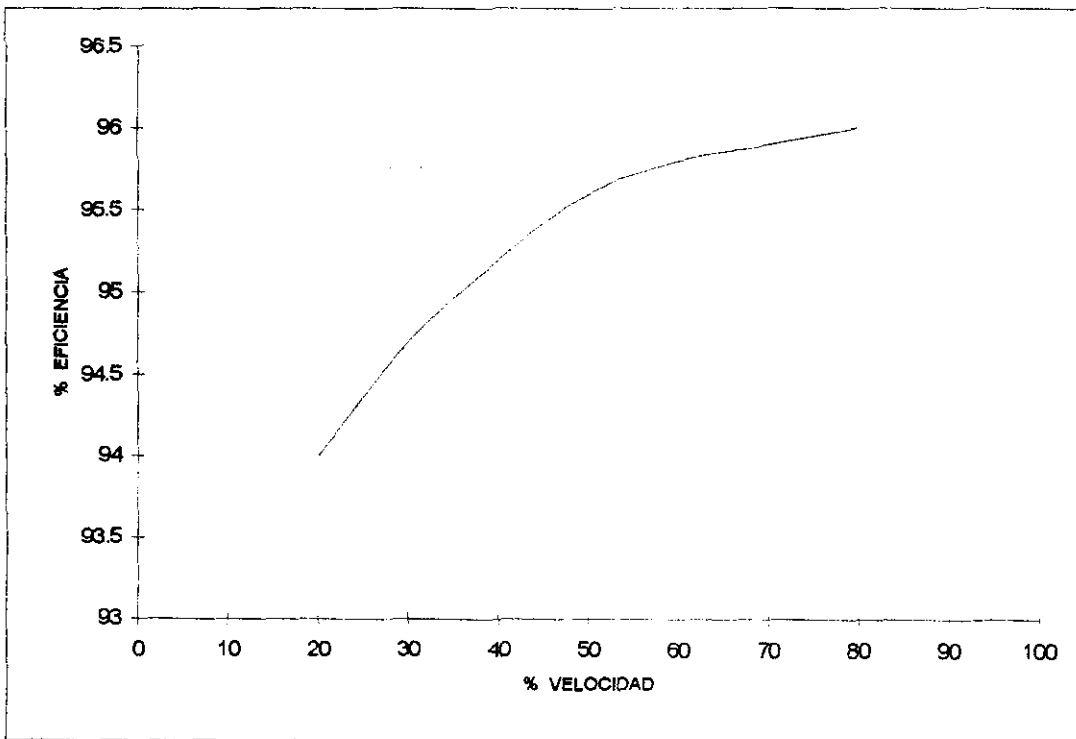


Figura 4.12 Eficiencia del variador de velocidad electrónico.

#### IV.4 Análisis comparativo del ahorro de energía.

Al comparar las gráficas de velocidad contra potencia en los tres tipos de variadores de velocidad que hemos analizado, se observa que en todos los casos existe reducción de potencia demandada por el motor, siempre y cuando se opere con cargas reducidas, lo que implica operar con velocidades menores al 100%. Para que se generen ahorros de energía importantes es indispensable que el proceso demande menos carga de operación y que estos periodos donde se demanda poca carga sean prolongados. En el variador de velocidad mecánico el comportamiento de su curva se refleja en forma cuadrática, mientras que en el caso de los variadores de velocidad hidráulicos y electrónicos el comportamiento de sus curvas es de tipo cúbico.

En la figura 4.13 se muestran las curvas de comportamiento de velocidad contra potencia de los tres tipos de sistemas variador de velocidad - motor y la curva del motor de inducción que muestra la potencia demandada por el mismo operando sin variador de velocidad. Tomando como base la curva del motor de inducción sin variador de velocidad, la diferencia entre esta curva y la de cualquiera de las otras representa la reducción de potencia que multiplicada por el tiempo de operación en cada nivel de carga se obtendrá el ahorro de energía al utilizar cada tipo de variador de velocidad.

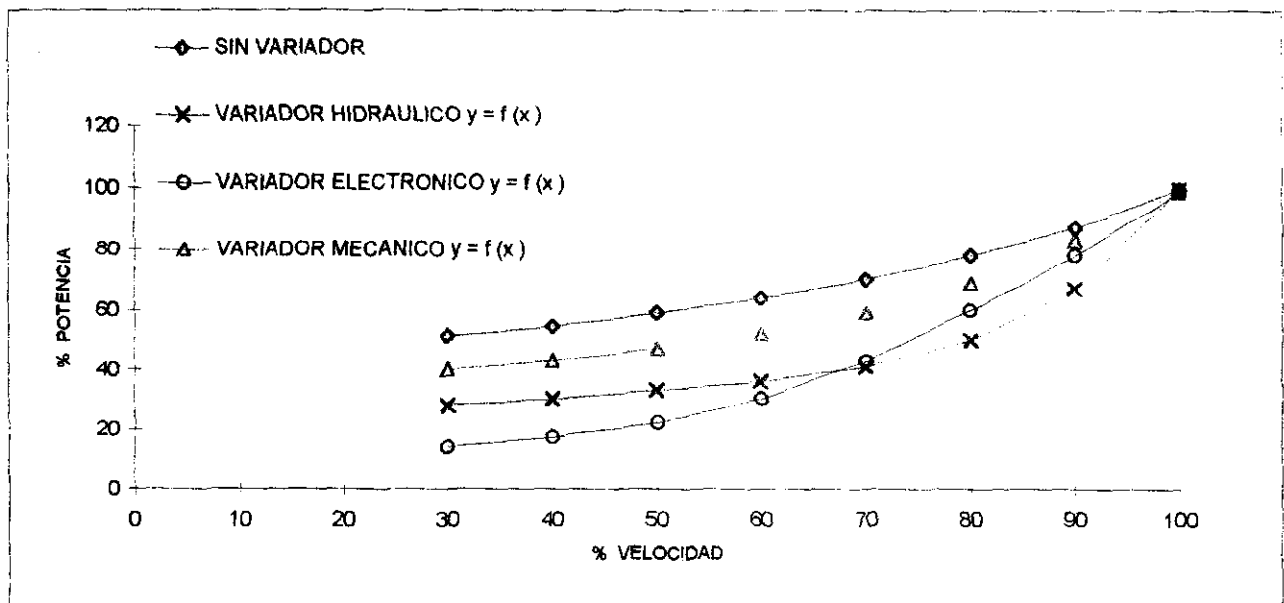


Fig. 4.13 Comparación de las curvas de ahorro de energía.



Se puede observar en la misma figura 4.13 la intersección de las curvas del variador de velocidad hidráulico y del variador de velocidad electrónico en el punto donde la reducción de la velocidad es aproximadamente del 68%, en esta convergencia el porcentaje de ahorro de energía en ambos variadores de velocidad es el mismo, sin embargo en la curva del variador electrónico se observa que al trabajar por debajo del 68% de velocidad se ahorra más energía que al utilizar un variador de velocidad hidráulico, por otro lado, al utilizar el variador de velocidad hidráulico en rangos superiores al 68% y menores al 100% de velocidad, éste proporcionará mayor ahorro de energía que al emplear el variador electrónico.

En la mayoría de los equipos industriales la eficiencia juega un papel muy importante, ya que es la que nos permite calificar de alguna manera la calidad del equipo. En los variadores de velocidad no es la excepción, es por ello que a continuación se muestra en la figura 4.14 una gráfica comparativa de las eficiencias de los variadores de velocidad electrónicos, mecánicos e hidráulicos:

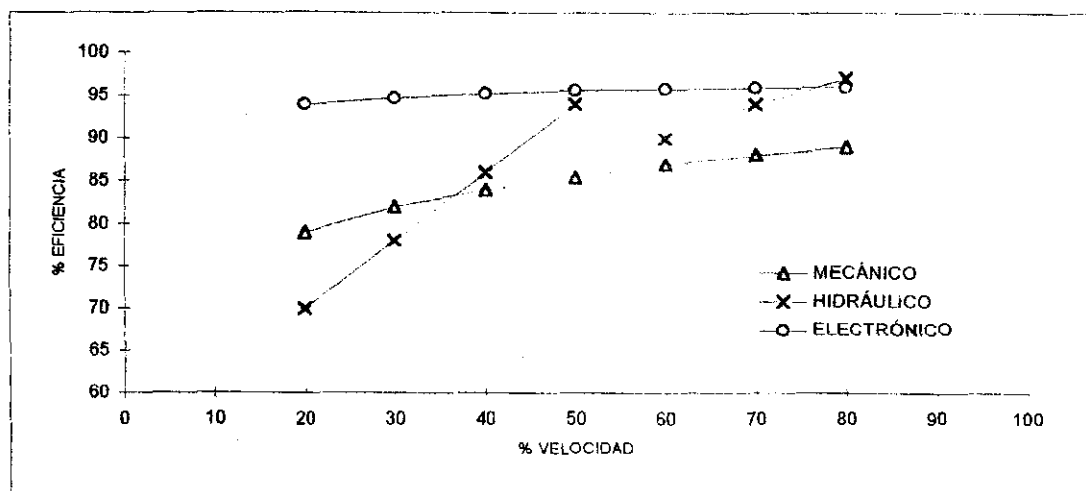


Fig. 4.14 Comparación de las curvas de eficiencia de los variadores de velocidad.

En la figura 4.14 se observa que el variador de velocidad mecánico tiene una eficiencia del 78 al 88%, la cual es menor que la eficiencia de los otros variadores de velocidad. En el electrónico su eficiencia va desde un 94 hasta un 95%, mientras que el variador hidráulico presenta una curva variable debido al funcionamiento multietapas alcanzando hasta un 96% de eficiencia; notándose que la curva más uniforme de alta eficiencia es la proporcionada por el variador electrónico.

#### IV.5 Caso práctico.

En la planta termoeléctrica Mazatlán se pretende invertir en la instalación de un variador de velocidad hidráulico acoplado al ventilador de tiro forzado de la unidad número tres, el cual opera con un motor de inducción de 1,865 kW (2,500 H. P.), con un voltaje de 4,180 V y a una velocidad de 1,180 r.p.m.

La instalación del variador de velocidad hidráulico proporcionará un cuantioso ahorro de energía debido a que la planta opera a diferentes cargas durante el año, además de aprovechar eficientemente el ventilador de tiro forzado ya instalado en la unidad número tres. Debido a que actualmente existe una sobredemanda del motor de inducción de 12.5% para el 100% de carga de la unidad (velocidad de 1,180 r.p.m.), con el variador se puede obtener una reducción de potencia, ya que este variador de velocidad puede satisfacer el flujo requerido con el 91% de velocidad (1,049 r.p.m.), al quitar las compuertas para el control de flujo actual al tiro forzado (el área del ducto se amplía y el flujo presentará una menor caída de presión), lo que implica un ahorro de potencia de 364 kW.

La potencia consumida por el motor utilizando el variador hidráulico se obtiene de la curva de eficiencia del motor de inducción (figura 4.3), del momento hidráulico para el variador de velocidad (tabla 4.1) y de las ecuaciones (4.3 y 4.5).

Cálculos para obtener la potencia demandada por el motor con variador de velocidad hidráulico:

Para el caso con 100% de carga, el proceso requiere únicamente el 91% de velocidad (1,049 r.p.m. o  $109.85 \text{ s}^{-1}$ ), mientras el momento hidráulico correspondiente a esa velocidad debe calcularse con las ecuaciones (4.2 y 4.1). Para realizar estos cálculos es necesario conocer del variador hidráulico: la geometría de los álabes, la velocidad absoluta del fluido a la entrada del rodete secundario, la velocidad periférica del rodete secundario, los radios de la entrada y salida de los álabes medidos desde el eje rotacional de la máquina hidráulica y el caudal; además, debido a que no se cuenta con el variador hidráulico físicamente para realizar pruebas en diferentes equipos y con diversas cargas, no se pueden obtener de manera directa los datos para la realización de los cálculos del momento hidráulico en el variador, por lo tanto

el fabricante proporciona la relación de momento hidráulico con la velocidad de salida del variador expresada en la tabla (4.1), la cual se ajusta a las necesidades de operación de la unidad número tres instalada en Mazatlán. De esta forma el valor del momento hidráulico correspondiente al 91% de velocidad proporcionado por el fabricante equivale a 12,150 J; sustituyendo estos datos en la ecuación (4.3) se obtiene la potencia a la salida del motor, que es de 1,334 kW, la cual representa el 71.5% de la potencia máxima de salida. Con estos datos aplicados en la figura (4.3), se obtiene el porcentaje de eficiencia que es de 96.9% y con ello se calcula de manera directa sustituyendo los valores en la ecuación (4.5) la potencia de entrada o consumida por el motor la cual es de 1,376 kW.

En la tabla 4.1. se muestra el momento hidráulico correspondiente a las r.p.m. necesarias para el proceso (tabla proporcionada por el fabricante).

Velocidad de salida del variador (r.p.m.)	Momento hidráulico (J)
500	5,960
600	7,080
700	8,170
800	9,250
900	10,315
1,000	11,410
1,100	12,500
1,200	13,620

Tabla 4.1. Momento hidráulico del variador de velocidad.

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.3), se tiene:

$$P_{\text{salida}} = M \omega_1.$$

$$P_{\text{salida}} = 12.15 \text{ kJ} * 109.85\text{S}^{-1}$$

$$P_{\text{salida}} = 1,334 \text{ kW}$$

Utilizando la figura (4.3) se tiene una eficiencia del 96.9%.

Al sustituir los valores obtenidos en la ecuación (4.4) y despejar la  $P_{\text{entrada}}$ , se tiene:

$$\eta_{\text{motor}} = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}}$$

Despejando.

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} / \eta_{\text{motor}}$$

Sustituyendo.

$$P_{\text{entrada}} = 1,334 \text{ kW} / 0.969 = 1,376 \text{ kW}.$$

Siguiendo la metodología anterior se obtienen los cálculos para el porcentaje de carga de 50 y 75%.

Cuando la unidad número tres opera a 75% de carga, la velocidad necesaria es de 787 r.p.m. ( $82.41 \text{ s}^{-1}$ ), lo que implica un momento hidráulico de 9,100 J; la potencia obtenida a la salida del motor es de 749.9 kW, representando el 41.5% de potencia máxima; por lo tanto la potencia consumida por el motor es de 780 kW.

Cuando la unidad número tres se encuentra operando con un 50% de carga, la velocidad necesaria es de 519 r.p.m. ( $54.34 \text{ s}^{-1}$ ), el momento hidráulico correspondiente es de 6,280 J; la potencia a la salida del motor es de 341.2 kW, es decir, el 19% de la potencia máxima; con estos cálculos se tiene que la potencia consumida por el motor es de 361 kW.

Si la demanda de carga hace que la planta opere comúnmente a 50, 75 o 100%, el ventilador de tiro forzado deberá trabajar a 519, 787 o 1,049 r.p.m. respectivamente, es decir, que el variador de velocidad hidráulico transmita el 45, 68 o 91% de la velocidad máxima del motor respectivamente, como se muestra en la tabla 4.2.

Porcentaje de carga de la unidad # 3 (%)	50	75	100
Porcentaje de velocidad transmitida por el variador (%)	45	68	91
Velocidad del ventilador de tiro forzado (r.p.m.)	519	787	1,049
Potencia consumida por el motor sin variador de velocidad hidráulico (kW)	988	1,165	1,735
Potencia consumida por el motor con variador de velocidad hidráulico (kW)	*361	*780	*1,376
Reducción de potencia (kW)	628	385	364

\* Datos obtenidos mediante cálculos.

Tabla 4.2 Reducción de potencia al usar el variador de velocidad hidráulico.

Dentro de la planta anualmente se registran tiempos de operación promedio de 22 horas al día aproximadamente para el ventilador considerando los paros necesarios para servicio y mantenimiento, lo que al año representa 8,000 horas de trabajo; en la tabla 4.3 se muestra el porcentaje del tiempo de operación del equipo a las diferentes cargas de trabajo, además se indica el ahorro de energía anual.

Porcentaje de carga (%)	50	75	100
Porcentaje de operación al año (%)	32.1	49.45	18.45
Tiempo de operación anual (hrs)	2,568	3,956	1,476
Reducción de potencia (kW)	628	385	364
Ahorro de energía anual (kWh)	1'612,344	1'522,723	536,563

Tabla 4.3 Ahorro de energía anual.

El ahorro de energía anual representado en la tabla 4.3 muestra los ahorros parciales obtenidos al operar la unidad número tres de la planta termoeléctrica a diferentes cargas durante el año, la suma de todas las parcialidades da como resultado el ahorro total de energía en la planta durante un año el cual es de 3'671,631.00 kWh.

## CAPÍTULO V

### Evaluación económica.

#### V.1 Metodología general.

La base de este capítulo es comprobar la rentabilidad en proyectos donde se utilizan variadores de velocidad hidráulicos que transmitan potencias superiores a los 150 kW (200 H. P.), es decir, que los empresarios se beneficien con ahorros de energía y ganancias monetarias a corto plazo. Cabe mencionar que si el costo de la energía eléctrica aumenta, se incrementa la importancia al invertir en este tipo de proyectos.

Para valorar la rentabilidad de los proyectos se utiliza el método de medición detallada, el cual consiste en evaluar los ahorros anuales obtenidos durante toda la vida útil del equipo en el tiempo presente, es decir, en el momento de realizar la inversión, de esta evaluación se obtiene la recuperación de capital; para que la valoración resulte favorable, el resultado de la relación beneficio costo debe ser mayor a uno y el tiempo de recuperación del capital invertido no debe rebasar el 30% de la vida útil del equipo, lo que nos indica que es rentable la inversión de este proyecto.

En la figura 5.1 se observan los ahorros anuales ( $Aa$ ) desde el año de la inversión hasta el año "n" de vida útil del equipo, y como se trasladan a valor presente en lo que se denomina beneficio ( $B$ ), éste se compara con el costo inicial ( $CI$ ).

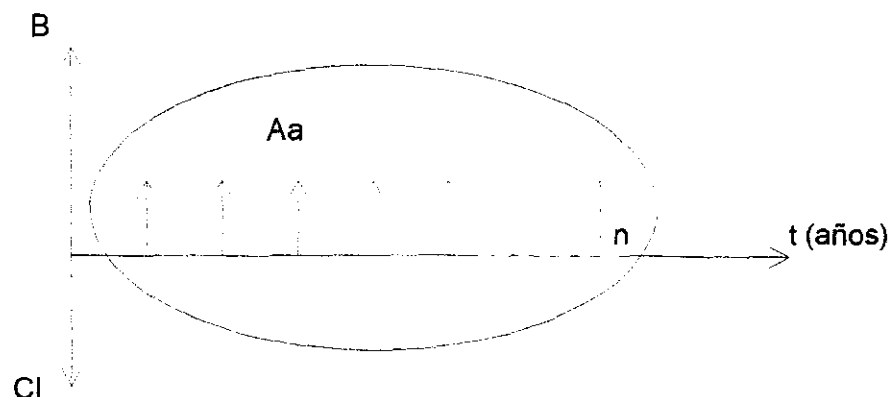


Fig. 5.1 Diagrama costo beneficio.

Del diagrama anterior se iguala el beneficio con el costo inicial, de esta ecuación se despeja el tiempo de recuperación, las variables involucradas para tal efecto son:

Cl costo inicial.

Aa ahorro anual.

i tasa de descuento =  $[(\text{taza interbancaria} - \text{inflación}) / (1 + \text{inflación})]$ .

n vida útil.

FVP factor de valor presente =  $[\{1 - (1 + i)^{-n}\} / i]$ .

B beneficio =  $Aa * FVP$ .

Para obtener el periodo de recuperación de capital se igualan los valores  $B = Cl$ :

$$\begin{aligned} Aa * FVP &= Cl \\ Aa * [\{1 - (1 + i)^{-n}\} / i] &= Cl \end{aligned}$$

Despejando "n", y cambiándola a la variable "m" como el tiempo de recuperación de capital:

$$m = \{-\ln[(Cl * i) / Aa] + 1\} / \ln(1 + i).$$

Al relacionar la recuperación de capital con el tiempo de vida útil del equipo, se obtiene un cociente, el cual debe ser menor ó igual al 30% para que la recuperación de capital sea rentable.

$$m / n \leq 30\%.$$

Cabe mencionar que al invertir en un variador de velocidad hidráulico, además de obtener ahorros de energía, se adquieren otros ahorros económicos como son:

- Ocupa poco espacio y no requiere de cimentación especial.
- El no invertir en protección para el motor.
- Ahorrarse la subestación eléctrica, ya que no es necesaria.
- Poco mantenimiento.
- Requiere poco equipo auxiliar.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## V.2 Caso práctico.

El ahorro de energía anual obtenido en el capítulo anterior es de 3'671,631 kWh, si el precio por kWh es de \$ 0.23 según la tarifa HM, el ahorro anual en pesos es de \$ 844,475.13. En base a los datos de operación de la planta termoeléctrica Mazatlán en su unidad número tres, el equipo indicado es un variador de velocidad hidráulico tipo 1000 SVNL 21-18.5.3, con un costo de \$ 1'975,895.03 ya instalado, contando con una vida útil mínima de 30 años garantizada por el fabricante.

La tasa interbancaria promedio es de 49.63% anual y la inflación presente es del 20% anual, con estos datos es posible aplicar el método de medición detallada para verificar la rentabilidad de esta inversión, además de obtener el tiempo de recuperación de capital.

### DATOS

CI	\$ 1'975,895.03
Aa	\$ 844,475.13
Taza interbancaria promedio	49.63% anual
Inflación	20% anual
n	30 años

Calculando la tasa de descuento tenemos que:

$$i = [(0.4963 - 0.2) / (1 + 0.2)] = 0.2469$$

Calculando el factor de valor presente se obtiene:

$$FVP = [ \{ 1 - (1 + 0.2469)^{-30} \} / 0.2469 ] = 4.045$$

Con el factor de valor presente y el ahorro anual se obtiene el beneficio, el cual representa los ahorros durante la vida útil en valor presente.

$$B = (844,475.13) (4.045) = 3'415,901.90$$



---

La relación beneficio costo nos indica la ganancia producto de la inversión, tomando como unidad de referencia el costo inicial.

$$3'415,901.90 / 1'975,895.03 = 1.72$$

Como el resultado es mayor que uno, el proyecto es rentable.

La recuperación de capital es recomendable obtenerla menor al 30% de la vida útil del equipo, y se calcula de la siguiente manera:

$$m = \{ -\ln [ ( 1'975,895.03 * 0.2469 ) / 844,475.13 ] + 1 \} / \ln ( 1 + 0.2469 ) = 7.018 \text{ años.}$$

$$m / n = 7.018 / 30 = 23.39\%$$

Como el capital se recupera en menos de la tercera parte del tiempo de vida útil del equipo, la inversión es rentable.

---

## CAPÍTULO VI

### Conclusiones y recomendaciones.

Comparando los distintos tipos de variadores de velocidad, es preciso decir que cada uno cubre diferentes expectativas, y todas diversas entre ellos; así que para seleccionar un variador de velocidad es indispensable definir perfectamente las necesidades del proceso, para elegir correctamente el variador correspondiente, el cual proporcionará un ahorro de energía. Se concluye que todos los tipos de variadores de velocidad proporcionan un ahorro de energía.

De la figura 4.5 el variador de velocidad mecánico presenta ahorros de energía muy limitados ya que su curva potencia / velocidad es muy similar a la del motor sin variador, además de presentar la menor eficiencia de los variadores en cuestión; el variador de velocidad electrónico proporciona elevados ahorros de energía principalmente en el rango de operación entre el 30 y el 68% de velocidad, mientras que en el resto del rango de operación el ahorro disminuye considerablemente por el comportamiento de su curva el cual es de tipo cúbico; finalmente con el variador de velocidad hidráulico se generan ahorros de energía significativos en rangos de operación que van desde el 50% y hasta valores menores al 100% de velocidad.

Dado que los variadores de velocidad electrónicos y los hidráulicos proporcionan un mayor ahorro de energía, recomendamos ampliamente su instalación en equipos de proceso; los variadores de velocidad electrónicos son factibles económicamente para operar con motores menores a 150 kW (200 H. P.), porque el costo de un variador de velocidad electrónico para motores superiores a los 150 kW (200 H. P.) llega a ser tres veces más elevado que el costo de un variador de velocidad hidráulico; por otra parte, económicamente los variadores de velocidad hidráulicos podrán operar con motores que van desde los 150 kW (200 H. P.) y hasta los 30,000 kW (40,000 H. P.), porque al adquirir un variador de velocidad hidráulico que opere con un motor menor a los 150 kW (200 H. P.), su costo sobrepasará el costo del variador de velocidad electrónico indicado para ese motor.

---

En nuestro estudio encontramos que el variador de velocidad hidráulico es completamente recomendable para los casos donde se transmiten potencias superiores a los 150 kW (200 H. P.), como en el caso práctico mencionado en los capítulos IV y V, ya que el costo de la inversión se recupera en muy poco tiempo gracias al gran ahorro de energía que genera el variador de velocidad hidráulico, además proporciona ahorros económicos debido a: su escaso mantenimiento, su prolongado tiempo de vida y el ahorro de adquisición de equipo de protección para el motor.

El ahorro de energía es notable al utilizar un variador de velocidad hidráulico, por lo tanto es rentable que una empresa invierta en proyectos de esta categoría ya que además de poder invertir en tecnología para su empresa, ahorra energía en beneficio de la humanidad, y su economía mejora junto con la calidad de sus procesos.

Esperamos que en un futuro no muy lejano la comercialización de sistemas de variación de velocidad del tipo hidráulico sea conocida por todas las compañías, ya que el ahorro de energía para el país y para el mundo entero sería en grandes cantidades, como se ha mencionado con anterioridad los ahorros de energía obtenidos pueden ser de hasta un 80%, esto implica que el consumo de energéticos no renovables para la producción de energía eléctrica se reduciría notablemente y con ello la contaminación producida por la combustión de los hidrocarburos.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Departamento técnico baldor.  
"Motores controlados por inversores"  
Ingeniería azucarera.  
Editorial R. G. y asociados S. A. de C. V.  
Febrero - Marzo 1998; México.  
Pág. 5 - 12.  
Año 11 volumen No. 70.
  
- 2.- "sm - beier & sm - beister, mechanical adjustable speed drives"  
Catalog 06.002.50.001.  
U. S. A.  
Sumitomo machinery corp. of america.  
72 Págs.
  
- 3.- "Especificaciones sobre transmisiones de potencias, guía para ingenieros consultores".  
Sumitomo propulsa ...  
Monterrey N. L., México.  
Sumitomo machinery corp. of america.  
20 Págs.
  
- 4.- "Los variadores de velocidad como un medio para ahorrar energía eléctrica".  
FIDE  
México, D. F.  
Fideicomiso para el ahorro de energía.  
12 Págs.
  
- 5.- "Turbo - acopladores regulables".  
VOITH TURBO  
Alemania.  
Voith turbo GmbH & Co. KG.  
25 Págs.

- 
- 6.- "Turbo - acopladores de llenado controlado".  
VOITH TURBO  
Alemania.  
Voith turbo GmbH & Co. KG.  
7 Págs.
- 7.- "Turbo - acopladores regulables voith con engranaje y accionamientos de velocidad variable de varios circuitos".  
VOITH TURBO  
Alemania.  
Voith turbo GmbH & Co. KG.  
27 Págs.
- 8.- "Accionamiento de velocidad variable con varios circuitos VORECON".  
VOITH TURBO  
Alemania.  
Voith turbo GmbH & Co. KG.  
4 Págs.
- 9.- "Acoplamientos hidrodinámicos regulables en la petroquímica".  
VOITH TURBO  
Alemania.  
Voith turbo GmbH & Co. KG.  
5 Págs.
- 10.- "Instrucciones de instalación y de servicio, turboacopladores con llenado constante".  
VOITH TURBO  
Alemania.  
Voith turbo GmbH & Co. KG.  
63 Págs.

- 
- 97
- 11.- Bernard Hamisch y Gunther Peikert.  
"Accionamientos de velocidad variable en la nueva tecnología de centrales eléctricas".  
Energía.  
Madrid, España.  
Separata.  
Julio - Agosto 1993  
Págs. 45 - 53.
- 12.- Energía racional.  
Ing. Mateo Treviño Gaspari.  
Julio - Septiembre 1997.  
México, D. F.  
FIDE.  
47 Págs.  
Año 6, No 24.
- 13.- Thomas R. Doll.  
Selección de la unidad motriz de velocidad ajustable.  
"Unidades, matrices, sellos, empaquetaduras y tuberías".  
9 de Agosto de 1982.
- 14.- Stephen J. Chapman.  
Máquinas eléctricas.  
Ed. Mc Graw Hill.  
2ª edición.  
México 1993.
- 15.- Claudio Mataix Plana.  
Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.  
Ed. Harla.  
2ª edición.  
México 1982.

---

16.- Ing. Victor Pérez Amador.

Pruebas de equipo eléctrico II

Motores trifásicos de inducción.

Ed. Limusa.

México 1983.