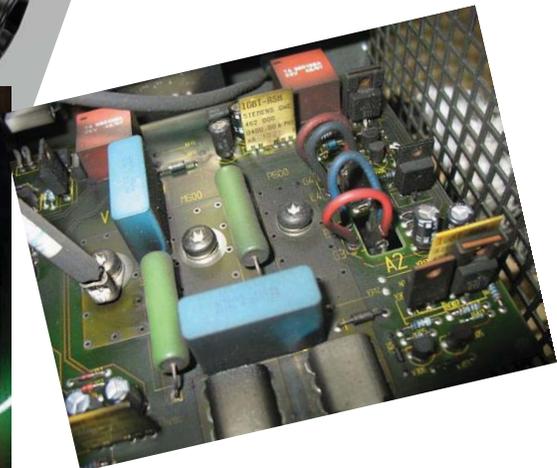
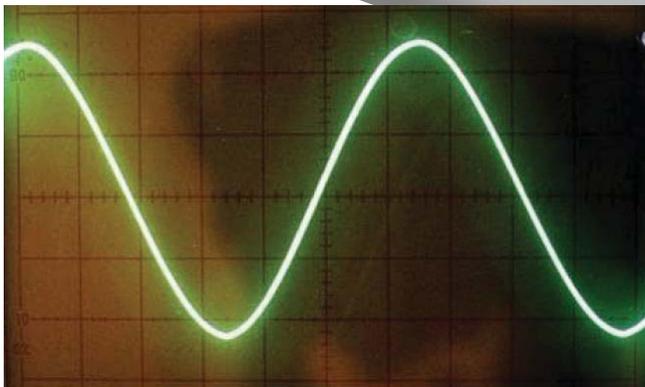




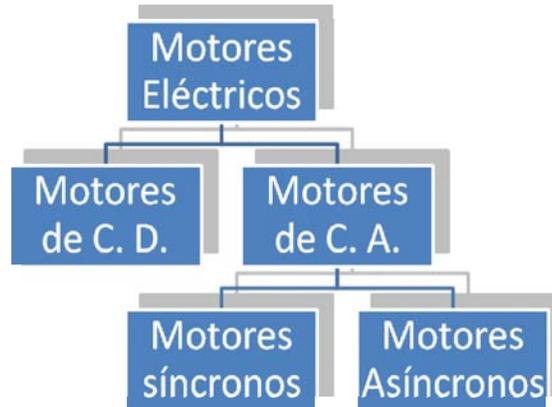
CAPÍTULO 2

Antecedentes



En esta sección hablaremos del tipo de motor en el cual nos centraremos en nuestro estudio y de las características y principios del variador de frecuencia. Primeramente hablaremos de los motores y de por qué podemos ahorrar energía variando su frecuencia de alimentación, después hablaremos de forma general como funciona un convertidor de frecuencia y cuáles son las propiedades de las que nos valemos para el ahorro, y por último explicaremos su instalación de forma básica.

Empecemos haciendo una clasificación de los motores muy generalizada de la siguiente forma:



En nuestro estudio nos vamos a concentrar en los motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla, ya que son los más utilizados en la industria y, además, son los que normalmente pueden ser controlados por variadores de frecuencia.

El primer motor eléctrico, una unidad de corriente continua, fue construido en 1833. La regulación de velocidad de este motor es simple y realiza las exigencias de muchos usos diferentes y sistemas.

El motor de corriente alterna fue diseñado en 1882. Más simple y robusto que el motor de corriente continua, la unidad de corriente alterna de tres fases trabajaba a velocidad fija, por lo cual, por muchos años, los motores de corriente alterna tenían una aplicación limitada.

Los motores de corriente alterna son convertidores de energía electromagnéticos, convirtiendo la energía eléctrica en la energía mecánica (la operación de motor) y viceversa (operación como generador) mediante la inducción electromagnética.

En nuestro estudio nos vamos a concentrar en los motores trifásicos asíncronos tipo jaula de ardilla, ya que son los más comúnmente utilizados en la industria y además son los que normalmente pueden ser controlados por variadores de frecuencia.

2.1. Motores Asíncronos

Los motores asincrónicos son los más ampliamente utilizados ya que prácticamente no requiere mantenimiento. En términos mecánicos, son prácticamente unidades estándar. Existen varios tipos de motores asíncronos, los cuales trabajan bajo el mismo principio básico. Los dos componentes principales de un motor asíncrono es el estator (elemento fijo) y el rotor (elemento giratorio).

Para conocer a qué tipo de circunstancias nos enfrentamos primero mostraremos las partes de la que se compone un motor tipo jaula de ardilla, como se muestra en la figura 2.1.

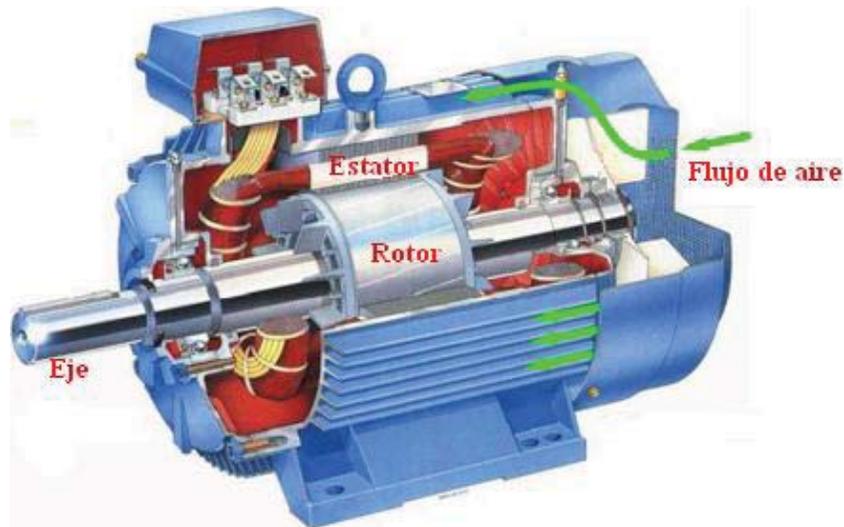
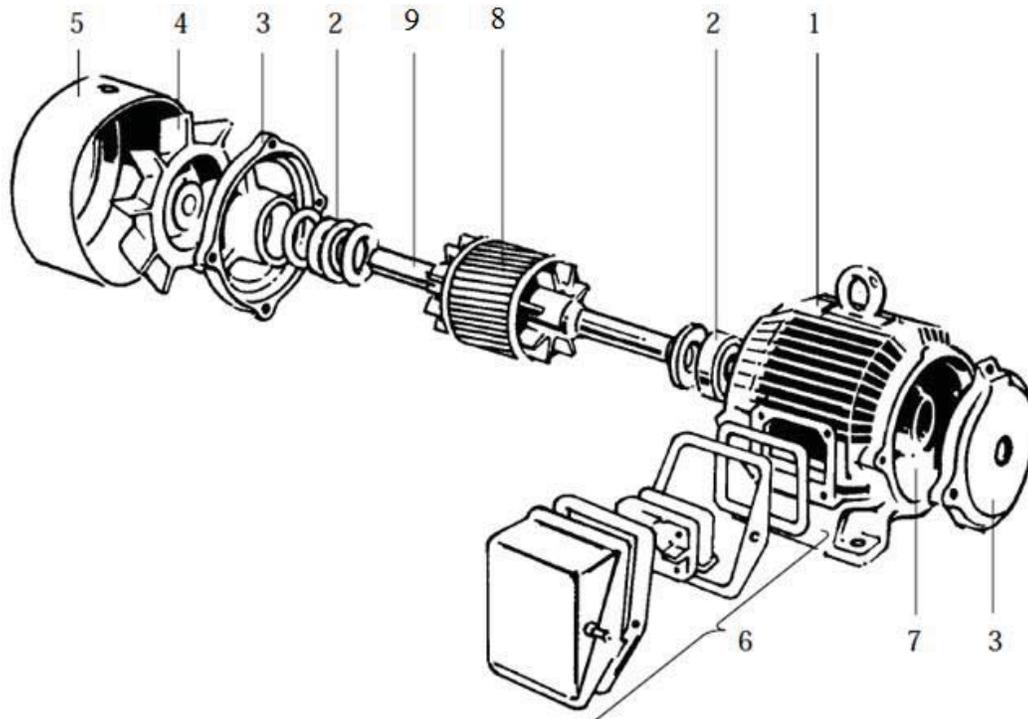


Figura 2.1 Corte de un motor tipo jaula de ardilla.

En general, podemos decir que todos los motores están constituidos por dos partes fundamentales:

Estator: Va unido a la carcasa y está constituido por devanados fijos.

Rotor: Parte móvil de la máquina constituida igualmente por un devanado, pero que a diferencia del estator, se encuentra alojados en un eje o flecha que puede girar.



Fuente: Danfoss Industries. Facts worth know

Figura 2.2 Partes que componen a un motor.

En la figura 2.2 se ilustran las partes de un motor de inducción trifásico:

1. Carcasa
2. Rodamientos

3. Bloque de rodamientos
4. Ventilador
5. Cubierta
6. Caja de conexiones eléctricas
7. Núcleo de hierro
8. Rotor
9. Eje, flecha o soporte del motor

2.2. Funcionamiento del motor de inducción trifásico

Al aplicar una tensión eléctrica al estator circula corriente por sus embobinados, esta corriente produce un campo magnético B_s , el cual gira en el sentido contrario a las manecillas del reloj. La velocidad de giro del campo magnético se expresa por:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{p} \quad 2.01$$

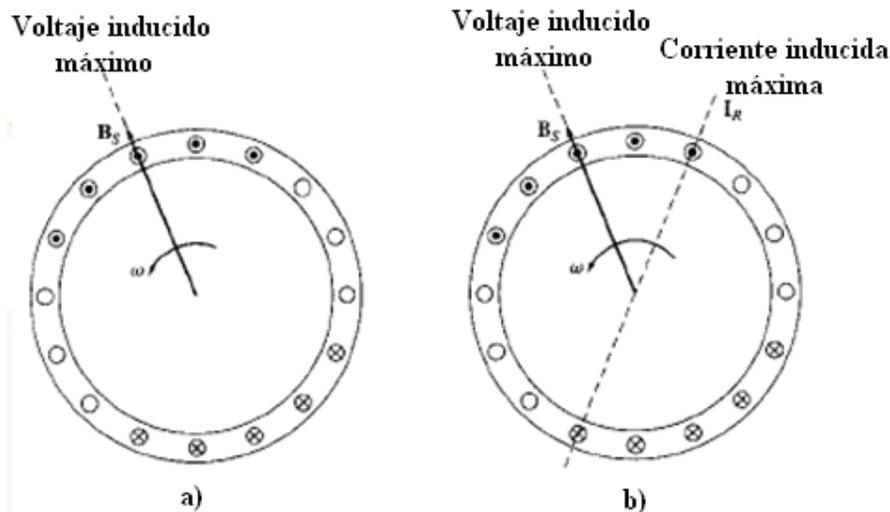
En donde f_e es la frecuencia en Hertz, y p es el número de polos de la máquina. El campo magnético B_s , al pasar por las barras del rotor induce una fuerza electromotriz en cada una de ellas igual a:

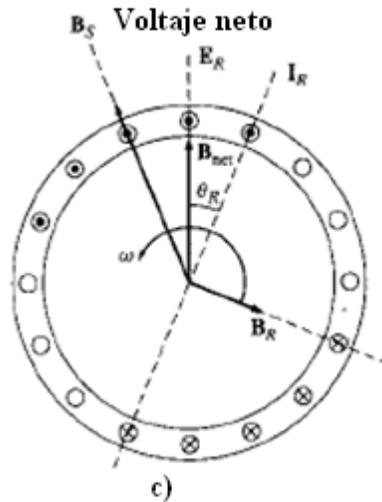
$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad 2.02$$

Donde:

- v = velocidad de las barras del rotor con relación al campo magnético.
- B = densidad del flujo magnético del estator.
- l = longitud de la barra del rotor.

La velocidad de las barras superiores del rotor, con relación al campo magnético es hacia la derecha, en tal forma de que la tensión inducida en las barras superiores estará hacia afuera de la página, en tanto que la tensión inducida en las varillas inferiores estará por el interior de la página. Esto determina un flujo de corriente hacia afuera de las barras superiores y hacia adentro de las barras inferiores. Sin embargo, como el conjunto del rotor es inductivo, su corriente pico se atrasa con relación a la tensión pico (véase la figura 2.3).





Fuente: Mataix, Claudio, Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas

Figura 2.3 Desarrollo del par inducido en el motor de inducción a) El campo rotacional del estator B_s induce un voltaje en las barras del rotor; b) el voltaje del rotor produce un flujo de corriente en el rotor que atrasa el voltaje debido a la inducción del mismo; c) la corriente del rotor produce un campo magnético en el rotor B_R que esta 90° detrás de ella, y B_R interactúa con B_{net} para producir un par en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Por último, el momento de torsión inducido en la máquina se expresa por:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s \tag{2.03}$$

Donde:

- τ_{ind} = Momento de torsión.
- B_R = Campo magnético en el rotor.
- B_s = Campo magnético en el estator.
- k = Constante de proporcionalidad.

El momento resultante es contrario al sentido de las manecillas del reloj, por lo cual el rotor se acelera en esa dirección.

La velocidad tiene un límite superior finito, si el rotor del motor de inducción girara a velocidad síncrona, entonces sus barras permanecerían estacionarias con relación al campo magnético y no habría tensión inducida. Si fuera igual a 0, entonces no habría ni corriente ni campo magnético en el rotor. Sin el campo magnético en éste, el momento de torsión sería nulo y el rotor se frenaría como consecuencia de las pérdidas por fricción. Un motor de inducción puede, en esta forma, acercarse a la velocidad síncrona, pero jamás podrá alcanzar exactamente dicha velocidad, a la diferencia entre la velocidad síncrona y la del rotor se le conoce como velocidad relativa o de deslizamiento (ecuación 2.04).

$$n_{desliz} = n_{sinc} - n_m \tag{2.04}$$

En donde:

- n_{desliz} = velocidad de deslizamiento de la máquina.
- n_s = velocidad del campo magnético.
- n_m = velocidad angular del eje del rotor.

Y a la relación entre la velocidad de deslizamiento y la velocidad síncrona se le denomina el deslizamiento (ec. 2.05 y 2.06).

$$s = \frac{n_{desliz}}{n_{sinc}} \times 100\% \quad 2.05$$

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100\% \quad 2.06$$

El deslizamiento (s) también puede expresarse en términos de la velocidad angular como:

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} \times 100\% \quad 2.07$$

Obsérvese que si el rotor gira a velocidad síncrona, $s = 0$, mientras que si el rotor esta fijo, $s = 1$. Todas las velocidades normales del motor están entre estos dos límites

Un motor de inducción trabaja bajo el mismo principio de los transformadores, siendo el estator el equivalente al primario y el rotor al secundario; pero, a diferencia del transformador, la frecuencia de la tensión en el secundario no es la misma que la del primario.

Si el rotor de un motor está bloqueado de modo que no pueda moverse, la tensión en el rotor tendrá la misma frecuencia que la del estator. Por el contrario, si el rotor gira a velocidad síncrona, la frecuencia de la tensión en el rotor será cero.

Para cualquier velocidad intermedia, la frecuencia de la tensión en el rotor será directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético n_{sinc} y la velocidad del rotor n_m . Puesto que el deslizamiento está definido como:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad 2.08$$

La frecuencia del rotor puede ser expresada como:

$$f_r = s f_e \quad 2.09$$

Existen varias alternativas útiles de esta expresión. Unas de las expresiones más comunes se obtiene sustituyendo la ecuación 2.08 del deslizamiento en la ecuación 2.9.

$$f_r = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} f_e \quad 2.10$$

Pero, $n_{sinc} = 120f_e/p$ (de la ecuación 2.01) tal que:

$$f_r = \frac{p}{120} (n_{sinc} - n_m) \quad 2.11$$

De las ecuaciones 2.10 y 2.11 se obtiene la expresión para la velocidad del motor n_m , ec. 2.12:

$$n_m = \frac{120f_e}{p} s \quad 2.12$$

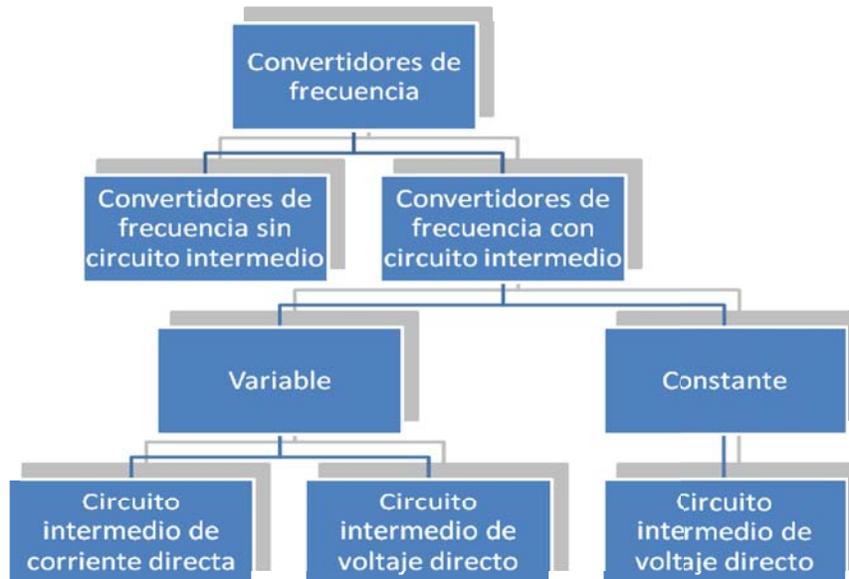
De esta ecuación observamos que, para cambiar la velocidad del rotor, podemos hacerlo ya sea modificando el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia de alimentación, de estas tres opciones, la más factible es la tercera; es decir, modificando la frecuencia de alimentación.

2.3. ¿Qué es un variador de frecuencia?

Un variador de frecuencia (VFD, del inglés: Variable Frequency Drive, o bien AFD, Adjustable Frequency Drive, es una unidad que proporciona infinitamente el control variable de la velocidad de motores de corriente alterna de tres fases, convirtiendo el voltaje y la frecuencia fijos de la red eléctrica en cantidades variables. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de CA, microdrivers, convertidores o inversores.

La mayoría enorme de los convertidores de frecuencia estáticos usados por la industria hoy para controlar o regular la velocidad de motores de corriente alterna de tres fases es diseñada según dos principios diferentes (figura 2.4):

- convertidores de frecuencia sin un circuito intermedio (también conocido como convertidores directos), y
- convertidores de frecuencia con un circuito variable o constante intermedio.



Fuente: Danfoss® Industries. Facts worth know
 Figura 2.4 Principio de los convertidores de frecuencia.

Los convertidores de frecuencia con un circuito intermedio tienen circuito intermedio de corriente continua o una corriente de intermedio de voltaje directo y son llamados inversores alimentados por corriente o inversores alimentados por voltaje.

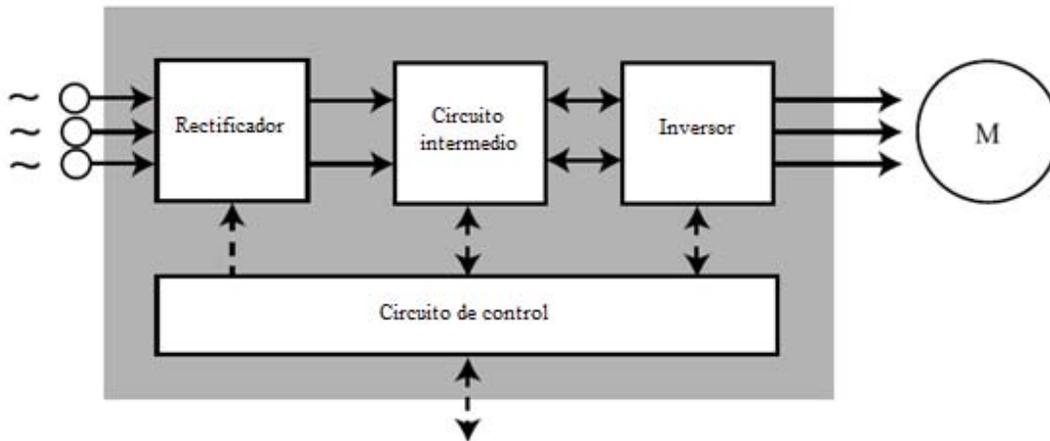
Inversores de circuito intermedios ofrecen un número de ventajas sobre el inversor directo, como:

- Mejor control sobre la corriente reactiva.
- Reducción de armónicas.
- No tiene limitaciones en lo que respecta a la frecuencia de salida, en comparación al rango aceptado por los motores convencionales.

Inversores directos tienden a ser ligeramente más baratos que inversores de circuito intermedios, aunque ellos típicamente sufran de la reducción más pobre de armonía.

En este trabajo nos enfocaremos a un tipo de variador en específico, en el que cuenta con circuito intermedio de voltaje de DC, ya que bajo este principio se encuentra diseñado el variador utilizado para el estudio del ahorro de energía.

Los convertidores de frecuencia se pueden dividir en cuatro componentes principalmente (figura 2.5):

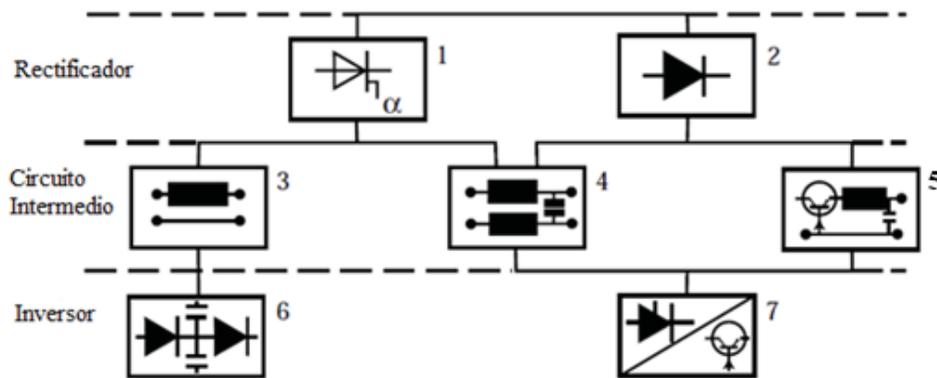


Fuente: Danfoss® Industries. Facts worth know

Figura 2.5 Componentes de un convertidor de frecuencia.

1. El rectificador, que es conectado a la red eléctrica de corriente alterna, suministra y genera un voltaje de corriente continua que pulsa. Hay dos tipos básicos de rectificadores - controlados y no controlados.
2. El circuito intermedio. Hay tres tipos:
 - a. Uno que convierte el voltaje rectificado en una corriente continua.
 - b. Otro que estabiliza o alisa el voltaje pulsante de DC y lo pone a disposición del inversor.
 - c. Tercero; que convierte el voltaje de DC constante del rectificador, a un voltaje de CA variable.
3. El inversor que genera la frecuencia del voltaje de motor. O bien, algunos inversores también pueden convertir el voltaje de corriente continua constante en un voltaje de corriente alterna variable.
4. La electrónica del circuito de control transmite y recibe señales del rectificador, el circuito intermedio y el inversor. Lo que todos los convertidores de frecuencia tienen en común es que el circuito de control manda las señales encender o apagar los semiconductores del inversor. Los convertidores de frecuencia son divididos según el modelo de conmutación que controla el voltaje de suministro al motor.

En la figura 2.6, se muestra los diferentes diseños/principios de control:



Fuente: Danfoss® Industries. Facts worth know

Figura 2.6 Diferentes diseños/principios de control.

Inversor de corriente fuente: CSI
(1 + 3 + 6)

Convertidor modulado por amplitud de pulso: PAM
(1 + 4 + 7) (2 + 5 + 7)

Convertidor modulado por ancho de pulso: PWM
(2 + 4 + 7)

El funcionamiento del variador de frecuencia con circuito intermedio es el siguiente:

1. Rectificador. Este convierte la alimentación de alterna en directa, puede estar compuesto por diodos, tiristores o ambos. Un rectificador que consiste en diodos no está controlado, el que consiste en tiristores es controlado. Si ambos se utilizan (diodos y tiristores), el rectificador está semi-controlado.
2. Circuito intermedio. El circuito intermedio puede verse como una instalación de almacenamiento de la cual el motor es capaz de extraer su energía a través del inversor. Puede ser construido de acuerdo a tres principios diferentes en función del rectificador y el inversor.
3. Inversor. El inversor es el último eslabón en el convertidor de frecuencia antes del motor y el punto donde la adaptación final de la salida de tensión se produce. El convertidor de frecuencia garantiza unas buenas condiciones de funcionamiento en todo el rango de control mediante la adaptación de la tensión de salida a las condiciones de carga. Así, es posible mantener la magnetización del motor en el valor óptimo

En el mercado actual podemos encontrar diferentes marcas comercializadoras de convertidores de frecuencia, por ejemplo, ABB, LG, Yaskawa, Siemens, Telemecanique, Mitsubishi, Danfoss, etc., véase la figura 2.7.



LG



Yaskawa



Danfoss



Mitsubishi

Figura 2.7 Diferentes marcas de variadores de frecuencia.

Algunas marcas manejan sus convertidores de forma genérica, y otros los enfocan a ciertos tipos de aplicaciones

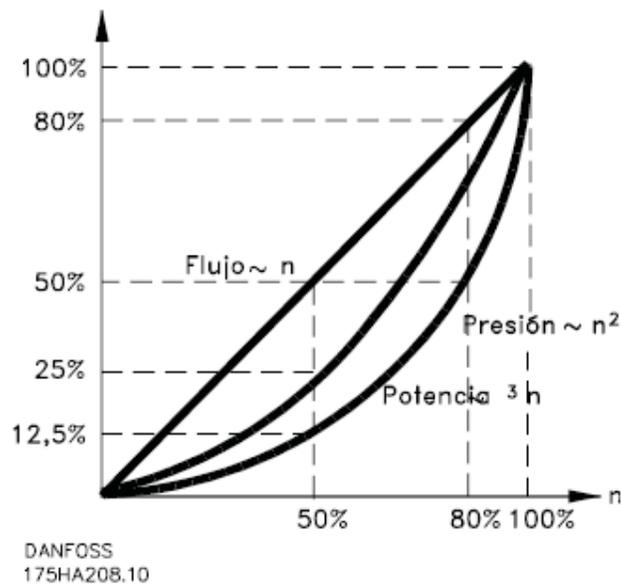
2.4. ¿Cómo ayuda a ahorrar energía?

Los variadores de frecuencia sacan partido de las leyes de afinidad⁷ para lograr la principal ventaja del uso de variadores que es el ahorro de energía eléctrica. Si se compara con sistemas de control y tecnologías alternativos, un variador de frecuencia es el sistema de control de energía óptimo para controlar sistemas de ventiladores y bombas.

Como muestra la figura 2.8 (Las leyes de Afinidad, o más comúnmente conocidas como leyes de los ventiladores y/o bombas), el caudal se controla cambiando la velocidad. Al reducir ésta solo un 20% respecto a la velocidad nominal, el caudal también se reduce en un 20%. Esto se debe a que el caudal es directamente proporcional a la velocidad. El consumo eléctrico, sin embargo, se reduce en un 50%.

Si el sistema en cuestión sólo tiene que suministrar un caudal correspondiente al 100% durante unos días al año, mientras que el promedio es inferior al 80% del caudal nominal para el resto del año, el ahorro de energía es incluso superior al 50%.

⁷ Para mayor información consultar el apéndice B.



Fuente: Danfoss®, “Guía de diseño VLT® HVAC”.
Figura 2.8 Gráfica de las leyes de Afinidad.

Las Leyes que describen este comportamiento son:

$$Q: \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad 2.13$$

$$H: \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad 2.14$$

$$P: \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad 2.15$$

Las leyes de Afinidad

Q = Caudal

P = Potencia

Q_1 = Caudal nominal

P_1 = Potencia nominal

Q_2 = Caudal reducido

P_2 = Potencia reducida

H = Presión

n = Velocidad

H_1 = Presión nominal

n_1 = Velocidad nominal

H_2 = Presión reducida

n_2 = Velocidad reducida

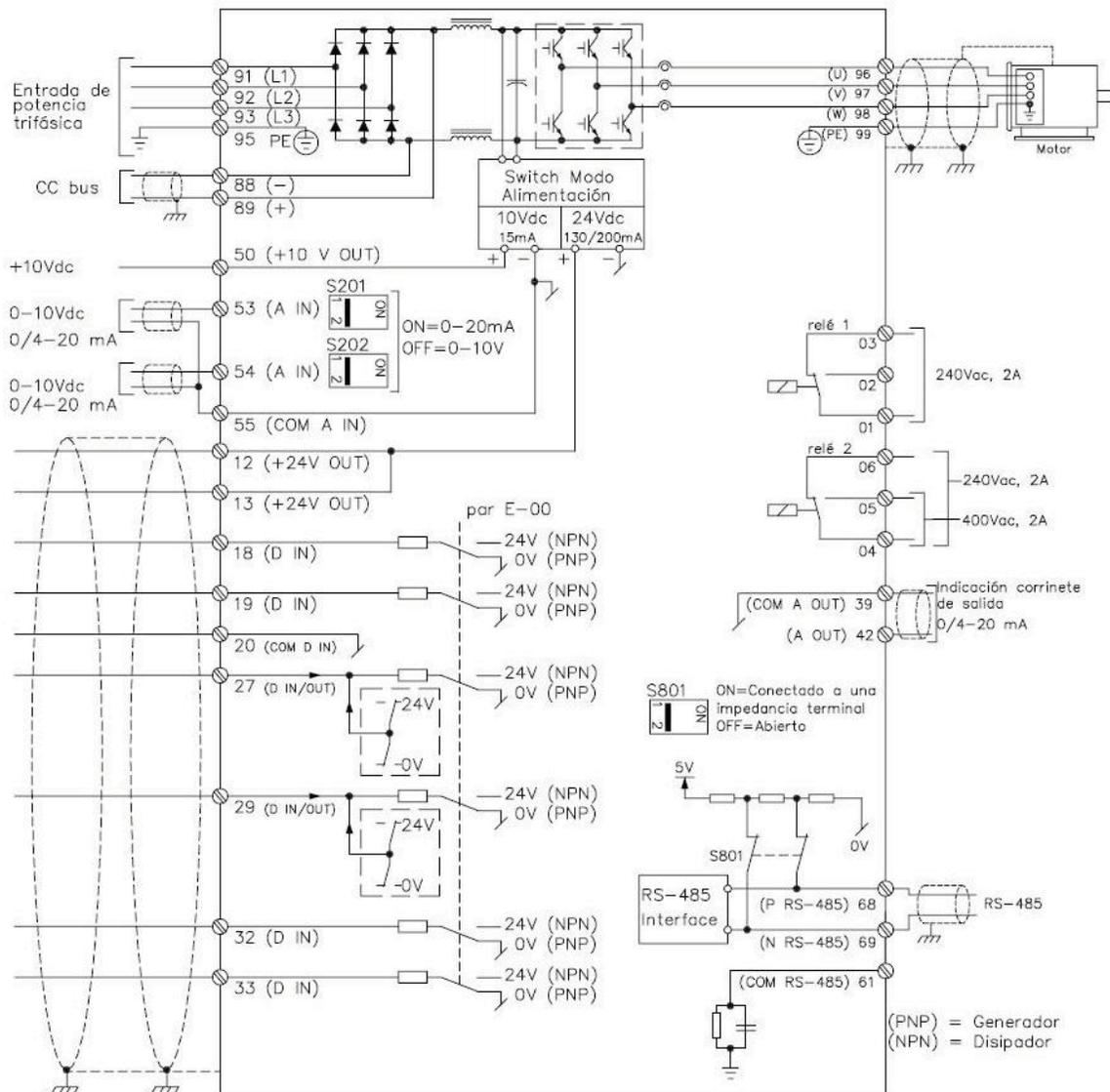
Las ecuaciones anteriores, que son una parte de las leyes de afinidad⁸, nos muestran la relación que se mantiene entre las diferentes variables del sistema y la velocidad del motor. Se puede observar que mientras la relación de velocidades del sistema es proporcional al flujo, esto quiere decir que si incrementamos la velocidad incrementamos el flujo, contrariamente, si disminuimos la velocidad, disminuye el flujo. Por otro lado está la presión del sistema que mantiene una relación cuadrática con la velocidad, y al final y una de las más importantes para nuestro estudio, la relación de potencia, siendo cubica, cuando requerimos un menor flujo, la potencia disminuye considerablemente, obteniendo de esa forma el ahorro de energía.

⁸ Para mayor información consultar el apéndice B.

Como se puede apreciar, modificando la velocidad cambian los valores de presión y potencia; en el caso de una reducción de la velocidad al 50%, se observa que el flujo se reduce en la misma proporción, la presión cae al 25%, pero la potencia consumida es solo del 12.5%, lo cual significa un ahorro amplio de energía. La aplicación de los convertidores de frecuencia se justifica, entonces, en el control de procesos variables en el tiempo.

2.5. Instalación.

La instalación básica de todos los convertidores de frecuencia, es esencialmente la misma, en este caso mostraremos la instalación general de un variador de frecuencia Danfoss®, pero aplica en general para cualquier convertidor, salvo la nomenclatura de sus bornes y la funcionalidad de los mismos.



Fuente: Danfoss®, "Guía de diseño VLT® HVAC".

Figura 2.8 Diagrama del VLT® Danfoss®.

En principio todos los convertidores de frecuencia cuentan con:

- Tensión de alimentación y tierra.
- Salida de alimentación hacia el motor.
- Entrada analógica de referencia/retroalimentación.
- Entrada de comando arranque/paro.

En la figura 2.8 se muestra el diagrama de conexiones del VLT Danfoss[®], observamos que cuenta con 4 entradas digitales (18, 19, 32 y 33), más 2 configurables como entrada o salida (27 y 29), además de contar con dos salidas de 24[V] (12 y 13) y 1 común (20). Por parte de las terminales analógicas contamos con 2 entradas (53 y 54), 2 salidas (39 y 42), 1 salida de 10[V] (50) y 1 común (55).

También se cuentan con dos relevadores (1, 2, 3, 4, 5 y 6), terminales de comunicación para RS485 (61, 68 y 69) y un bus de CC (88 y 89).

Como se mencionó, el VLT cuenta con entradas y salidas, configurables y se pueden asociar a diferentes eventos.

En la instalación se tiene que tener en cuenta varias recomendaciones, sin embargo no es necesario un tipo en particular de montaje, las recomendaciones van en el sentido de proteger al equipo y prolongar su tiempo de vida.

Dichas recomendaciones son:

1. Instalar fusibles de acción ultra rápida antes del variador.
2. Seleccionar un tipo adecuado de protección IP de acuerdo a las condiciones donde va a ser montado.
3. Tener tierra física.
4. Usar cable blindado para las comunicaciones y control.
5. Mantener bien ventilado y libre de polvo.

En la figura 2.9 a) y b) se muestran las fotografías de un VLT para controlar unas manejadoras de aire, como se puede apreciar el variador está montado dentro de un gabinete para su protección.



a)



b)

Figura 2.9 Fotografías de un convertidor de frecuencia instalado.

Como se observa, se trata de proteger lo mejor posible al VLT, y las conexiones se realizan por medio de las clemas que se encuentran enumeradas, que corresponden a las vistas anteriormente en el esquema de la figura 2.8.