

CONTROLADORES DE FRECUENCIA VARIABLE

2.1. Velocidad base

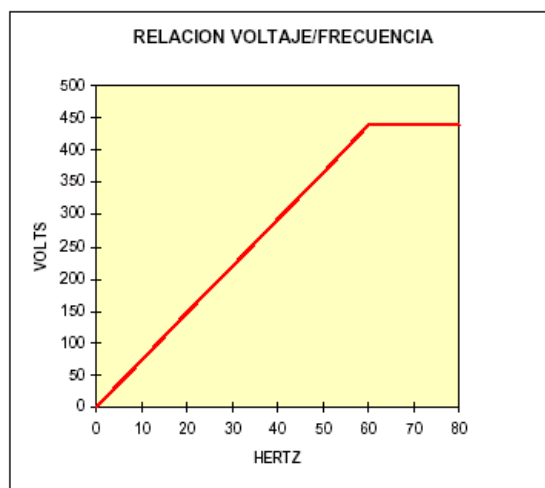
La velocidad de la flecha del motor a voltaje, frecuencia y carga nominal se conoce como velocidad base, cuando se varía la frecuencia de alimentación al motor por encima o por debajo de 60 Hz, el motor opera por encima o por debajo de la velocidad base.

2.2. Volts / Hz

Los motores de inducción producen el torque debido al flujo en su campo rotatorio. Cuando se opera por debajo de su velocidad base el torque se lleva a cabo manteniendo constante la relación voltaje / frecuencia que se aplica al motor.

La relación para motores de 460V y 230V es:

Voltaje	Frecuencia	Volts / Hz
460	60	7.6
230	60	3.8



Si la relación Volts/Hz se incrementa al bajar la frecuencia para reducir la velocidad del motor, la corriente se incrementará llegando a ser excesiva. Si por el contrario la relación Volts/Hz se reduce al subir la frecuencia para elevar la velocidad del motor, la capacidad de torque se verá reducida.

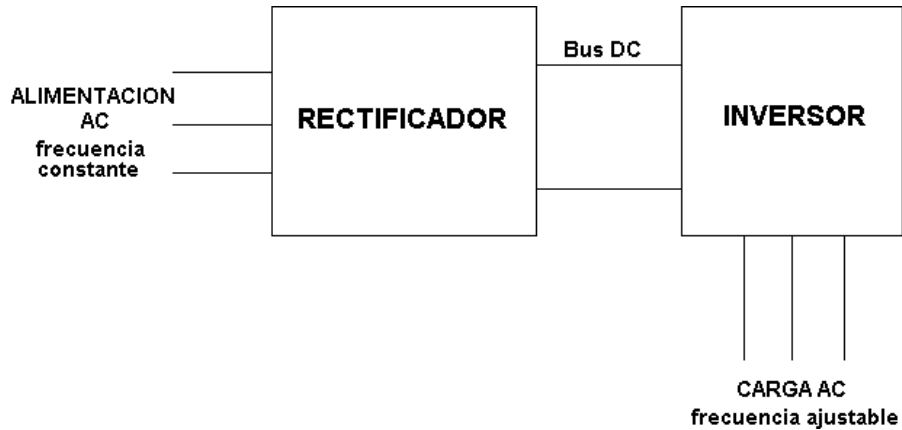
Cuando se opera por arriba de la velocidad base, la relación Volts/Hz se reduce ya que se aplica un voltaje constante al motor, que generalmente es el voltaje nominal, por lo que las capacidades de torque se reducen.

A frecuencias de alimentación del motor de 30 Hz y menores, la relación Volts/Hz no siempre se mantiene constante, ya que dependiendo del tipo de carga, el voltaje puede incrementarse para elevar la relación Volts/Hz para que el motor produzca un torque mayor, especialmente a velocidad cero. Este ajuste es llamado elevación de voltaje (Voltage Boost).

Cuando el motor opera con cargas ligeras se puede reducir la relación Volts/Hz para minimizar la corriente del motor, y debido a que se aplica un voltaje menor, se consigue reducir la corriente de magnetización y consecuentemente producir un torque menor que aún sea tolerable.

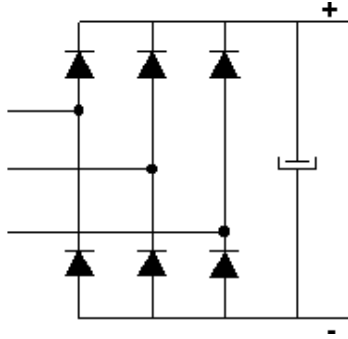
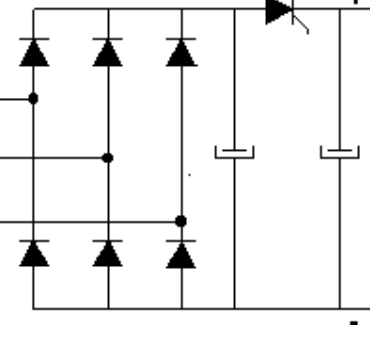
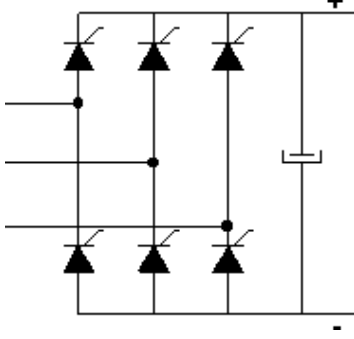
2.3. VDF

Los controladores de frecuencia variable de estado sólido constan de un rectificador que convierte la corriente alterna de la línea de alimentación a corriente directa y de una segunda sección llamada inversor que convierte la corriente directa en una señal de corriente alterna de frecuencia ajustable que alimenta al motor.



2.3.1 Rectificador

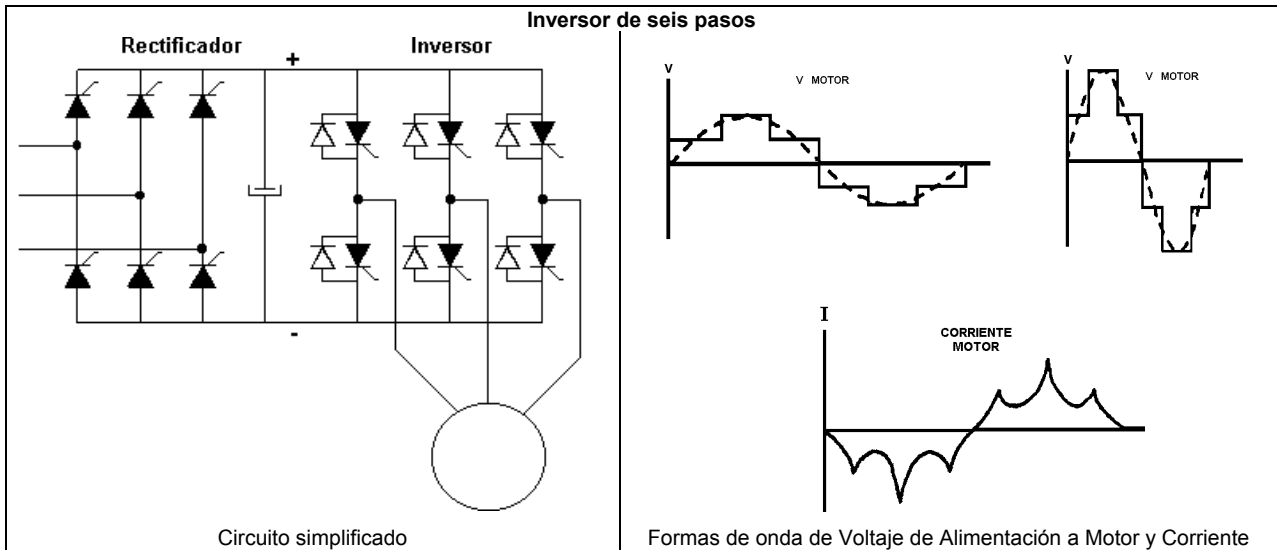
La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz, siendo los siguientes métodos básicos los mas usados:

Diodos	DC Chopper	Tiristores
		
<p>Control: No Voltaje CD: Constante Rizo CD: Bajo V/Hz: Se ajusta en Inversor Inversor: PWM FPd: Alto para todas las velocidades Armónicas: Alto Regeneración: No</p>	<p>Control: SCR, GTO, Transistor Voltaje CD: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: No</p>	<p>Control: SCR Voltaje DC: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos, PWM FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: Sí</p>

2.3.2 Inversor

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido que son controlados por microprocesador para conmutar el voltaje del bus de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

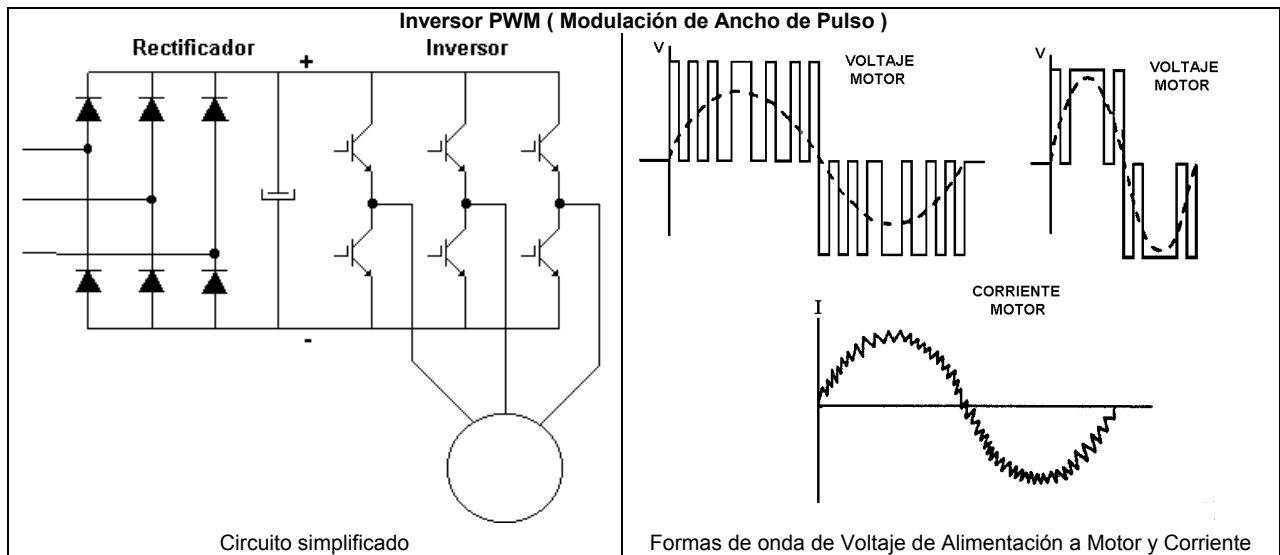
2.3.2.1 Inversor de seis pasos



Para variar la frecuencia del motor, se ajusta el tiempo de conducción de los SCR's para cada uno de los seis pasos, modificando el tiempo del ciclo. El voltaje de CD se ajusta para mantener la relación Volts-Hz constante.

Cuando se utilizan SCR's en el inversor, se utilizan circuitos complejos de conmutación que no se muestran en la figura y que incluye la lógica de disparo y componentes adicionales de potencia para apagarlos que constan de capacitores, inductores y SRC's adicionales. Esta complejidad se reduce cuando se utilizan GTO's o IGBT's como interruptores de potencia.

2.3.2.2 Inversor PWM



El inversor consiste de seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que se alimentan al motor. Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal senoidal.

El cambio de voltaje requerido para mantener la relación Volts-Hz constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador de propósito dedicado que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento.

La distorsión armónica afecta los aislamientos del motor, incrementa su ruido audible y eleva el calentamiento entre un 5% y un 15% dependiendo del diseño del fabricante y velocidad de operación.

2.3.2.2 Variadores de Tipo Flujo Vectorial

Los VFD de C.A. han estado limitados a aplicaciones de par normal mientras que las aplicaciones de alto par y baja velocidad han sido el dominio de los motores de CD. Esta situación ha cambiado por la introducción de una nueva generación de la tecnología PWM, el variador de flujo vectorial.

El método de control de par usado en el VDF de flujo vectorial es similar al usado en los de CD, que incluyen un amplio rango de velocidades con una rápida respuesta. Este variador tiene la misma sección de potencia que los PWM, pero usa un sofisticado control de lazo cerrado del motor al microprocesador del variador de frecuencia. La posición y velocidad del rotor es monitoreada en tiempo real a través de un codificador digital que determina y controla la velocidad, par y potencia del motor.

Al controlar la sección de inversión en respuesta a las condiciones actuales de la carga en tiempo real, se obtiene un control excelente del par, velocidad y potencia, así como una rápida respuesta a los cambios de carga y se consigue proporcionar el 100 % de par a velocidad 0.

La gran mayoría de fabricantes tienen VDF con tecnología enfocada al control de par más que al control de velocidad. El objetivo es controlar el par del motor en lugar de la velocidad y por lo tanto tienen respuestas más rápidas y precisas a las variaciones del par demandado por la carga.

Para lograr esto, el variador “explora” al motor haciendo un auto-reconocimiento (autotuning), en el que le inyecta corriente y voltaje para determinar su comportamiento, creando un algoritmo o modelo de sus características de funcionamiento y controlarlo de la manera más adecuada.

El reconocimiento al motor se puede realizar con carga y sin carga y al concluir se guarda en la memoria del VDF un modelo matemático del motor con el que se va a trabajar quedando respaldado incluso cuando se desconecta totalmente.

Durante la operación, el modelo recibe la información de la corriente que el motor demanda en sus 3 fases, los valores de voltaje del bus de C.D. y el estado de los transistores de potencia (IGBT). Con estos datos se calcula el flujo en el estator, el par, la frecuencia y la velocidad de cada ciclo.

El modelo estima la resistencia en el estator, obteniendo este valor mediante la comparación de los datos obtenidos de la identificación inicial y en la subsecuente operación del mismo.

La diferencia en la operación del inversor comparada con la tecnología PWM que tiene una frecuencia de conmutación fijada de acuerdo a las necesidades, mientras que en los VFD recientes la frecuencia de conmutación se modifica de acuerdo con las necesidades de par de la carga.

Este tipo de VFD es ideal para aplicaciones de una complejidad mayor que generalmente se controlan con motores de CD como extrusoras, grúas, elevadores, máquinas de papel, y molinos entre otras.

En todas las aplicaciones de VDF anteriormente descritas hay que tener muy presentes el calentamiento que pueda llegar a sufrir el motor al disminuir la velocidad del ventilador de enfriamiento acoplado al mismo en la parte posterior. Si el motor va a trabajar en rangos de velocidad de 0 a 30 Hz durante periodos prolongados, se recomienda instalar ventilación extra a la del motor para asegurar el enfriamiento adecuado

3.0 Tipos de Cargas

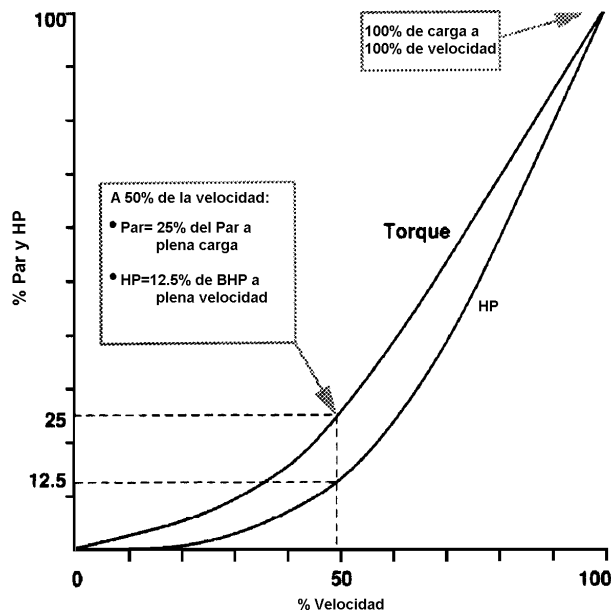
La primera consideración que se debe de hacer al aplicar un VFD es determinar el tipo de carga y sus características, debiendo de conocer los requerimientos de Par y Velocidad.

Las cargas se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Cargas de Par Variable
- Cargas de Par Constante
- Cargas de Potencia Constante
- Cargas de Impacto

3.1 Cargas de Par Variable

Las cargas en las que el Par se reduce cuando operan por debajo de la velocidad base y se incrementa al operar por encima de dicha velocidad base se clasifican como Cargas de Par Variable. En muchas de estas cargas el par se reduce con el cuadrado de la velocidad, siendo las bombas centrífugas y cierto tipo de ventiladores y sopladores las cargas más representativas.



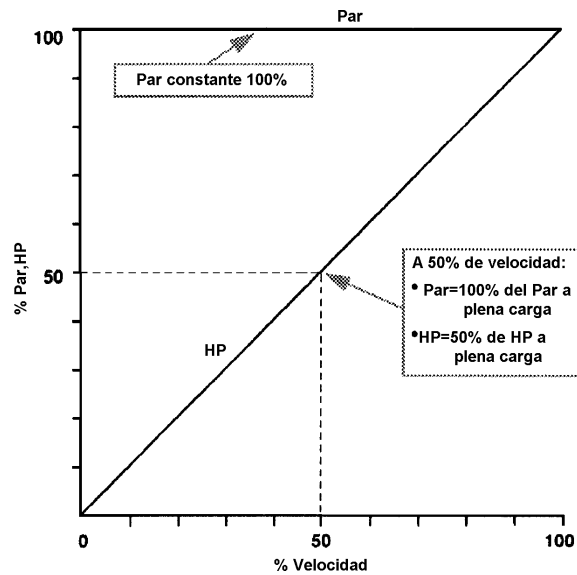
Comportamiento de Cargas de Par Variable

3.2 Cargas de Par Constante

Son cargas en las que el Par no es función de la velocidad sino que permanece constante, mientras que la potencia varía linealmente con la velocidad.

Las aplicaciones típicas son:

- Accionamientos de tracción
- Bandas transportadoras
- Bombas de desplazamiento positivo
- Grúas y malacates

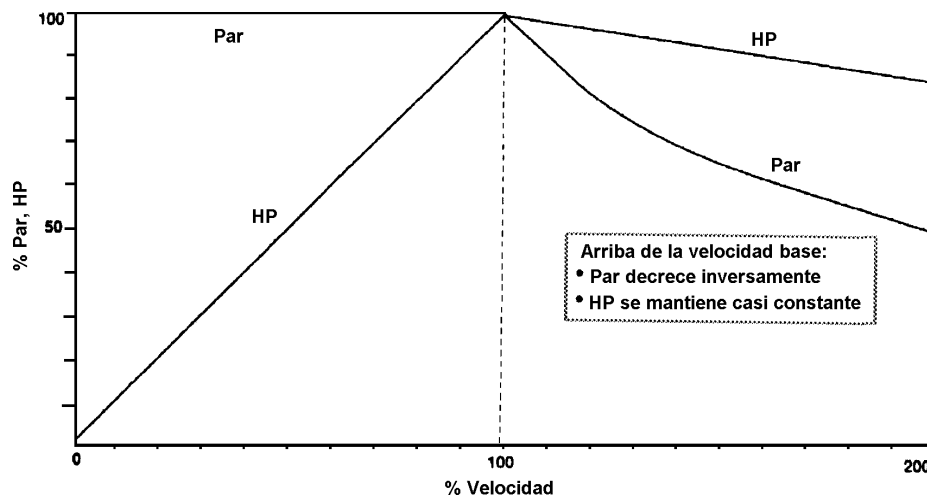


Comportamiento de Cargas de Par Constante

3.3 Cargas de Potencia Constante

En las cargas de potencia constante, cuando se opera por encima de la velocidad base, el Par requerido decrece, mientras que la potencia se mantiene casi constante. Las aplicaciones típicas son:

- Molinos
- Embobinadoras

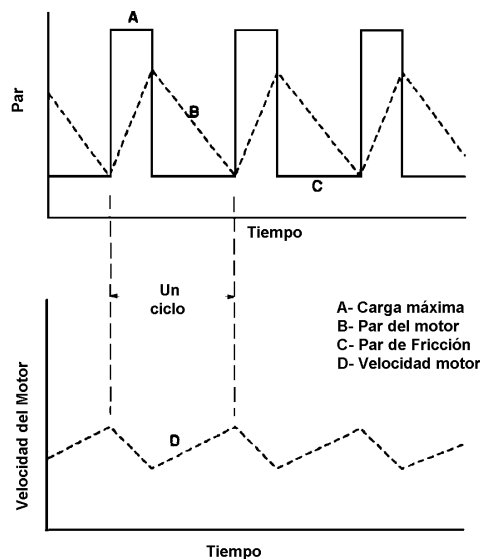


Comportamiento de Cargas de Potencia Constante

3.4 Cargas de Impacto

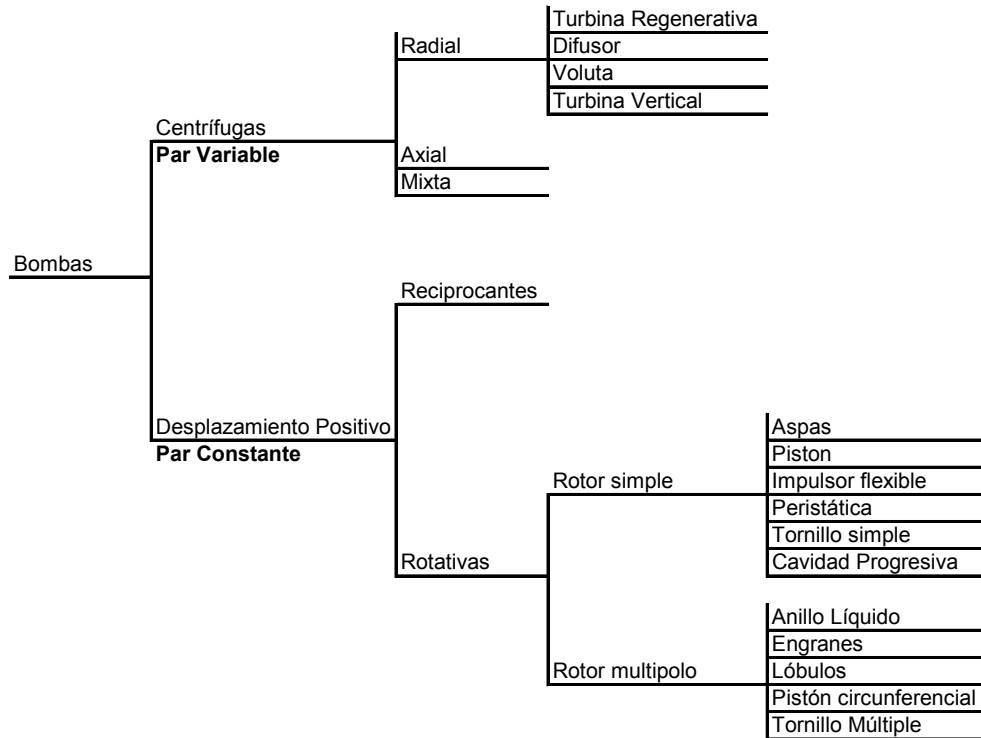
En las cargas de impacto tales las máquinas que cuentan con embragues de operación cíclica o las prensas de estampado de lámina, el Par es intermitente y no es función de la velocidad.

En el caso de las prensas se requiere que la combinación del motor y el VFD produzcan un par suficiente de aceleración para regresar el volante de inercia a la velocidad requerida antes de que inicie el siguiente ciclo.

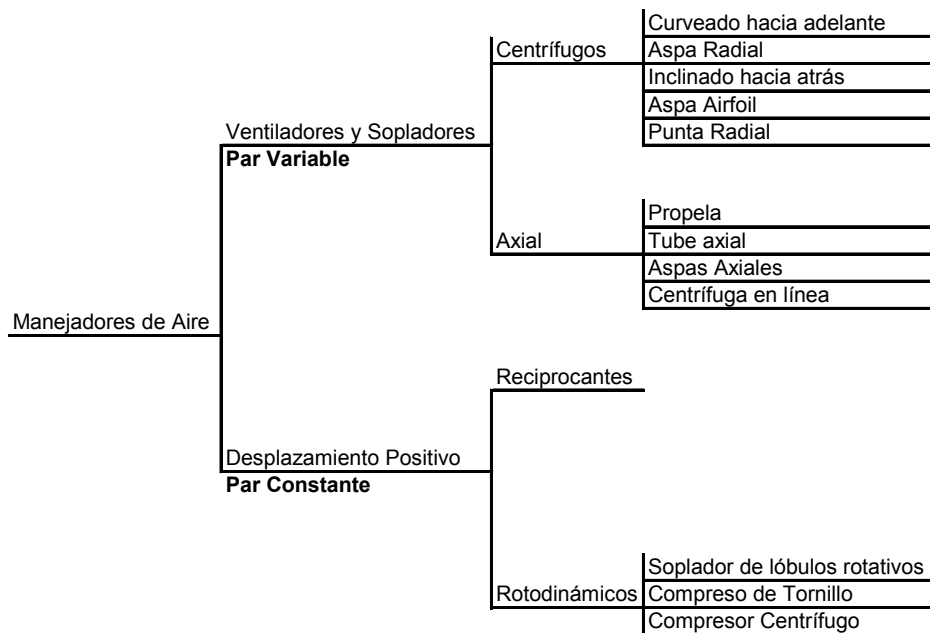


Comportamiento de Cargas de Impacto

Clasificación de Bombas



Clasificación de Manejadores de Aire



4.1 CONTROL DE FLUJO EN VENTILADORES

Los motores son los dispositivos mas ampliamente utilizados para convertir la energía eléctrica en alguna otra forma útil, representando el 70% del consumo total.

Una gran parte de ésta energía se aplica a motores de inducción para accionar bombas, sopladores y ventiladores, considerándose que el 50% de los motores en uso están destinados a este tipo de cargas

Las bombas y ventiladores son calculados para cubrir los requerimientos máximos de la carga, sin embargo, es común que el sistema demande una amplia gama de puntos de operación, hasta fracciones de los parámetros de diseño

Elementos como válvulas reguladoras o compuertas son ampliamente utilizados en ventiladores y bombas para adecuarse a estas necesidades y aunque son confiables y simples afectan severamente la eficiencia del sistema.

El continuo desarrollo de variadores de velocidad plantea una alternativa más eficiente para el control de flujo, permitiendo aprovechar los accionamientos existentes.

El ventilador mas comúnmente empleado, es el tipo centrífugo, el cual imparte la energía al aire por la fuerza centrífuga, incrementando su presión y produciendo un flujo a la salida.

En la Fig.4.1 se muestra la curva presión-flujo para un ventilador centrífugo a una velocidad dada. Las curvas estándar comprenden una familia de éstas para diferentes velocidades e incluyen las eficiencias y requerimientos de potencia.

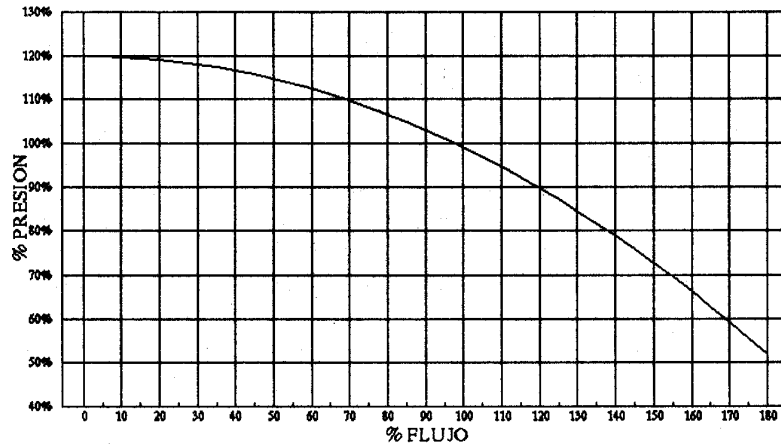


Fig. 4.1.1 Curva del ventilador centrífugo

La curva del sistema representa los requerimientos totales, incluyendo pérdidas y, carga útil, mismas que el ventilador debe vencer para aportar el flujo requerido. Su función se establece como:

$$P = k\phi^2$$

donde :

P: Presión a la carga del ventilador

ϕ : Flujo de aire en el sistema

k: Constante que representa la fricción al flujo del aire

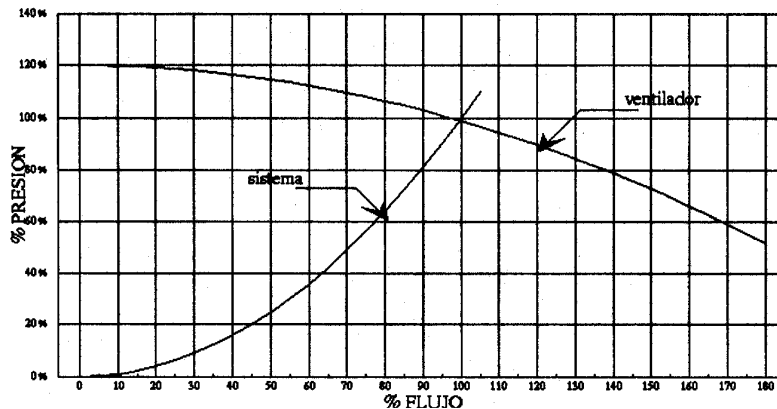


Fig. 4.1.2 Curva del sistema

Esta curva es independiente de la capacidad del ventilador.

La intersección de ambas curvas es el *punto natural de operación* en el que se define la presión y el flujo que el ventilador proporcionará cuando se conecte al sistema.

4.2 METODOS DE REGULACION

Para poder alcanzar los diferentes puntos de operación requeridos por el sistema, se emplean básicamente tres métodos para modular el flujo:

- Compuertas en la descarga
- Aletas regulables en la entrada
- Accionamientos de velocidad variable

4.2.1 Compuertas en la descarga

Con este dispositivo la regulación se obtiene variando la apertura de las persianas', lo cual provoca que se incremento la resistencia de] aire, afectándose la constante "k" del sistema y por lo tanto su curva de operación, tal como se muestra en la Fig. 4.2.1.

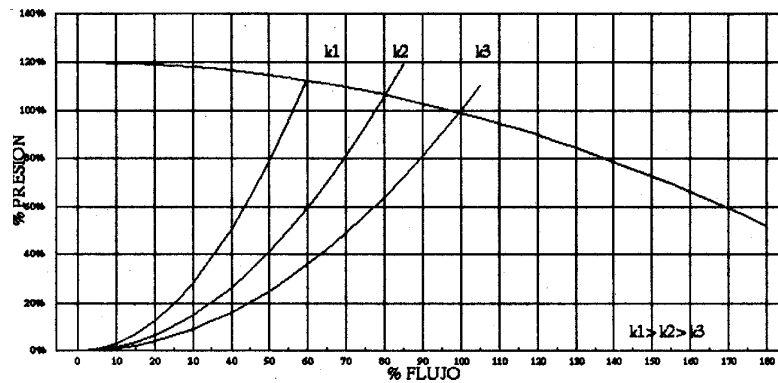


Fig.4.2.1 Curvas del sistema para diferentes posiciones de las compuertas

Este arreglo permite obtener diferentes puntos de operación, destacándose que la reducción en el flujo está acompañada de un incremento en la presión. Así mismo, los requerimientos de potencia decrecen gradualmente con la disminución del flujo como se observa en la Fig. 4.2.2.

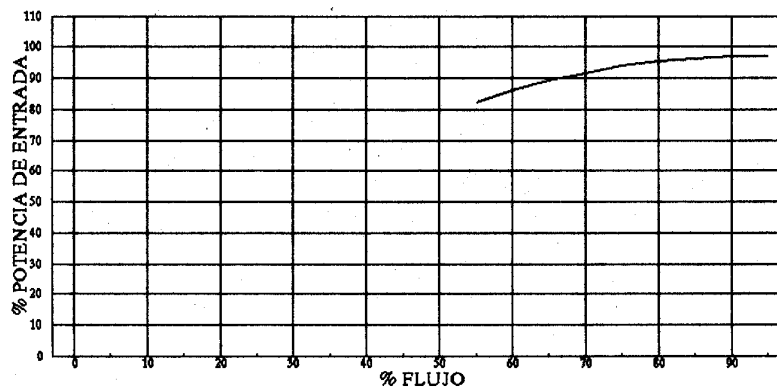


Fig. 4.2.2 Requerimientos de potencia con compuertas a la descarga

4.2.2 Aletas regulables en la entrada

En este método se regula la posición de las aletas ubicadas en la succión, mortificándose la curva de] ventilador de forma tal que intercepta la curva del sistema en diferentes puntos, tal como se indica en la Fig.4.2.3.

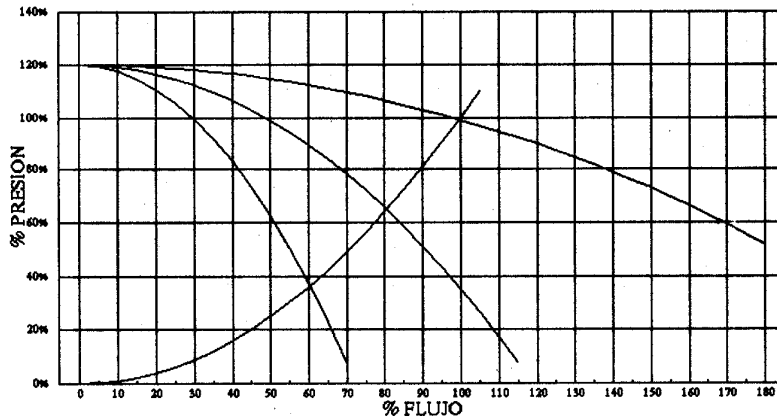


Fig.4.2.3 Curvas del ventilador para diferentes posiciones de las aletas

La disminución en el flujo conlleva a una reducción en la presión, requiriéndose de menor potencia para el mismo caudal que con relación al método anterior, como lo demuestra la Fig. 3.2.3.

4.2.3 Accionamientos de velocidad variable

Con este método se aprovecha el cambio en la curva del ventilador conforme se varía su velocidad, cuyo comportamiento se define por las leyes de afinidad

$$Q_2 = (N_2/N_1) \times Q_1$$

$$P_2 = (N_2/N_1)^2 \times P_1$$

$$HP_2 = (N_2/N_1)^3 \times HP_1$$

Consiguiendo que el ventilador siga de una manera muy cercana a la curva del sistema, cuando se varía su velocidad.

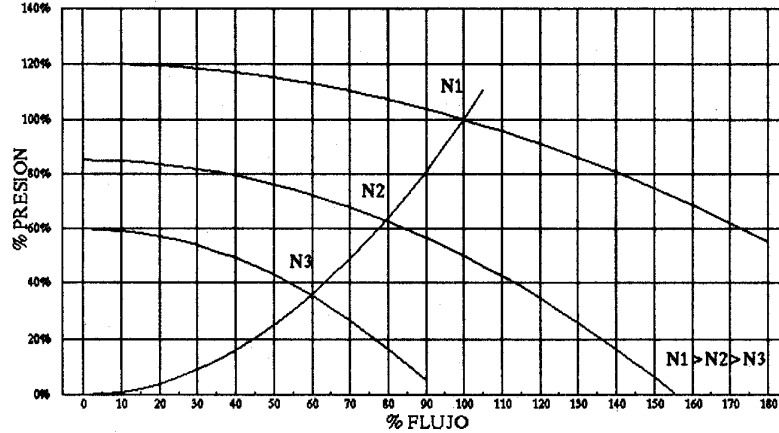


Fig. 4.2.3.1 Curvas del ventilador accionado por un variador de velocidad

Con este método se mejora la eficiencia, obteniéndose el resultado deseado con la mínima potencia de entrada.

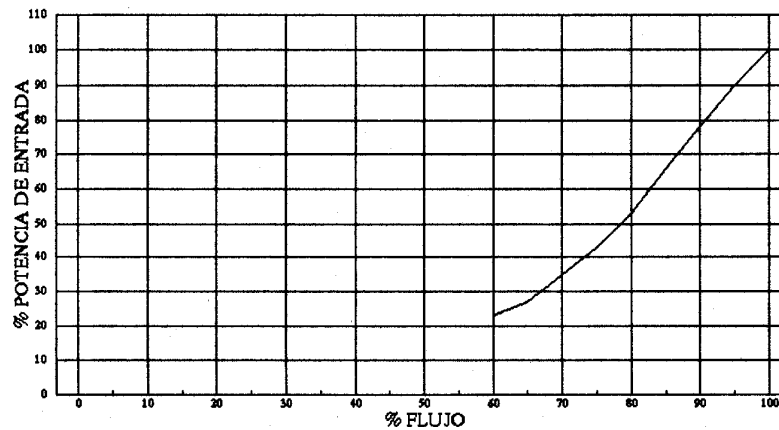
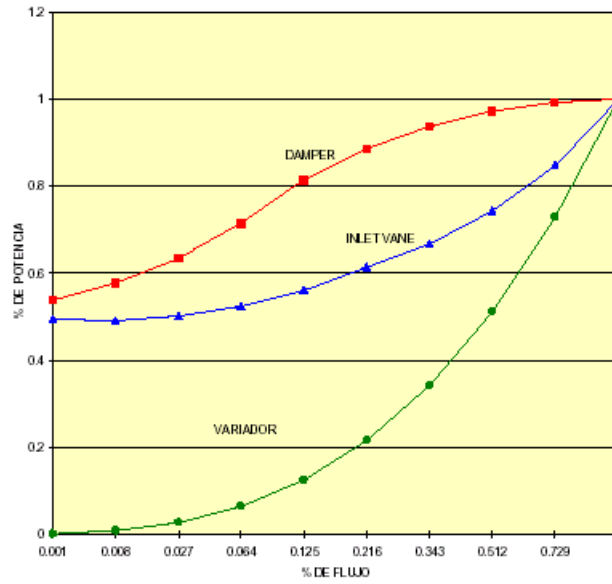


Fig. 4.2.3.2 Requerimientos de potencia con variador de velocidad

Comparación de potencia entre los tres métodos



4.3. AHORRO DE ENERGIA

Para cuantificar el ahorro de energía y los beneficios económicos que se obtienen al utilizar un variador de velocidad se comparan los requerimientos de potencia contra el método de compuertas en la descarga ante un perfil de carga dado.

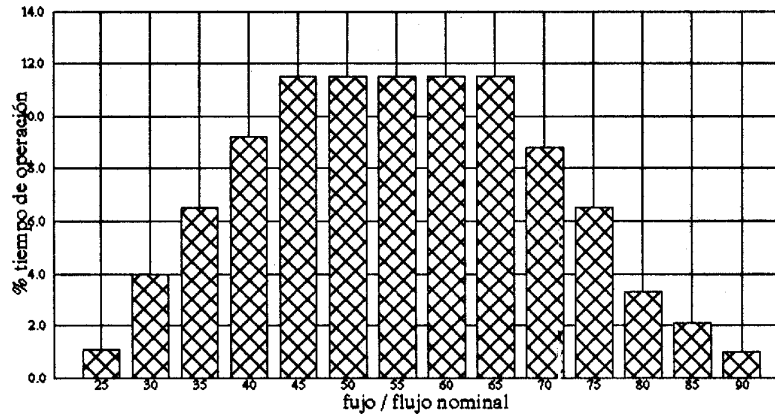


Fig. 4.3 Perfil de carga de un sistema

Esta evaluación se realizó a un ventilador centrífugo cuyos valores nominales de flujo son 100,000 cfm operando a 300 rpm.

Para determinar la potencia requerida en el caso de las persianas de descarga se utilizan las curvas del fabricante y las leyes de afinidad para el variador de velocidad.

La energía consumida y los costos de operación se obtienen considerando:

Horas de operación /mes: 624

\$/ kWh 0.70

	Persianas en descarga	Variador de velocidad	Diferencia
Potencia promedio kW	19.73	5.35	14.38
Energía anual kWh	147,736	40,085	107,652
Costo anual Energía	103,415	28,059	75,356

Para aplicaciones específicas los beneficios dependerán de los perfiles de carga, costos de energía, horas de operación y eficiencias.