



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## ***AHORRO DE ENERGÍA EMPLEANDO VARIADORES PARA EL CONTROL DE MOTORES***

*Tesis para obtener el título de Ing. Eléctrico-Electrónico.*

***PRESENTA:***

*Roberto Guzmán Gutiérrez*

*Edgar Vázquez Orduña*

*Director de tesis:*

*Ing. David Vázquez Ortiz.*





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

A nuestra familia, por ser nuestro sustento y principal fuente de enseñanza.

A la UNAM, por todo aquello que nos brindó para forjar nuestra profesión.

A todos aquellos que compartieron con nosotros este gran proyecto. Esta obra es el resultado de su apoyo, cariño y compañía.

# Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 1: La energía eléctrica y las consecuencias de su uso. ....</b>	<b>6</b>
1.1. La generación de energía eléctrica.....	7
1.1.1. Fuentes de energía no convencionales.....	7
1.1.2. Fuentes de energía convencionales.....	8
1.2. Efectos de la generación de energía eléctrica.....	13
1.3. Uso eficiente y ahorro de la energía eléctrica.....	17
1.3.1. Reducción y control de la demanda.....	18
1.3.2. Utilización de energías renovables.....	19
1.3.3. Optimización de la tarifa eléctrica a la situación actual.....	20
1.3.4. Optimización de las instalaciones y uso de equipos más eficientes.....	21
1.3.5. Programas de información y concientización.....	22
<b>Capítulo 2: Antecedentes.....</b>	<b>23</b>
2.1. Motores asíncronos.....	24
2.2. Funcionamiento del motor de inducción trifásico.....	26
2.3. ¿Qué es un variador de frecuencia? .....	29
2.4. ¿Cómo ayuda a ahorrar energía? .....	32
2.5. Instalación.....	34
<b>Capítulo 3: Análisis de un proyecto de aire acondicionado.....</b>	<b>37</b>
3.1 Introducción. Conceptos básicos de aire acondicionado.....	39
3.1.1 Volumen de aire constante (VAC).....	40
3.1.2 Volumen de aire variable (VAV).....	41
3.2 Definición del proyecto.....	42
3.3 Evaluación de beneficios y viabilidad.....	47
3.3.1 Costo.....	48
3.3.2 Controlador de lazo cerrado (PID).....	49
3.3.3 Control local (Hand On) y remoto (Auto On).....	50
3.3.4 Arranque del motor.....	50
3.3.5 Pre calentamiento del motor.....	51
3.3.6 Arranque suave del motor.....	51
3.3.7 Permiso de arranque.....	51
3.3.8 Re-arranque automático.....	51
3.3.9 Optimización automática de la energía (AEO).....	51
3.3.10 Compensación de factor de potencia ( $\cos \phi$ ).....	52
3.3.11 Corte en la alimentación.....	52
3.3.12 Cortocircuito (Fase del motor- Fase).....	52
3.3.13 Filtros de salida.....	52
3.3.14 Bypass de frecuencia.....	53
3.3.15 Sistema de medición.....	53
3.3.16 Modo de reposo.....	53

3.3.17	Reloj de tiempo real.....	53
3.3.18	Mantenimiento preventivo.....	53
3.4	Características y requerimientos.....	53
3.4.1	Reducción de la potencia debido a la temperatura ambiente.....	53
3.4.2	Reducción de la potencia debido a funcionamiento a velocidades bajas.....	54
3.4.3	Reducción de la potencia debido a la baja presión atmosférica.....	54
3.4.4	Reducción de potencia por la instalación de cables de motor largos o de mayor sección.....	54
3.4.5	Criterios generales de selección.....	54
3.5	Análisis financiero: Costo/Beneficio.....	55
<b>Capítulo 4: Análisis de un proyecto de bombas centrífugas.....</b>		<b>64</b>
4.1.	Conceptos y definiciones básicas.....	65
4.2.	Definición del proyecto.....	68
4.3.	Evaluación de beneficios.....	69
4.3.1	Control multizona.....	70
4.3.2	Sin flujo.....	70
4.3.3	Bomba seca.....	70
4.3.4	Comunicación de campo.....	70
4.4.	Características y requerimientos.....	70
4.5.	Análisis financiero: Costo/Beneficio.....	71
<b>Conclusiones.....</b>		<b>77</b>
<b>Apéndice A: Electrónica del variador de frecuencia.....</b>		<b>82</b>
<b>Apéndice B: Leyes de afinidad.....</b>		<b>91</b>
<b>Apéndice C: Hoja de datos técnicos del variador de frecuencia.....</b>		<b>95</b>
<b>Referencias</b>		

# **Introducción**

Desde que Nikola Tesla inventó el generador polifásico de corriente alterna en 1882, no ha cesado el desarrollo de la tecnología para la distribución y uso de la energía eléctrica, junto a la construcción de grandes y variadas centrales eléctricas, se han construido sofisticadas redes de transporte y sistemas de distribución, para llevarla hasta los más apartados rincones del planeta. La energía eléctrica se ha convertido en un factor determinante para la evolución de todos los países. Sin energía no pueden desarrollarse ni crecer la industria y el comercio, tampoco es posible el desarrollo social. La energía segura y económica de hoy nos permite acceder a una mejor calidad de vida.

Por otro lado, la producción y la forma como se usa la energía eléctrica generan repercusiones ambientales en gran escala que amenazan el desarrollo futuro. La falta de conciencia acerca de estas repercusiones ha facilitado, por un lado, actividades humanas, comerciales e industriales de consumo intensivo e ineficiente de energía y, por el otro, el crecimiento desordenado de las ciudades que son verdaderas máquinas de consumo de energía y de producción de enormes cantidades de residuos, lo cual compromete seriamente la disponibilidad de ese recurso para las generaciones venideras.

En general, los sistemas de generación de energía eléctrica se diferencian entre sí dependiendo de la fuente primaria de energía utilizada; las centrales generadoras se clasifican en termoeléctricas, hidroeléctricas, nucleoeeléctricas, eólicas, solares fotovoltaicas y geotermoeléctricas. La mayor parte de la energía eléctrica generada a nivel mundial proviene de los tres primeros tipos de centrales mencionados. Todas estas centrales, excepto las fotovoltaicas, tienen en común el elemento generador, constituido por un alternador, movido mediante una turbina que será distinta dependiendo del tipo de energía primaria utilizada.

Cada vez que utilizamos energía eléctrica producida por la quema de petróleo, carbón o gas (combustibles fósiles) se emiten a la atmósfera gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono) los cuales contribuyen al calentamiento global amenazando gravemente la vida en el planeta. Reducir el consumo de energía o usarla eficientemente se traduce en un ahorro económico institucional, familiar o personal y se contribuye a disminuir las emisiones de los gases de efecto invernadero, principal causa del cambio climático.

La industria junto con el parque vehicular son los principales consumidores de energía y, por tanto, a los que se debe la producción de la mayor parte de los gases de efecto invernadero, es en estos dos campos, especialmente, donde se debe de buscar el ahorro y la eficiencia energética, con lo que se logrará un desarrollo sustentable para bien de la humanidad. Esto es posible llevarlo a cabo con la participación de los gobiernos estatales y federales, las industrias y especialmente la sociedad.

En relación con lo anterior, enfoquemos nuestra atención en el sector industrial. Con la modernización de los procesos industriales se ha tenido, como consecuencia, una mayor utilización de equipo mecánico y eléctrico, como son los motores, con el consiguiente aumento en el consumo de energía eléctrica. Alrededor del 70%<sup>1</sup> de ésta energía es consumida por los motores eléctricos, razón por la cual requieren atención especial cuando se trata el tema de ahorro y uso eficiente de energía. Son incontables los ejemplos de la aplicación de motores en la industria, el comercio, los servicios y el hogar, por lo que los usuarios, en general, deberán tomar las medidas pertinentes para aumentar la eficacia de sus instalaciones y maximizar así su beneficio. Entre estas mediadas podemos mencionar el uso de variadores de frecuencia para el control de los motores.

---

<sup>1</sup> Motores eléctricos, CONUEE, Octubre 2009, basados en la industria.

Otra de las actividades en la que se tiene más consumo y derroche de energía es la climatización de edificios con el fin de proveer confort ambiental, este problema se puede reducir mediante la aplicación de variadores de frecuencia para el control de la manejadora de aire y de los sistemas de bombeo de agua en los sistemas de aire acondicionado, el uso de variadores de frecuencia en este tipo de instalaciones está ligado al control de los motores eléctricos. En la gran mayoría de los casos los proyectos de acondicionamiento de aire se sobredimensionan para hacer frente a cargas térmicas no previstas en el diseño original, esto da lugar a que el consumo de energía eléctrica sea mayor al que realmente se necesita, ya que este tipo de sistemas siempre funcionan al 100% de su capacidad, aun cuando no siempre se tiene una carga térmica total para la cual se haga necesario trabajar al 100%; para controlar esta situación y usar solamente la energía requerida es conveniente la instalación de un dispositivo como el variador de frecuencia el cual controla la velocidad del motor con el consecuente ahorro energético.

Una de las formas de climatizar el aire es por medio de enfriadores (chillers) y torres de enfriamiento, en donde se utilizan bombas de agua, que al ser controladas se puede obtener un ahorro de energía eléctrica.

El presente trabajo tiene por objeto fundamentar el ahorro energético que se logra con la instalación de equipos de control como los variadores de frecuencia.

En el primer capítulo se analiza la generación de la energía eléctrica y el impacto económico y ecológico que trae consigo. Se explican algunas consecuencias ecológicas que conlleva la generación eléctrica; también se exponen algunas medidas para hacer más eficiente el consumo eléctrico, con las que se obtienen beneficios tanto económicos como ecológicos.

El segundo capítulo se concentra en las bases teóricas de los elementos básicos del estudio: Los motores eléctricos y los variadores de frecuencia. Se repasa parte de la teoría básica de motores eléctricos, su constitución y principio de funcionamiento. De igual forma se explica el principio de funcionamiento de los variadores de frecuencia, en este caso de una marca en específico, y cómo es que estos controladores ayudan a ahorrar energía y bajo qué principios.

El tercer capítulo se compone de dos partes. Primero se concentra en explicar el sistema estudiado, su principio de funcionamiento, las características del controlador y las funciones especializadas que resultan útiles para el sistema; la segunda, los cálculos del ahorro energético empleando variadores de frecuencia, estos cálculos se basan en la diferencia entre dos configuraciones del mismo sistema, en este caso para la inyección de aire acondicionado.

El cuarto capítulo, de forma similar al capítulo anterior, se divide en dos partes, en la primera se describe el sistema de bombeo continuo de agua, para la climatización del aire, y en la segunda se realiza el análisis del ahorro energético.

Por último las conclusiones, donde se enfatiza la inclusión de variadores de frecuencia en los sistemas analizados, donde más allá del control, son una buena forma de ahorrar energía y de hacer más eficientes los sistemas ya instalados, e inclusive los nuevos.





# **CAPÍTULO 1**

## **La energía eléctrica y las consecuencias de su uso.**



## **1.1. La generación de energía eléctrica.**

La energía eléctrica se obtiene, mediante procesos de transformación, de otras formas de la energía (química, térmica, mecánica o luminosa); estos procesos los podemos clasificar en convencionales y no convencionales o alternativos. Los primeros son aquellos utilizados para producir energía eléctrica a partir de fuentes de energía como la hidráulica, los combustibles fósiles y el uranio y los segundos son los que aprovechan otras fuentes de energía como la solar, el viento, las mareas, la biomasa y otras que aun se encuentran en etapa de investigación.

De acuerdo con lo anterior, en seguida se da una relación de algunas de las fuentes primarias utilizadas para la producción de energía eléctrica.

### **1.1.1. Fuentes de energía no convencionales**

#### *a) Energía mareomotriz*

Las mareas de los océanos constituyen una fuente limpia e inagotable de energía. El término marea se refiere al movimiento de ascenso y descenso del nivel del agua del mar debido a la acción gravitatoria del sol y la luna sobre la tierra; dependiendo de la estación del año, y de la latitud, el desnivel entre la bajamar y la plenamar está entre uno y 12 metros.

La técnica utilizada para obtener energía eléctrica consiste en encauzar el agua de la marea en una cuenca, y en su camino accionar turbinas bidireccionales acopladas a generadores eléctricos, de esta manera se aprovecha el flujo del agua, tanto en uno como en otro sentido. Una de las ventajas más importantes de estas centrales es que tienen las características principales de cualquier central hidroeléctrica convencional, permitiendo responder en forma rápida y eficiente a las fluctuaciones de carga del sistema interconectado, generando energía sin emisión de gases de efecto invernadero.

La razón por la que no se ha extendido su uso es por el impacto que tienen sobre el medio que las rodea.

#### *b) Energía solar*

Los generadores termosolares, generadores termoiónicos, generadores fotoeléctricos y generadores fotovoltaicos son las cuatro maneras viables que existen actualmente para convertir la energía del sol directamente en energía eléctrica. De estos, los generadores fotovoltaicos son los más utilizados debido a su costo y a su mayor rendimiento, en comparación con los otros tres tipos mencionados.

Este tipo de generadores aprovechan la energía de los fotones que chocan con una unión de semiconductores de tipo P y N, esta unión aporta la diferencia de potencial necesaria para que se tenga una corriente eléctrica, la que es consecuencia de los electrones que pasan a la banda de conducción con la energía que les ceden los fotones de la luz solar al chocar con la celda. La potencia obtenida es proporcional a la radiación del sol y el área de la celda. Al conectar en serie y en paralelo varias celdas se obtienen los paneles solares, con los cuales se alimentan cargas eléctricas de bajo consumo como los teléfonos de emergencia de las autopistas, lámparas de alumbrado público, baterías, etc.

#### *c) Energía eólica*

La energía eólica o energía cinética del viento es, tal vez, el primer recurso energético que el ser humano empleó, en diferentes partes del mundo y para diversos propósitos.

La ventaja más importante de la energía eólica es que su uso no produce efectos nocivos en el medio ambiente. Pero, con los inconvenientes de que la velocidad del viento es aleatoria y, puede ocurrir que, en algunas ocasiones, no sea suficiente para poner en movimiento las aspas del rotor; además, solamente algunos sitios tienen las condiciones de viento adecuadas para la instalación de una planta eólica.

La eficiencia del motor eólico de eje horizontal es, de acuerdo a la ley de Betz<sup>2</sup>, en el mejor de los casos de 59%. La potencia extraíble del viento por un generador eólico es función del tamaño de las aspas y de la velocidad del viento.

#### *d) Energía geotérmica*

La energía geotérmica es la energía almacenada bajo la superficie de la tierra en forma de calor. Su aprovechamiento comercial sólo es posible en aquellos lugares en donde coexisten los factores que dan origen a la existencia de un campo geotérmico, propiamente dicho, agua y calor.

Para localizar este recurso energético es necesario efectuar una serie de investigaciones, una vez que se ha comprobado la existencia de un yacimiento geotérmico con temperatura y salinidad comercialmente explotable, se procede a completar el caudal de fluido requerido para mover la turbina. Debido a que para mover las turbinas se utiliza solamente vapor de agua, al fluido geotérmico se le debe eliminar toda la humedad y cualquier partícula sólida, así que se hace pasar por un separador ciclónico que separa el vapor del agua caliente y retiene todo tipo de partículas sólidas.

En otras palabras, una planta geotérmica es una planta de vapor en la que la caldera ha sido reemplazada por el yacimiento geotérmico y en la que la energía es suministrada por el calor de la tierra, en vez de petróleo o algún otro combustible.

Los recursos geotérmicos, dada su característica de producción uniforme a través del tiempo, pueden reemplazar o en su caso complementar a las plantas térmicas convencionales que utilizan combustibles fósiles.

### **1.1.2. Fuentes de energía convencionales**

#### *a) Energía termonuclear*

En una central termonuclear se lleva a cabo el proceso de fisión, el cual consiste en bombardear con neutrones, un núcleo de uranio que, al romperse, da lugar a otros elementos y a la liberación de neutrones y de calor. Los neutrones liberados chocan con otros átomos de uranio ocasionando una reacción en cadena. Esta reacción en cadena pone en libertad grandes cantidades de energía que, en forma de calor, produce el vapor para accionar una turbina como en una central convencional de vapor. El recurso primario de estas centrales es no renovable y presentan el problema de la manipulación y disposición final de los residuos altamente contaminantes.

#### *b) Generación Hidroeléctrica*

Una central hidroeléctrica aprovecha la energía potencial que posee el volumen de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por

---

<sup>2</sup> ENDESA, Subdirección de selección y formación. "Curso de energía eólica", Septiembre 2007

una turbina hidráulica la cual trasmite la energía a un generador el cual la convierte en energía eléctrica, ver figura 1.1.

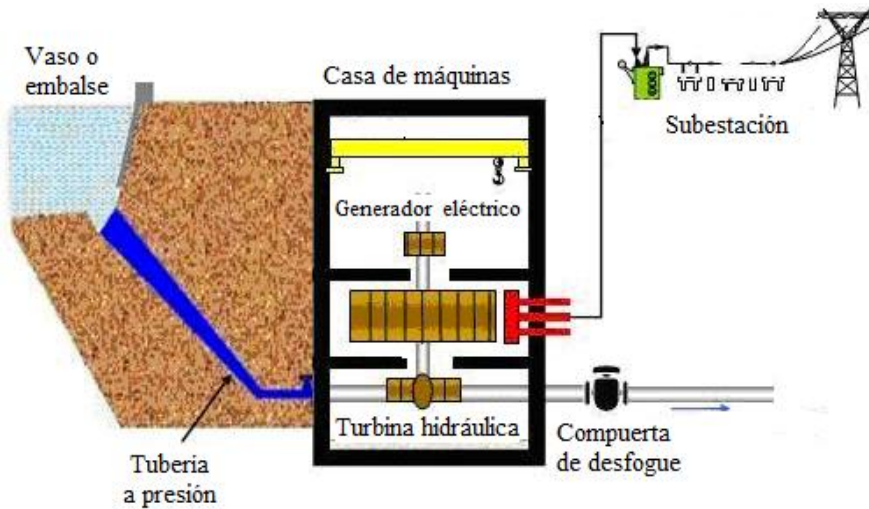


Figura 1.1. Esquema de una central hidroeléctrica.

Una característica importante es la imposibilidad de su estandarización, debido a la heterogeneidad de los lugares en donde se dispone de aprovechamiento hidráulico, dando lugar a una gran variedad de diseños, métodos constructivos, tamaños y costos de inversión.

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo con dos diferentes criterios fundamentales:

1. Por su tipo de embalse.
2. Por la altura de la caída del agua.

Estas centrales utilizan como fuente de energía primaria un recurso renovable como lo es la fuerza de las aguas, pero tienen un gran impacto inicial sobre asentamientos humanos, la flora, la fauna terrestre, el clima etc.

Generalmente estos proyectos se realizan lejos de las ciudades o de las zonas industriales donde se va a utilizar la energía producida, por lo que es necesaria la construcción de largas líneas de transporte de energía.

### c) Generación Termoeléctrica:

La mayor parte de la electricidad que actualmente se genera en el mundo se obtiene quemando combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón); con el calor liberado, se produce vapor y, a partir de un ciclo Rankine, se mueve una turbina a la que se acopla un alternador con el que se genera la energía eléctrica. De acuerdo con el combustible empleado las plantas se clasifican en:

- Termoeléctrica (combustóleo, gas natural y diesel)
- Carboeléctrica (carbón)
- Dual (combustóleo y carbón o combustóleo y gas)

En estas plantas, los primotores, es decir, los motores que mueven al generador, pueden ser:

a) *Turbinas a vapor:* En éstas, el vapor se inyecta a temperaturas del orden de los 520°C y presiones entre 120 y 170 kg/cm<sup>2</sup>, haciéndolas girar a la velocidad de 3600 r.p.m. (revoluciones por minuto). En la figura 1.2 podemos apreciar un esquema que muestra la disposición de los componentes característicos de una central con turbina a vapor. El combustible y el aire (2 y 3) ingresan al generador de vapor o caldera (1), produciendo el vapor a temperatura y presión adecuadas. El vapor se lleva a la turbina (6) en donde se expande y, al hacerlo, cede su energía en forma de movimiento rotativo a su eje, el que, a su vez, impulsa al alternador (16), éste, a través del transformador (17), entrega la energía eléctrica a la línea de transmisión. El vapor, una vez que realizó el trabajo, sale de la turbina a baja presión y menor temperatura e ingresa en el condensador (12), en donde se transforma en agua, mediante el enfriamiento que le produce el agua de refrigeración proveniente de una fuente y de la torre de enfriamiento (15), impulsada por la bomba (14). Una vez salida el agua del condensador, una bomba de extracción (13) y otra de alimentación (11) la ingresan a la caldera, para reiniciar el ciclo. Como este ciclo termodinámico no es perfecto y hay pérdidas (de vapor y de agua), la instalación está provista del sistema de agua de reposición, con un tanque de agua cruda (7), su depurador (8) y su desgasificador (9).

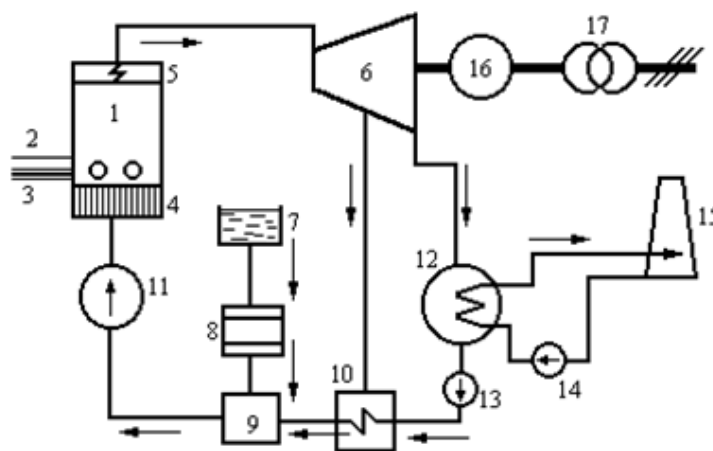


Figura 1.2. Componentes característicos de una central con turbina a vapor.

También puede advertirse, en la figura 1.2, que de una parte intermedia de la turbina hay una salida de vapor que ya realizó un trabajo, pero que aún conserva calor aprovechable, y se dirige a un intercambiador de calor (10) para calentar el agua que va de regreso a la caldera. Antes de entrar a ésta, el agua pasa por un economizador (4) donde se aumenta su temperatura. Estas etapas de precalentamiento junto con el sobrecalentador (5), que agrega más calor al vapor, tienen por objeto la elevación de la eficiencia del ciclo; en instalaciones modernas, la eficiencia puede ser hasta de 45%.

b) *Turbinas a gas:* En este tipo de centrales se utiliza el gas que se obtiene de la combustión de gas natural; figura 1.3.

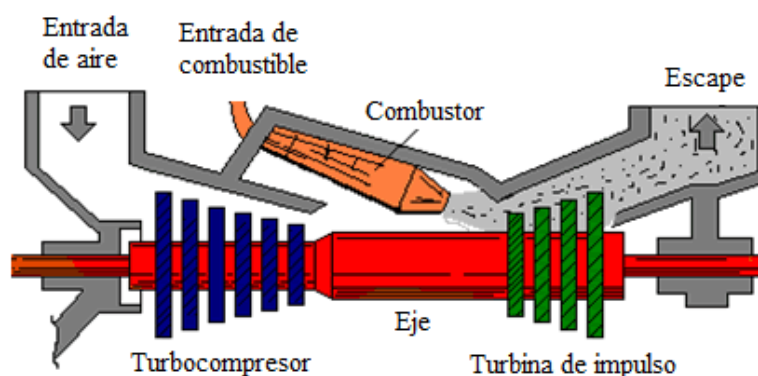


Figura 1.3. Esquema de funcionamiento de una turbina a gas.

En primer lugar el aire se mezcla con combustible, se comprime y al salir estalla en la cámara de combustión, el resultado de ésta combustión es que gases a altas temperaturas movilizan la turbina y su energía cinética es transformada en energía eléctrica por un generador. En la figura 1.4 se muestra un esquema general de una central termoeléctrica con turbinas a gas.

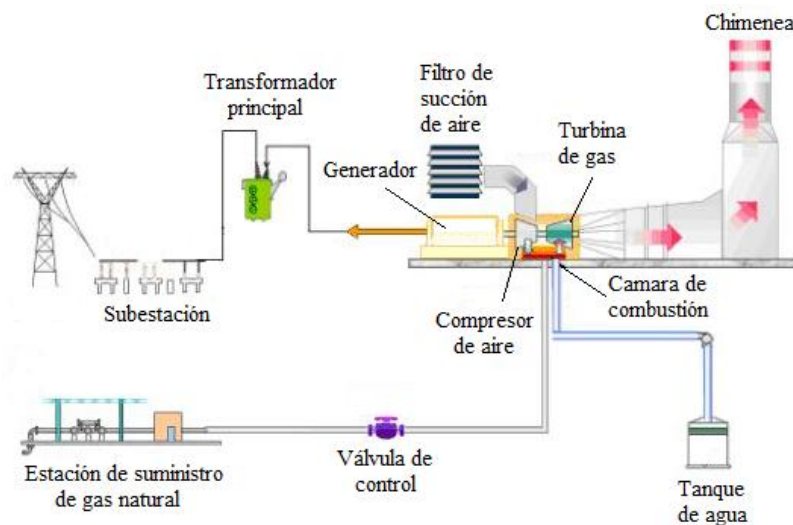


Figura 1.4. Esquema de una central termoeléctrica tipo turbogas.

En este tipo de turbinas pueden alcanzar velocidades superiores a las 6000 r.p.m. por lo que deben usar un reductor de velocidad para regularla a 3600 r.p.m., velocidad máxima de un alternador de 60 Hz. Su rápida puesta en marcha y la facilidad de regulación lo hace ideal como central de emergencia; pero su bajo rendimiento limita su funcionamiento.

c) *Motores de combustión interna:* Los más utilizados son los motores a diesel, a los cuales se acopla un generador eléctrico, figura 1.5.

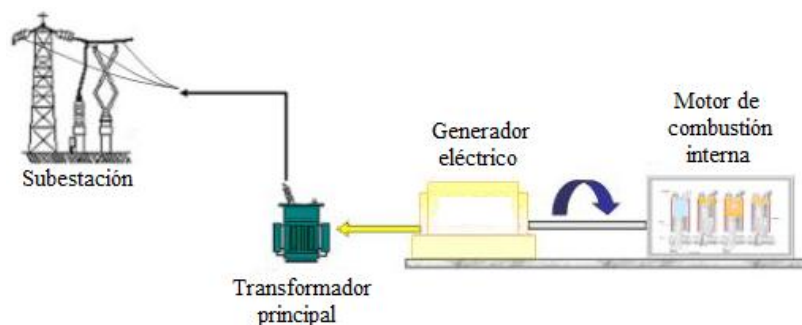
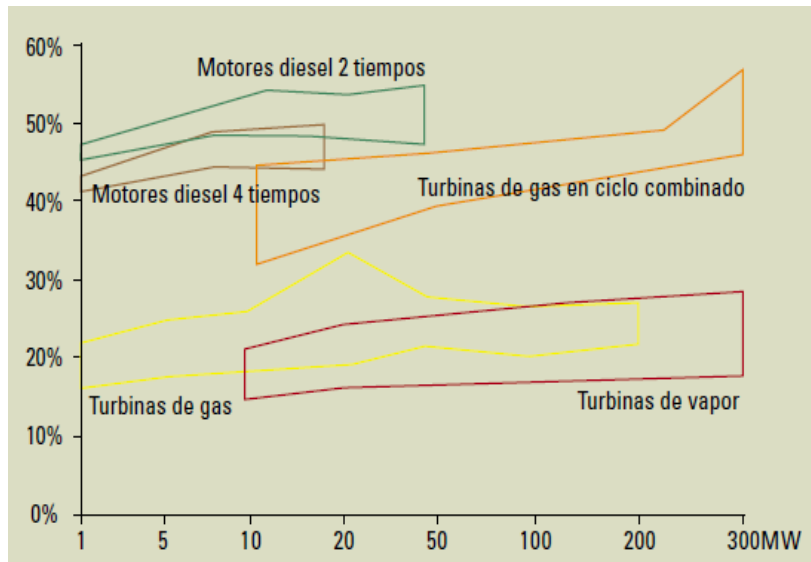


Figura 1.5. Esquema de una central termoeléctrica accionada por un motor de combustión interna.

Las centrales accionadas por motores de combustión interna se utilizan en instalaciones de tamaño mediano y como plantas de emergencia.

Los motores de combustión interna, frente a otro tipo de accionamiento primario, ofrecen la ventaja de su mejor rendimiento. En la figura 1.6 se muestra una comparación de los rendimientos de distintas soluciones, motores a diesel, turbinas a gas, turbinas de vapor y ciclos combinados.



Fuente. Gutiérrez Chamorro Javier, Generación eléctrica en plantas diesel

Figura 1.6. Gráfico de comparación Equipo – Potencia – Eficiencia.

Una de las limitaciones de las plantas accionadas por motores a diesel es el tamaño unitario de las máquinas, las unidades instaladas de mayor potencia son de 60 MW; tienen el inconveniente de que están sujetas a las oscilaciones del precio del petróleo y derivados, y requieren de filtros par limitar la emisión de contaminantes a la atmósfera.

d) Ciclos combinados: Una alternativa para aumentar la eficiencia de las plantas termoeléctricas es mediante la combinación de dos o más ciclos. En este caso, la principal combinación que se presentan es un ciclo de gas y un ciclo de vapor, ver figura 1.7, siendo este el más usado mundialmente; pero existen otras como la de un motor de combustión y un ciclo de vapor.

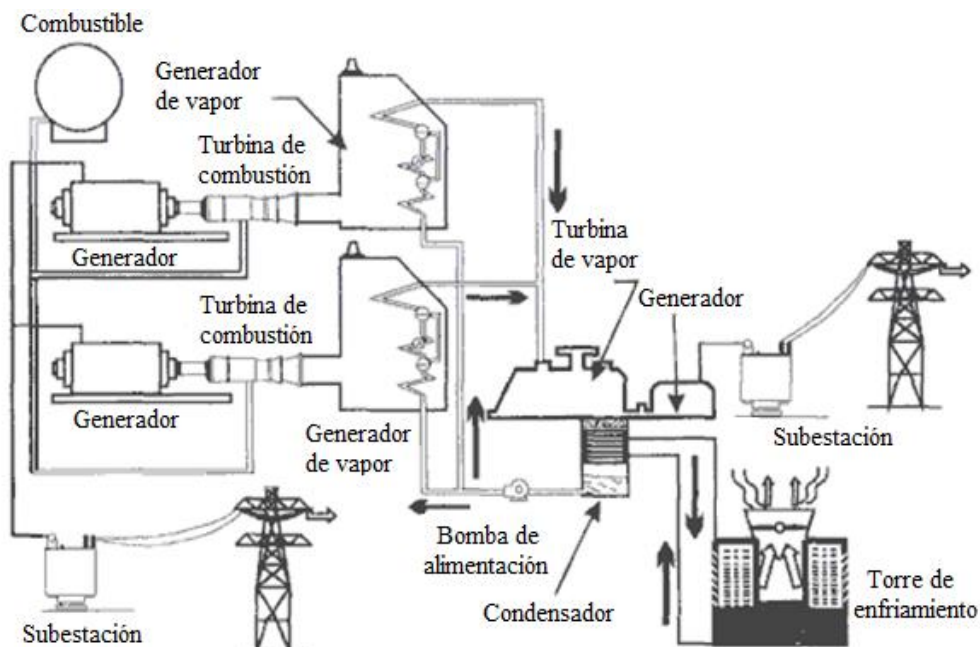


Figura 1.7. Central de ciclo combinado.

La utilización de las centrales de ciclo combinado permite un mayor aprovechamiento del combustible y, por tanto, el aumento de la eficiencia, de 38% de una central eléctrica convencional

hasta cerca del 60%. Aunado a lo anterior, se tiene la alta disponibilidad de estas centrales, que pueden funcionar sin problemas durante 6500-7500 horas equivalentes al año.

Como hemos visto, todas las centrales térmicas dependen imprescindiblemente para su puesta en marcha y correcto funcionamiento del empleo de fuentes de energía no renovables como lo son los combustibles fósiles. Tales sistemas permiten que la electricidad sea generada donde haga falta, ya que el combustible puede ser transportado rápidamente aprovechando la gran infraestructura que ha sido diseñada por los distribuidores para atender a los clientes.

Históricamente, los combustibles fósiles han estado disponibles en grandes cantidades, en su mayor parte fáciles de obtener y transportar. Sin embargo existen claros signos en la actualidad que las fuentes de suministro de combustible fósiles se están agotando y las consecuencias para la humanidad pueden llegar a ser terribles si no se toman las medidas correspondientes.

Es preocupante el agotamiento de los combustibles fósiles, sin embargo más graves son las preocupaciones acerca de las emisiones que resultan del quemado de estos combustibles, que dan pie a la liberación del carbono inmovilizado bajo tierra en trampas naturales, como los yacimientos de petróleo y carbón. Al quemarse se produce la conversión de este carbono a dióxido de carbono, el cual se diluye en la atmósfera, lo que produce un incremento en los niveles del dióxido de carbono atmosférico, que refuerza el efecto invernadero y contribuye al calentamiento global de la tierra.

## **1.2. Efectos de la generación de energía eléctrica.**

Consumo de electricidad y vida moderna son prácticamente sinónimos en el mundo actual. Las comunicaciones, el transporte, el abastecimiento de alimentos, y la mayor parte de los artefactos y servicios de los hogares, oficinas y fábricas de nuestros días dependen de la energía eléctrica. A medida que los países se industrializan, más energía eléctrica se requiere.

La generación de energía eléctrica sigue dependiendo, en gran parte, de la quema de combustibles fósiles, los cuales son sumamente contaminantes, ya que los gases, derivados de la combustión, son emitidos a la atmósfera, siendo la causa principal del llamado efecto invernadero, que ocasiona, entre otras cosas, la variación climática del planeta. Además, los gases emitidos, en contacto con el aire, producen reacciones químicas que generan nuevos contaminantes que afectan la vida de los seres vivos, los suelos y el agua. Entre los gases denominados “de efecto invernadero”, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es considerado, por muchos científicos, como el principal responsable del calentamiento de la tierra.

A nivel planetario, se estima que un tercio de la radiación solar que incide sobre la tierra y su atmósfera es reflejada al espacio, el resto penetra y es absorbida por el aire, el agua, la tierra y las plantas, convertida en energía térmica y emitida en forma de radiaciones infrarrojas que se devuelven a la atmósfera. Los gases como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los clorofluorocarbonados (CFC's) juegan un papel análogo al de los cristales del invernadero, permitiendo el paso de las radiaciones solares, pero cerrando el paso a las radiaciones infrarrojas y calentando por tanto la atmósfera terrestre. El vapor de agua es también un gas de efecto invernadero, pero al estar en la atmósfera en proporciones muy variables no se conoce con exactitud su contribución total en el proceso.

Dentro de este esquema hay que tener en cuenta que el nivel de  $\text{CO}_2$ , que se encuentra presente en la atmósfera de forma natural, es producto del equilibrio entre las emisiones naturales y las cantidades de este que se encuentran en los depósitos naturales, yacimientos o también conocidos como sumideros de  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, el impacto de la industrialización, en los últimos doscientos años,



ha venido a trastocar este equilibrio: el consumo de combustibles fósiles, que libera grandes cantidades de CO<sub>2</sub> inmovilizadas en eras geológicas pasadas, es el principal responsable de que las concentraciones de este gas hayan pasado de 280 a 381 ppm (partículas por millón)<sup>3</sup>.

Como consecuencia de este proceso se tiene el aumento global de la temperatura, lo que se puede constatar al observar la reducción de la superficie de los glaciares de montaña y de los casquetes polares y el aumento del nivel del mar, lo que, de no detenerse, impactará, de manera catastrófica, las zonas costeras de todo el mundo donde se concentra un elevado porcentaje de la población mundial. También se cree que el calentamiento global no será homogéneo y que será mayor en los polos que en el ecuador, con lo que se modificará la forma en que fluye el calor entre estos y se alterarán los sistemas atmosféricos, lo que podría traducirse en importantes variaciones en el régimen de precipitaciones de diversas áreas, con la acentuación de sequías y lluvias torrenciales. Todo ello es de esperar que tenga un importante impacto, por ahora difícil de estimar en los ecosistemas naturales y en las áreas cultivadas, así como en el aumento de las catástrofes producidas por causas meteorológicas.

Otro de los elementos emitidos a la atmósfera es el monóxido de carbono (CO), uno de los productos de la combustión incompleta de los derivados del petróleo. Es peligroso para las personas y los animales, puesto que se fija en la hemoglobina de la sangre, impidiendo el transporte de oxígeno en el organismo. Se diluye muy fácilmente en el aire ambiental, pero en un medio cerrado, su concentración lo hace muy tóxico, incluso mortal.

Dependiendo del tipo de combustible fósil y del método de quemado, también se pueden emitir otros compuestos como: ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y otros gases. Los óxidos de azufre y de nitrógeno contribuyen al smog y a la lluvia ácida. En el pasado, los propietarios de plantas atacaban este problema mediante la construcción de grandes chimeneas de humos, de modo que los elementos contaminantes pudieran diluirse en la atmósfera, lo que, si bien ayuda a reducir la contaminación local, no lo hace con la global.

Uno de las principales amenazas producto de la quema de combustibles fósiles son los gases que contienen compuestos orgánicos volátiles, a veces llamados COV que junto con el carbono, contienen elementos como hidrógeno, oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Los COV son liberados por la quema de combustibles, como gasolina, madera, carbón o gas natural. Muchos compuestos orgánicos volátiles son peligrosos contaminantes del aire y su importancia reside en su capacidad como precursores del ozono troposférico y su papel como destructores del ozono estratosférico, ver figura 1.8.



*Figura 1.8. Ozono en la atmósfera.*

<sup>3</sup> BBC Mundo SHUKMAN, DAVID. “Nuevo récord de CO<sub>2</sub> en la atmósfera”, Marzo 2006, URL <http://terrannoticias.terra.es/articulo/html/av2781825.htm>

Por su parte el ozono ( $O_3$ ) que se forma en la troposfera, es decir, entre el nivel del mar y los 10 km de altura, figura 1.8, es un contaminante atmosférico nocivo para la salud y el medio ambiente, se forma a partir de la reacción de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia de una elevada radiación solar. El óxido de nitrógeno es un contaminante atmosférico primario que se forma cuando se queman los combustibles fósiles que empleamos en la vida diaria como la gasolina, el gas natural, el diesel o el carbón. Por ello es en las zonas industriales y en las grandes ciudades es donde se genera mayor cantidad de ozono troposférico. Estas emanaciones de gases ayudados por las altas temperaturas de los meses más calurosos del año, se mezclan con los compuestos orgánicos del aire en estado de reposo, generando una neblina de color amarillo-parduzco denominado "smog fotoquímico" un oxidante muy fuerte capaz de atacar las superficies de las construcciones y otros materiales. También resulta perjudicial para las cosechas, los bosques y la vegetación en general, ya que el ozono reduce su productividad biológica. Pero sobre todo, representa un problema de salud pública, pudiendo causar tos, daños a las mucosas, irritación en la faringe, cuello y ojos, disminución del rendimiento físico, cansancio, fatiga y mareo, entre otros padecimientos.

A pesar de que los precursores o contaminantes primarios se producen en áreas urbanas o industriales, son las zonas rurales y suburbanas las que más sufren la contaminación por ozono. Esta contradicción se da porque los contaminantes primarios tardan horas o incluso días en reaccionar ante la exposición solar y para cuando se ha formado el ozono se puede haber alejado mucho de los núcleos urbanos de origen.

La lluvia ácida es otro de los subproductos de la quema de combustibles fósiles y que ocupa un lugar central como contaminante ya que los componentes tóxicos que la forman, llámense dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $N_xO_y$ ) provenientes de la combustión del carbón o de hidrocarburos, dan pie a una serie de reacciones químicas, el dióxido de azufre se transforma en trióxido de azufre ( $SO_3$ ) que a su vez y a través de algunos catalizadores ambientales o bien por la acción directa de la luz solar, se transforma en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) provocando importantes daños ambientales al regresar a la tierra a través de la lluvia ácida. Aumentan la acidez de las aguas de ríos y lagos, lo que se traduce en importantes daños en la vida acuática, tanto piscícola como vegetal. Aumenta la acidez de los suelos, lo que se traduce en cambios en la composición de los mismos, produciéndose la lixiviación de nutrientes importantes para las plantas, tales como el calcio, y movilizándose metales tóxicos, tales como el cadmio, níquel, manganeso, plomo, mercurio, que de esta forma se introducen también en las corrientes de agua. La vegetación expuesta directamente a la lluvia ácida sufre no sólo las consecuencias del deterioro del suelo, sino también un daño directo que puede llegar a ocasionar incluso la muerte de muchas especies.

Los combustibles fósiles, en particular el carbón, también contiene en disolución material radioactivo, por lo que, al quemarlo en muy grandes cantidades, arrojan este material al ambiente, provocando niveles de contaminación radiactiva, local y global, bajos pero reales.

El carbón también contiene indicios de elementos pesados tóxicos tales como mercurio, arsénico y otros. El mercurio vaporizado en una planta de energía puede estar en suspensión en la atmósfera y circular por todo el mundo afectando así a población de distintos lugares.

El daño no solo se presenta cuando se queman los combustibles fósiles, sino que también está presente al momento de su explotación, como ejemplo tenemos que la extracción de petróleo es responsable de la deforestación, degradación y destrucción de las tierras, además de el sinnúmero de catástrofes que han ocurrido debidas al derrame del petróleo en las zonas costeras y altamar alrededor del mundo entero. El proceso de extracción de petróleo involucra la liberación de subproductos tóxicos los que, en ocasiones, son vertidos en los ríos locales. Además, la

construcción de caminos para tener acceso a sitios remotos en donde hay petróleo, abre las puertas a los colonizadores y a los urbanizadores para que accedan a tierras salvajes.

Las prácticas mineras del carbón también incluyen la destrucción de ecosistemas ya que los restos de materia removida se dejan al descubierto o son arrojados a los lechos de los ríos locales, lo que provoca que la mayoría de los ríos de las zonas carboníferas discurran rojos todo el año con ácido sulfúrico que mata toda la vida.

Además de todo lo referido hasta ahora existen otros impactos ambientales derivados de la producción energética. Son quizá menos importantes globalmente, pero en muchas ocasiones tienen un gran efecto en el ámbito local.

Ni siquiera las conocidas como energías renovables, verdes o limpias están exentas de ciertos costes ambientales. Entre ellos podemos destacar:

- Los derivados de la construcción de grandes centrales hidroeléctricas.
- El impacto sobre el paisaje y la avifauna que pueden crear los parques eólicos.
- Los problemas de deforestación que el uso incontrolado de la biomasa puede generar.
- Los problemas causados por los tendidos eléctricos.

La construcción de grandes embalses para las plantas hidroeléctricas supone el desplazamiento de los habitantes de la zona, así como variaciones en el régimen natural de los cursos fluviales. Como consecuencia, extensas áreas pueden verse afectadas, al quedar bajo las aguas ecosistemas enteros y zonas de cultivo.

Los parques eólicos y los tendidos eléctricos pueden causar, sin las medidas correctoras adecuadas, un importante impacto sobre las aves, produciendo una elevada mortalidad de algunas especies de gran envergadura. Las muertes se producen sobre todo por electrocución al posarse las aves en torretas y entrar en contacto con los cables. También, en menor medida, por el choque con los cables o las palas de los rotores de los aerogeneradores. Por último, este tipo de instalaciones son también responsables de importantes modificaciones en el paisaje.

Los problemas de deforestación asociados con la explotación de la biomasa se producen cuando se sobrepasa la capacidad del bosque de regenerarse. Esto ha sucedido muchas veces en el pasado. No tenemos más que contemplar el estado de muchos de nuestros montes, afectados por años de explotación abusiva, sometidos a una fuerte presión para extraer leña y fabricar carbón vegetal. Este problema se ha reducido extraordinariamente en los países desarrollados, donde se practica en general, una explotación del bosque basada en criterios racionales. Sin embargo subsiste todavía en muchos países del tercer mundo, donde la biomasa es con frecuencia el único recurso disponible para la mayor parte de la población.

Como hemos visto, en consecuencia de las actividades de producción de energía se generan contaminantes que afectan a la atmósfera, la hidrosfera, el suelo y los seres vivos. Estas emisiones contaminantes tienen una doble naturaleza. Por un lado existe una contaminación inherente a la operación normal de los sistemas de producción y por otro una contaminación producida, en situaciones catastróficas de carácter accidental. Ambas deben ser valoradas y reducidas hasta niveles aceptables, en términos medioambientales y socioeconómicos.

Para evaluar el impacto de las actividades relacionadas con la energía debemos tener en cuenta el ciclo completo de la energía, no sólo sus etapas finales. De este modo no hemos de centrarnos únicamente en el ámbito puramente inmediato de los procesos de producción y consumo, sino que debemos estudiar también las actividades extractivas que determinadas fuentes energéticas

requieren, el impacto previo a su utilización, así como los procesos de tratamiento a los que deben someterse antes de ser utilizadas. Igualmente hay que tener en cuenta y estudiar los focos de emisión de contaminantes a la atmósfera, hidrosfera y suelos, y seguirlos hasta su destino final en los ecosistemas. Todo ello considerando que sus efectos son susceptibles de extenderse en el tiempo y el espacio.

En esencia para hacer un cambio en la forma en la que impactamos al planeta se debe de implementar tecnologías que permitan reducir la contaminación en origen, estudiar su impacto sobre el medio y la capacidad de éste para diluir, transferir y asimilar esta contaminación, determinando los límites por encima de los cuales los efectos pueden llegar a hacerse irreversibles. Al tiempo de diseñar estrategias que permitan la recuperación del medio ambiente de los daños causados.

### **1.3. Uso eficiente y ahorro de la energía eléctrica.**

Ya de amplio consenso científico es que la acción humana ha roto el equilibrio dinámico que existe en el clima desde hace medio millón de años. La opinión científica es que si el aumento en la temperatura promedio del planeta, respecto a los niveles de antes de 1750, no pasa de los 2°C, nos mantendremos más o menos dentro del equilibrio dinámico actual. El ritmo actual de emisiones implica un aumento en la temperatura de hasta 5°C. Con toda seguridad esto provocaría un cambio abrupto, que nos llevaría a otro equilibrio climático, mucho más cálido e inhóspito que los existentes hasta ahora y cuya naturaleza exacta no podemos predecir<sup>4</sup>.

Este tipo de augurios son los que nos esperan si no hacemos algo para cambiar la forma en que usamos y disponemos no solo de la electricidad, sino, del carbón, del gas y de esos agentes contaminantes obtenidos como producto del procesamiento del petróleo.

Teniendo en cuenta esto, son muchos los retos que debemos afrontar, es claro que no hay soluciones individuales, hoy en día la humanidad reconoce que la naturaleza no es un bien inalterable, sino frágil, por lo que su conservación constituye una tarea fundamental e inaplazable. La cuestión es, cuales son las medidas que se deben de tomar, si la electricidad es imprescindible para el desarrollo económico de un país. De hecho, el estado del bienestar que disfrutamos se ha basado en un consumo creciente de energía que se agudizó a partir del siglo XIX. Esta energía por ser motor de la economía y garantía del bienestar, ha estado bajo la protección de los organismos reguladores, que con importes tarifarios han mantenido unos precios muchas veces inferiores a los reales del mercado. Esto ha hecho que no se perciba el problema y no se tomen iniciativas a nivel individual para reducir el consumo.

Podemos considerar tres aspectos importantes por los que debemos ahorrar y hacer un uso eficiente de la energía:

- Tener menores costos, al reducir el pago de la facturación eléctrica.
- Preservar los recursos naturales de nuestro planeta.
- Disminuir el consumo de combustibles fósiles utilizados para generar energía eléctrica y la consecuente reducción de emisiones contaminantes al medio ambiente

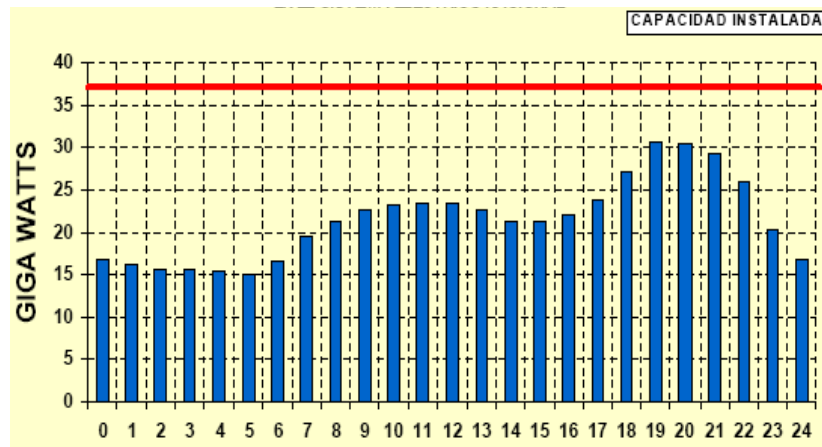
Con todo esto, un menor consumo energético no debe significar el sacrificio del bienestar o la productividad, el ahorro de energía eléctrica significa hacer lo mismo mejor y más eficientemente. Para aumentar la eficiencia y reducir el consumo, las principales medidas a tomar en cuenta son:

---

<sup>4</sup> KARVALA, David. “Cambiar el mundo para salvar el planeta”, octubre 2009

### 1.3.1.Reducción y control de la demanda<sup>5</sup>.

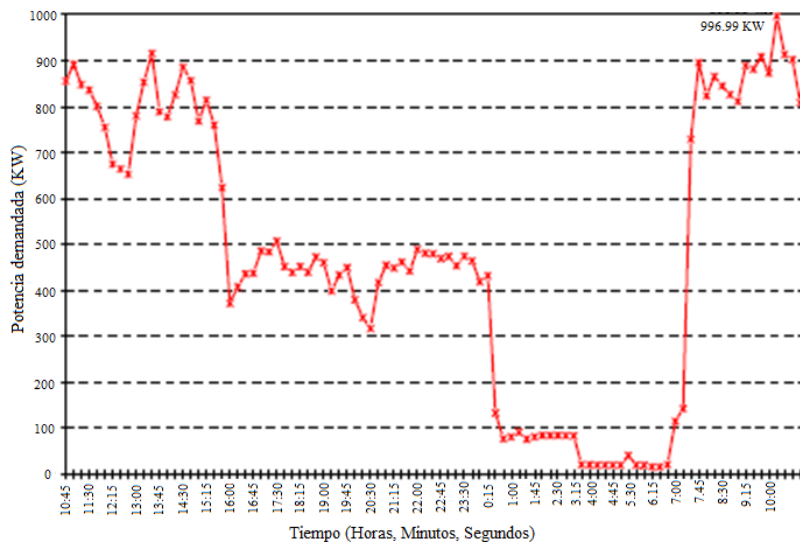
El conocimiento de las fluctuaciones en la demanda de potencia eléctrica es de gran utilidad para definir las posibilidades de administración o control de la misma. Ver figura 1.9.



Fuente. FIDE, Presentación “XIX Congreso Internacional de Ahorro de Energía”

Figura 1.9. Generación horaria durante un día laborable en el sistema eléctrico nacional.

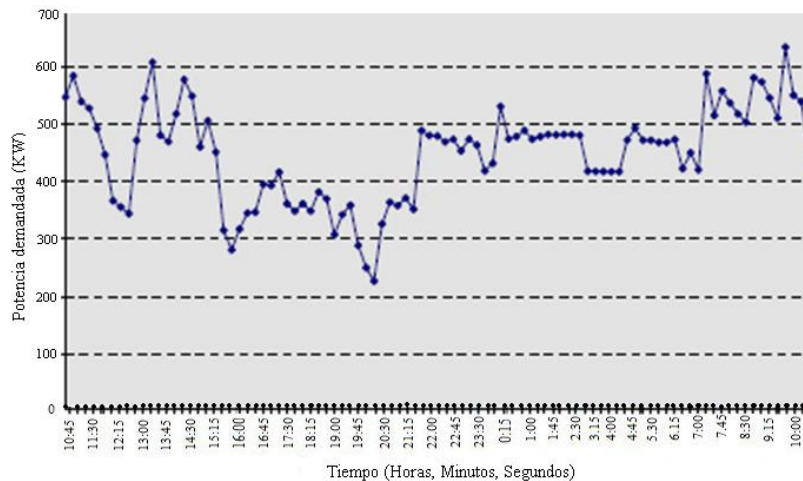
El objetivo de la metodología de control de la demanda es determinar los potenciales de reducción en la facturación eléctrica al aplicar medidas de control, manual o automático, que modifiquen los patrones de consumo y/o demanda eléctrica, ver figuras 1.10 y 1.11 esto es porque, a lo largo de un día, la energía eléctrica tiene distintos costos, así, la más cara (horario punta o pico) es de 18 a 22 horas, la madrugada es de menor costo (horario valle o base) y el resto del día tiene costo intermedio.



Fuente. FIDE, Presentación “XIX Congreso Internacional de Ahorro de Energía”

Figura 1.10. Demanda registrada durante la operación de una empresa en un día típico.

<sup>5</sup> FIDE, XIX CONGRESO INTERNACIONAL DE AHORRO DE ENERGÍA. “Calentamiento global, solución: energías limpias”, Guadalajara Jalisco, Agosto 2008



Fuente: FIDE, Presentación "XIX Congreso Internacional de Ahorro de Energía"

Figura 1.11. Perfil de la demanda mejorada para la misma empresa.

Los sistemas de control de la demanda se componen de varios elementos: sensores, que registran si un aparato está prendido o apagado o si se encuentra en un régimen de operación; un sistema de comunicación que permite intercambiar señales con un punto central; un microprocesador que recibe las señales, procesa la información y envía señales a los equipos para que actúen de acuerdo a un programa preestablecido; y un conjunto de actuadores, que operan los equipos de acuerdo a las señales enviadas. Estos sistemas pueden ser relativamente sencillos o sumamente sofisticados, lo cual depende del número y variedad de las cargas y de la precisión requerida para que los equipos funcionen de acuerdo a la programación establecida.

El control de la demanda eléctrica se plantea como una alternativa de ahorro económico en sistemas ya eficientes, y se requiere que las personas que están aplicando este tipo de programas tengan un amplio conocimiento del proceso productivo de la empresa y su capacidad de flexibilidad. Asimismo, tener conocimientos sobre los consumos horarios, particulares y totales, además de los costos de producción y su balance.

Se puede reducir el costo de la factura:

- Evitando los picos de demanda
- Aprovechando el horario más barato

Centrándonos en la reducción de la demanda, existen otras medidas que con poca inversión pueden conseguir importantes ahorros de hasta un 80% en el caso de sustitución de lámparas, hasta un 15% aplicando variadores de frecuencia a los motores eléctricos utilizados en las bombas de agua y máquinas de frío, hasta un 25% adicional utilizando intercambiadores de calor en las máquinas de frío y climatización, etc.

### 1.3.2. Utilización de energías renovables.

Las energías renovables son aquellas fuentes de energía que no se agotarán o están disponibles en forma continua con respecto al periodo de vida de la raza humana en el planeta. En términos generales podemos considerar a la energía solar, como nuestra fuente energética total, porque excluyendo la geotermia todas las demás fuentes se derivan de la radiación de esta estrella.

Existen equipos que pueden transformar esta radiación solar en energía eléctrica o incluso mover un automóvil con biocombustibles con un daño mínimo al ambiente.

El sol se encarga de calentar la atmósfera terrestre, causando gradientes de temperatura, lo que trae consigo diferencias de presión, y como consecuencia los vientos, origen de la energía eólica, también evapora el agua que bajo las condiciones atmosféricas propicias se precipita en forma de lluvia en zonas más altas, obteniendo con esto energía potencial la cual puede ser aprovechada con tecnologías de turbinas hidráulicas para generar electricidad o accionar equipos mecánicos.

Asimismo, también el proceso de fotosíntesis de los vegetales aprovecha como fuente energética al sol, llevando a cabo reacciones químicas, las cuales la transforman en energía almacenada dentro de estos, y puede ser aprovechada mediante combustión directa o transformada a otros combustibles, como por ejemplo el metanol y el etanol. Siendo el reino vegetal el principio de las cadenas alimenticias en los ecosistemas la energía contenida en esta es transferida, al ser consumidas por los seres herbívoros y así a los diversos aprovechamientos de la biomasa que se pueden obtener.

Por último, del sol se aprovechan directamente la energía térmica y la energía fotovoltaica.

Las energías renovables son, además, fuentes de abastecimiento energético respetuosas con el medio ambiente ya que causan los menores efectos posibles. Las energías renovables no producen emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases contaminantes a la atmósfera. Las energías renovables no generan residuos de difícil tratamiento. Los impactos ambientales de las energías renovables son siempre impactos reversibles.

### **1.3.3. Optimización de la tarifa eléctrica a la situación actual<sup>6</sup>.**

Desde la perspectiva del uso racional de la energía eléctrica, para que los recursos financieros y energéticos que son necesarios para producirla tengan el mejor aprovechamiento posible para la sociedad, es necesario hacer uso de un instrumento más efectivo como lo es su precio.

Para que una empresa eléctrica pueda mantenerse operando debe poder cubrir sus costos. Por un lado, debe poder amortizar la compra de sus equipos de generación, transmisión y distribución, lo cual representa la fracción más importante del costo de la electricidad. Por otro lado, debe cubrir el costo del combustible, el cual, para el caso de México y en la actualidad, es principalmente combustóleo y gas natural. Finalmente, debe pagar a sus empleados.

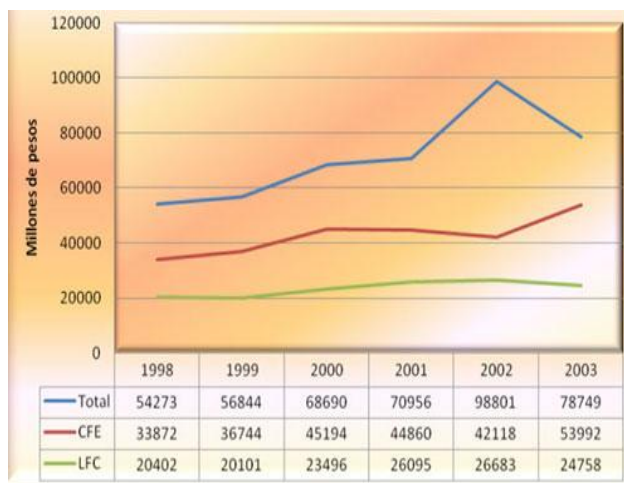
El que una empresa eléctrica no cubra sus costos significa que alguien más los tiene que pagar, que en el caso de México lo hacen todos aquellos que pagan impuestos. Esto significa que, cuando los consumos eléctricos de un usuario sean hechos de manera ineficiente, la sociedad tendrá que pagar la ineficiencia de quienes, quizá por desconocimiento, prefieren tener subsidios que invertir en alternativas que les son rentables a los propios usuarios. Los principales beneficiados de este subsidio son los usuarios de los sectores residencial y agrícola; el precio promedio que pagan solo alcanza a cubrir el 42% y 29% de los costos respectivos. En cambio, el precio que pagan el resto de los usuarios representa el 93% del costo.

La figura 1.12 nos muestra los subsidios a tarifas eléctricas para CFE y para Luz y Fuerza del Centro. Al año de 1998 el subsidio para la CFE fue de \$33,872 millones de pesos, un 62% respecto al total mientras que para el año 2003 se incrementó a \$53,992 millones de pesos equivalente a un

---

<sup>6</sup> ESCOBAR DELGADILLO, Jélica Lorena y JIMÉNEZ RIVERA, Jesús Salvador. “Crisis económica, crisis energética y libre mercado”, Revista digital universitaria, Vol. 10, No.5, UNAM, Mayo de 2009

69% del total, en tanto, para el año de 1998 el subsidio para LyFC fue \$20,402 millones de pesos un 38% del total, y para 2003 tuvo un subsidio de \$24,758 millones de pesos equivalente al 31% del total, lo que refleja una disminución del 6% del subsidio para esta paraestatal.



Fuente. Revista digital universitaria 10 de mayo de 2009 Vol. 10 No. 5  
 "Crisis económica, crisis energética y libre mercado"

Figura 1.12. Subsidio al sector eléctrico nacional.

Se puede apreciar que los subsidios están socavando la viabilidad financiera de este sector y ponen al descubierto que el esquema tarifario es muy ineficiente ya que promueve un desperdicio de recursos, puesto que el consumo de algunos sectores de la población se hace a un precio que no refleja la escasez relativa del bien.

Por estas y otras razones se hace necesario un adecuado estudio que arroje como resultados las acciones o las formas adecuadas en las que se deben de fijar las tarifas de consumo y las posibles sanciones para quienes hagan de la ineficiencia y el mal uso un camino para el consumo eléctrico.

### 1.3.4. Optimización de las instalaciones y uso de equipos más eficientes.

La correcta instalación y el mantener en buen estado los circuitos y los equipos eléctricos son factores indispensables para la seguridad, así como para proteger la economía. Una instalación en mal estado gasta más energía y daña los aparatos.

Si hablamos de ahorro energético debemos de tomar en cuenta que mantener en buen estado los aparatos electrodomésticos es un acción primordial; comprar equipos que cuenten con etiquetado energético, que nos informa de las características de consumo de los mismos y usarlos adecuadamente contribuye al ahorro de energía y la reducción de gastos.

Además de estas medidas el gobierno tiene otras herramientas para intentar reducir el consumo, como los incentivos aplicados para la renovación de electrodomésticos, los impuestos o las tasas sobre la tarifa, penalizando los consumos que superen unos estándares determinados.

Otras medidas dirigidas a la optimización de las instalaciones pueden ser de distintos tipos: los sistemas de control, la integración de la luz natural, la iluminación de bajo consumo o la utilización de balastos electrónicos de alta frecuencia que permiten además la variación de la intensidad y que pueden reducir el consumo de forma muy significativa. Las luminarias eficientes permiten un ahorro considerable de energía, por lo que deben utilizarse en los edificios nuevos, y en los edificios existentes, en la medida en que sea posible, hacer la sustitución. Entre las lámparas eficientes son aconsejables las siguientes:



<b>Lámpara</b>	<b>Se sustituye por:</b>	<b>Ahorro</b>
Vapor de mercurio de alta presión	Vapor de sodio de alta presión	45%
Vapor de sodio de alta presión	Vapor de sodio de baja presión	25%
Halógena convencional	Halogenuros metálicos	70%
Incandescencia	Fluorescentes compactos	80%

Un principio esencial para la optimización del uso de la energía consiste en conocer cómo funcionan los equipos y aparatos en el hogar, para obtener de ellos el máximo beneficio.

Asimismo es importante tener en cuenta la trascendencia y la complejidad que hoy en día supone el consumo de energía en nuestra vida cotidiana y la posibilidad de utilizarla eficientemente.

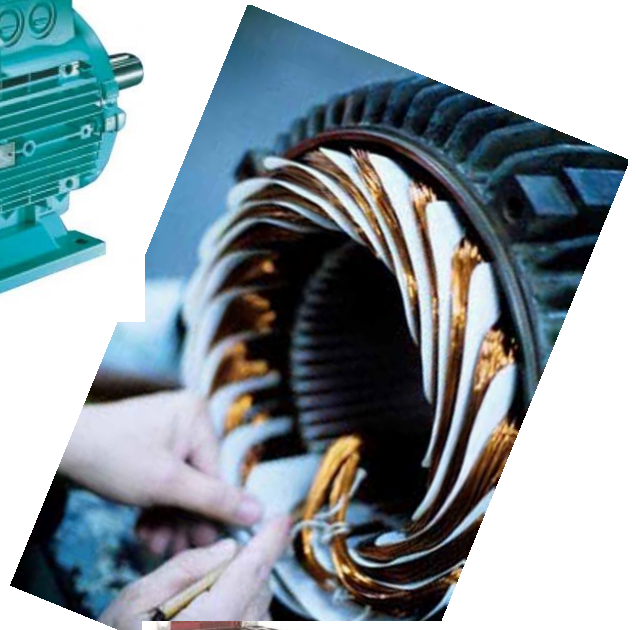
### **1.3.5. Programas de información y concientización.**

Otra medida importante es la divulgación de la información y el establecimiento de programas de educación y correcto uso de la energía eléctrica. Para esto, el programa integral de concientización debe considerar componentes como:

- Realización de diagnósticos energéticos
- Integración de comités de ahorro de energía
- Retiro de equipos ineficientes y sustitución por equipos de alta eficiencia
- Promover una cultura de uso racional y eficiente de la energía
- Campañas de eliminación de desperdicios
- Pláticas de concientización
- Elaboración de carteles alusivos al tema
- Buzón de recomendaciones y sugerencias
- Premios y reconocimientos

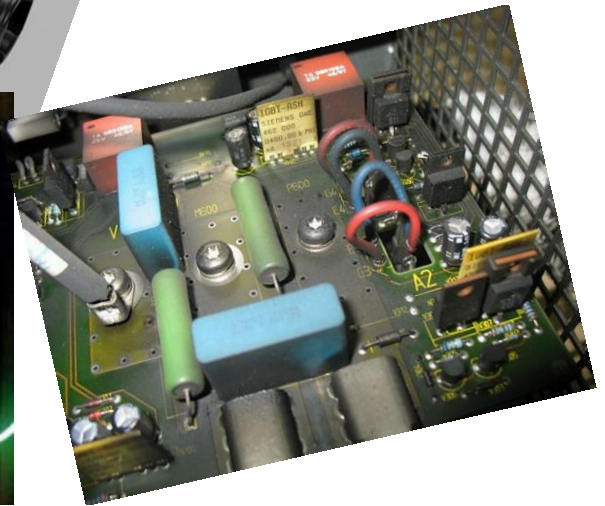
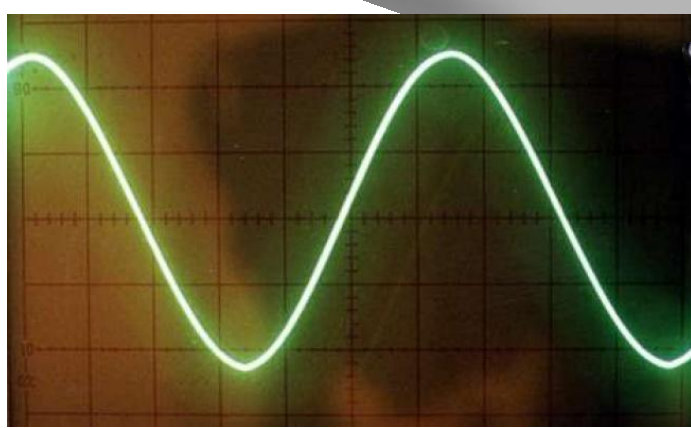
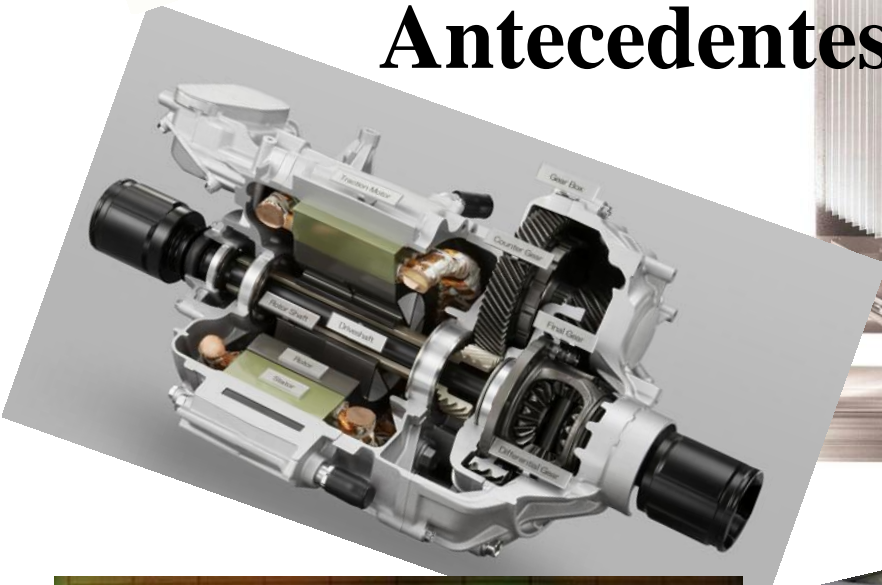
Hay muchas formas para ahorrar energía eléctrica como: apagar las luces que no necesitamos, no dejar prendidos equipos eléctricos cuando ya no los ocupamos, cambiar las bombillas por las que consumen menos energía, utilizar equipos de alta eficiencia y otras. Hacer más actividades al aire libre, disminuir el uso de aparatos eléctricos.

Dos condiciones básicas para el uso eficiente de la energía son que las propuestas sean técnicamente factibles hoy en día, y que no impliquen un ataque al nivel de vida de la gente corriente. Esto no es tan complicado como podría parecer.



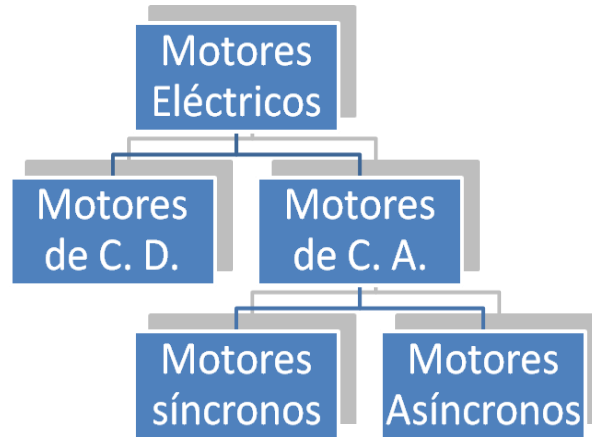
# CAPÍTULO 2

## 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 asíncronos 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.

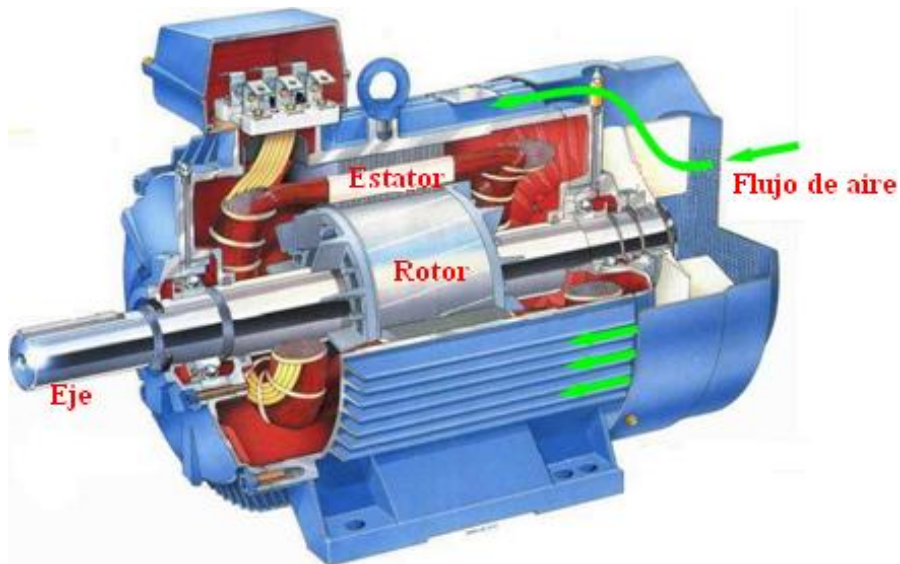
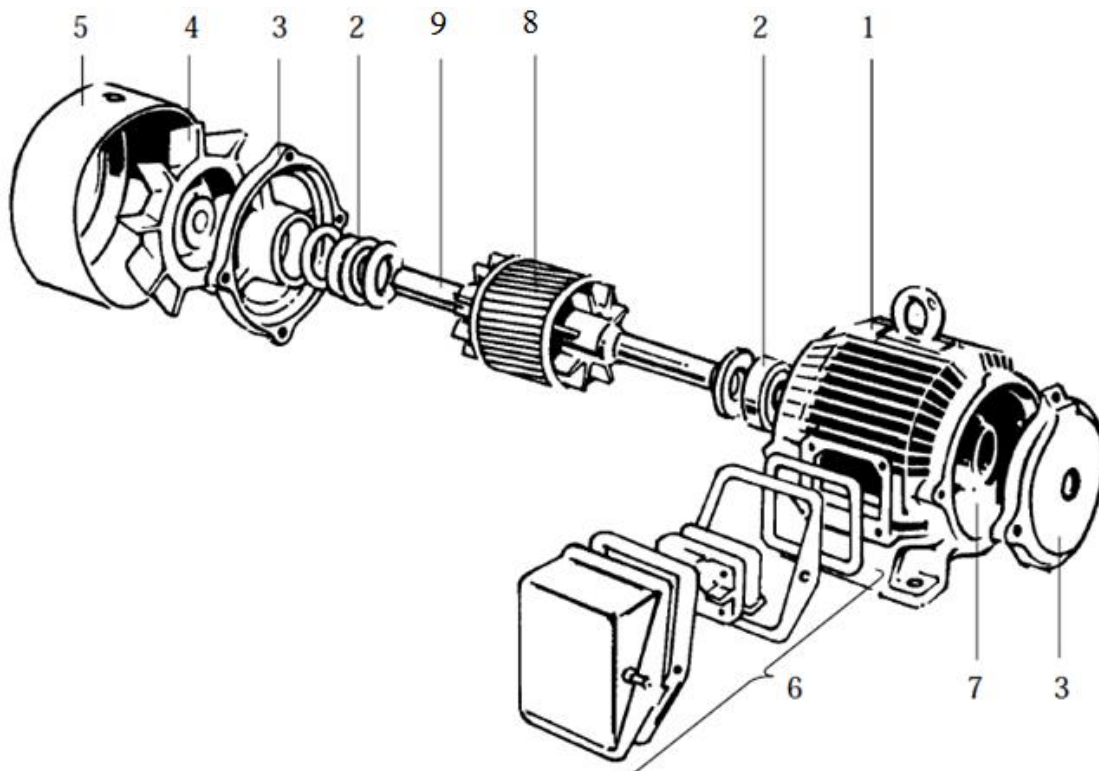


Figura 2.1 Corte de un motor tipo jaula de ardilla.

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:

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

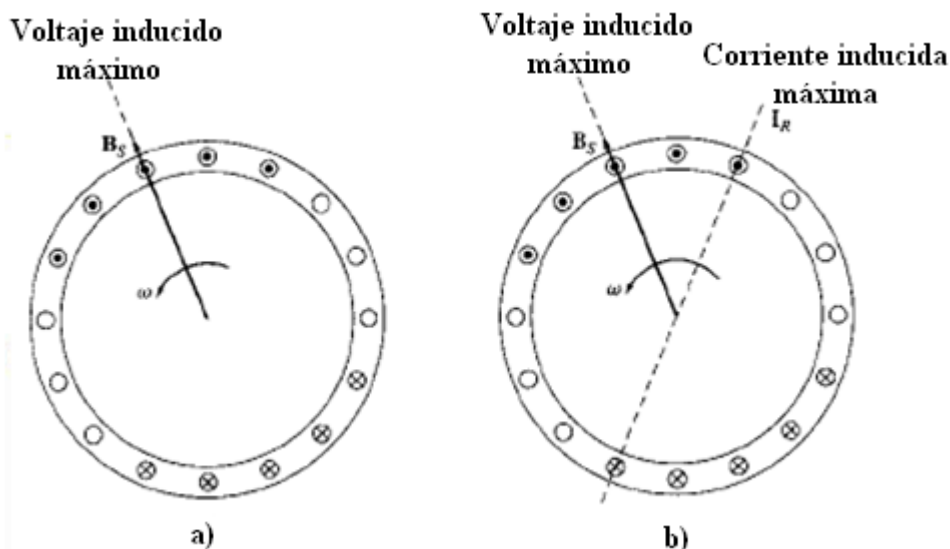
En donde  $f_e$  es la frecuencia en Hertz, y  $p$  es el número de polos de la máquina. El campo magnético  $B_s$ , al pasar por las barras del rotor induce una fuerza electromotriz en cada una de ellas igual a:

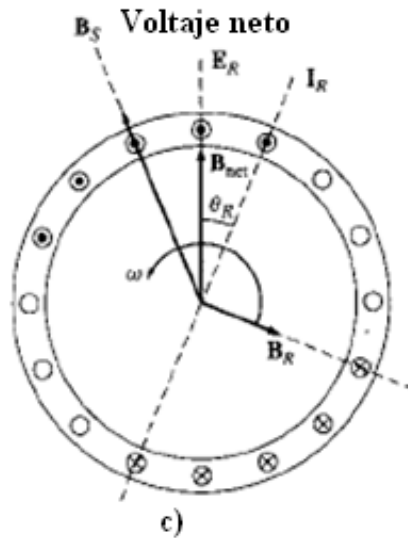
$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad 2.02$$

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 está  $90^\circ$  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:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad 2.03$$

Donde:

- $\tau_{ind}$  = 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).

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

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 está 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:

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

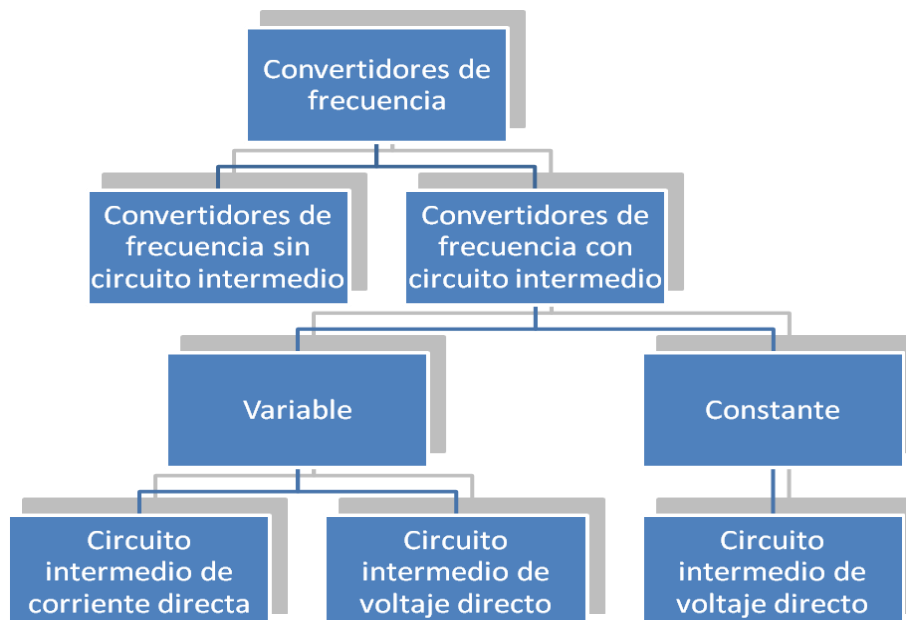
De esta ecuación observamos que, para cambiar la velocidad del rotor, podemos hacerlo ya sea modificando el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia de alimentación, de estas tres opciones, la más factible es la tercera; es decir, modificando la frecuencia de alimentación.

### 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:

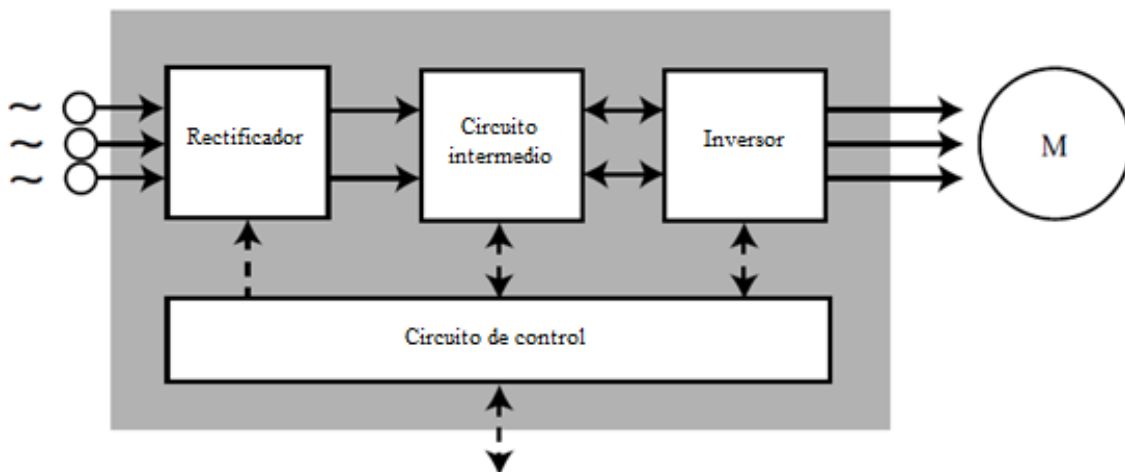
- Mejor control sobre la corriente reactiva.
- Reducción de armónicas.
- No tiene limitaciones en lo que respecta a la frecuencia de salida, en comparación al rango aceptado por los motores convencionales.



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.

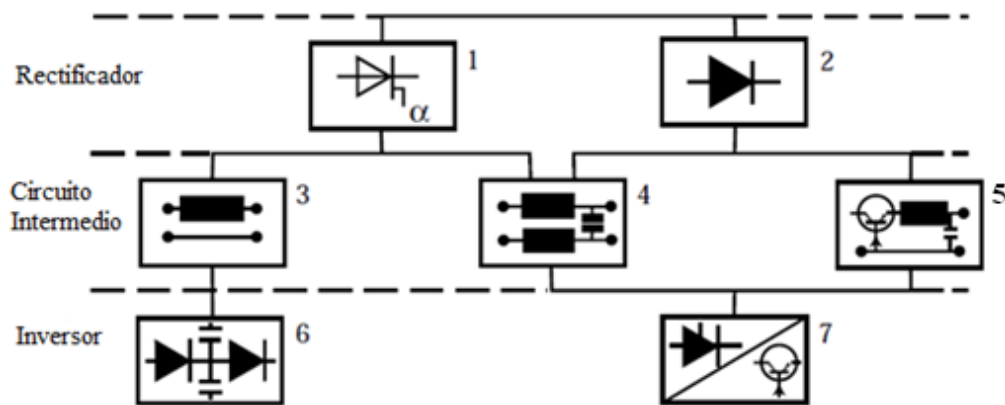
Los convertidores de frecuencia se pueden dividir en cuatro componentes principalmente (figura 2.5):



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

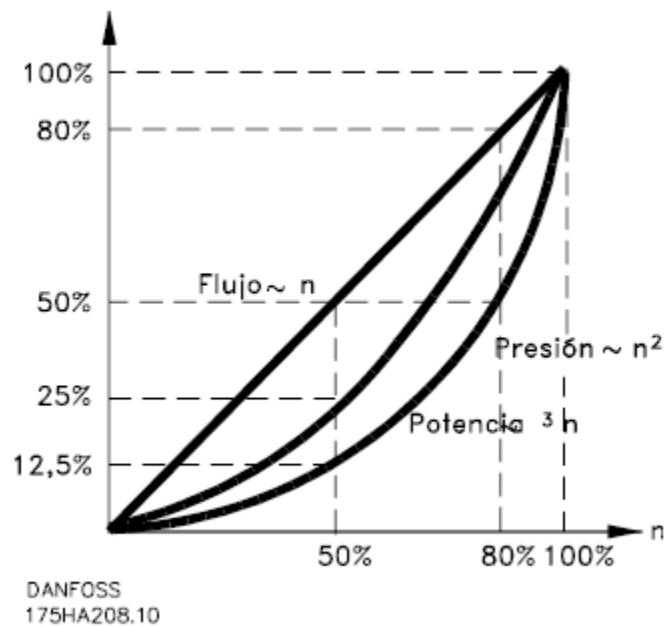
#### **2.4. ¿Cómo ayuda a ahorrar energía?**

Los variadores de frecuencia sacan partido de las leyes de afinidad<sup>7</sup> 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 alternativas, 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%.

<sup>7</sup> 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

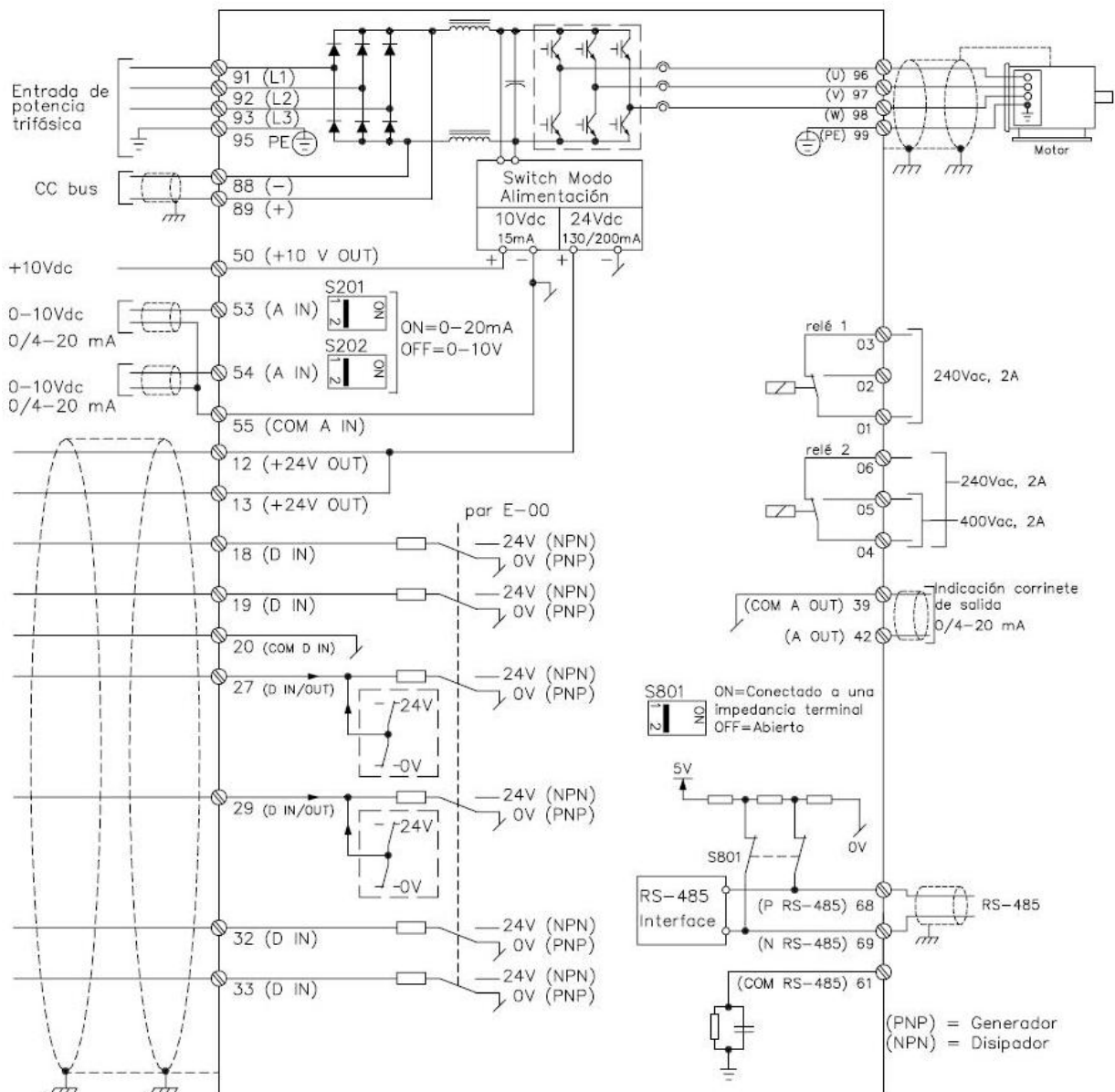
Las ecuaciones anteriores, que son una parte de las leyes de afinidad<sup>8</sup>, nos muestran la relación que se mantiene entre las diferentes variables del sistema y la velocidad del motor. Se puede observar que mientras la relación de velocidades del sistema es proporcional al flujo, esto quiere 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.

<sup>8</sup> 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<sup>®</sup>, 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.

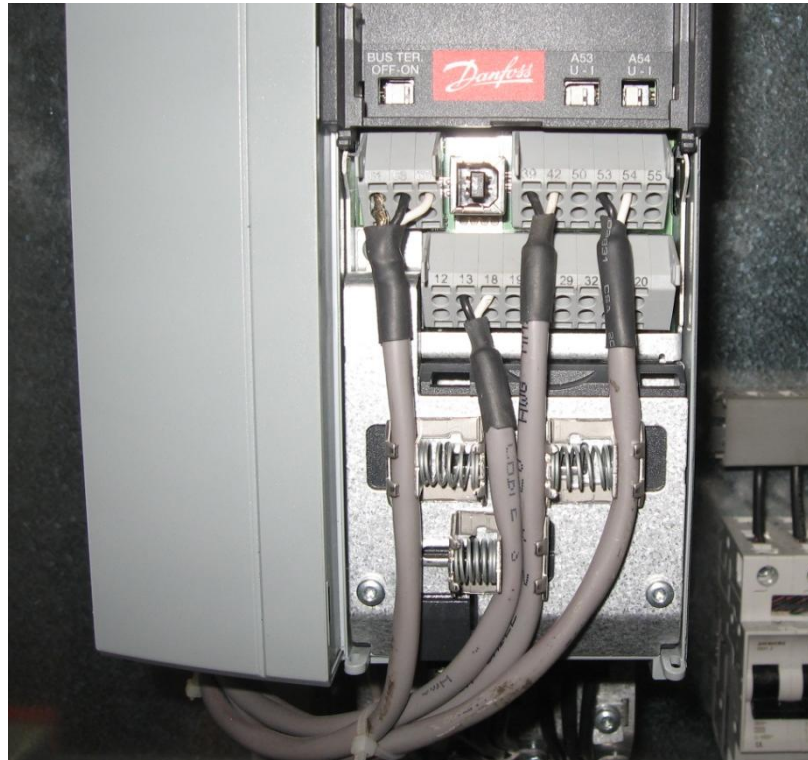
Dichas recomendaciones son:

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.



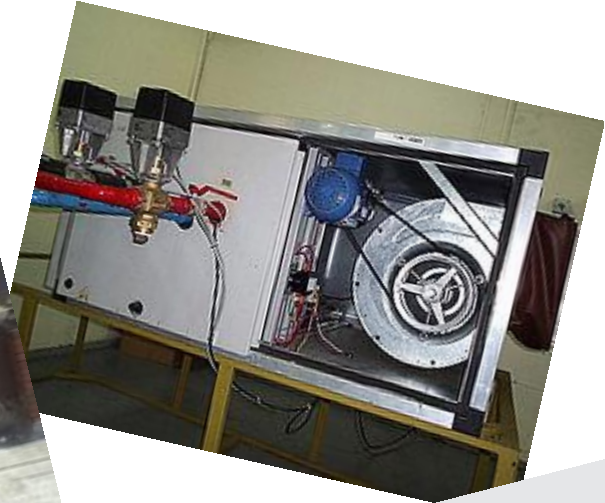
a)



b)

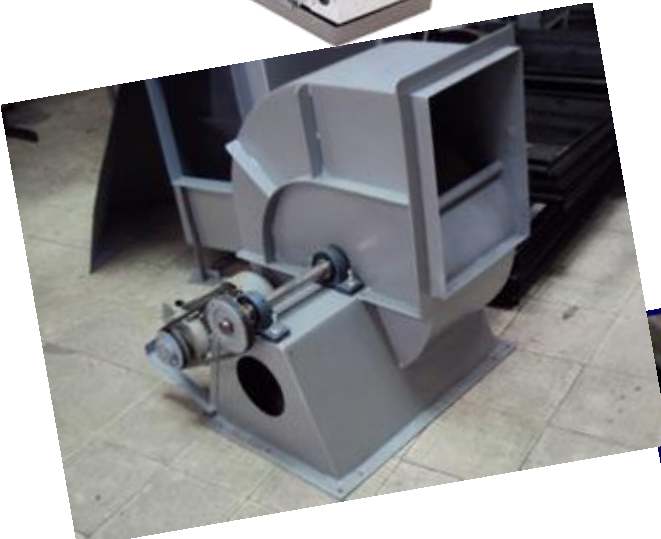
*Figura 2.9 Fotografías de un convertidor de frecuencia instalado.*

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.



# Capítulo 3

## Análisis de un proyecto de aire acondicionado.





Como ya se explicó en el capítulo 1, es posible ahorrar energía o reducir la demanda máxima, cuando corresponda, mediante acciones que no requieren inversiones, esto es mediante el manejo de la carga o con la gestión de la operación de los equipos o, por el contrario, al realizar proyectos que exigen inversiones pero que conllevan beneficios a distintos plazos. El objeto del análisis energético orientado a los usos finales de la energía es desarrollar una estrategia de abastecimiento energético con un mínimo costo, un análisis como éste se puede hacer desde distintas perspectivas: el usuario, la sociedad o la empresa proveedora de energía. En el presente caso, la óptica adoptada es la del usuario.

Para esto nos valdremos del análisis costo - beneficio<sup>9</sup> que nos brinda una ayuda importante en la toma de decisiones al definir la factibilidad de las alternativas planteadas al momento de realizar un proyecto, el análisis tiene como objetivo fundamental proporcionar una medida de los costos en que se incurren al llevar a cabo lo proyectado y, a su vez, comparar estos costos previstos con los beneficios esperados del proyecto. Este análisis permite valorar la necesidad y la oportunidad de realización del proyecto, brinda una perspectiva más amplia al momento de seleccionar una de las alternativas del proyecto y, además, estima adecuadamente los recursos económicos necesarios para la realización del mismo.

Para llevar a cabo un análisis fiable de la propuesta seguiremos los siguientes pasos:

a) Introducción

En esta se da un breve resumen del documento. También se explican algunos antecedentes que son importantes para el posterior desarrollo del tema central.

b) Definición del proyecto

Esta es una propuesta de acción para resolver una necesidad utilizando un conjunto de recursos disponibles, los cuales pueden ser, recursos humanos, materiales, tecnológicos, entre otros. Responde a una decisión sobre uso de recursos con algunos objetivos, tales como incrementar, mantener o mejorar la producción de bienes, la prestación de servicios o la eficiencia de los procesos, etc. Para esto es necesario tomar en cuenta una serie de características, las cuales deben ser identificadas en forma minuciosa, porque de ello depende que al momento de implementar el proyecto no surjan problemas. Por tal motivo es importante que aquellos que promuevan una inversión conozcan profundamente lo que pretenden realizar o en todo caso profundicen sobre el tema si es que no hay un conocimiento total.

c) Evaluación de beneficios y viabilidad

Este punto está formado por una serie de estudios que permiten al emprendedor y a las instituciones que lo apoyan saber si la idea es viable o si se puede realizar y dará ganancias. La evaluación de beneficios, pretende medir el impacto que la ejecución de un proyecto tiene sobre la disponibilidad total de bienes y servicios de una entidad social o empresarial.

Existen dos elementos básicos que destacan por su importancia. Por un lado, su objetivo es maximizar la rentabilidad, incrementando así el potencial de la inversión futura. Por otro lado, dado que pretende el máximo de beneficios para la comunidad en su conjunto y teniendo en cuenta la participación del gobierno en la inversión, mediante organizaciones gubernamentales como el FIDE, que aportan los fondos suficientes para llevar a cabo el proyecto, resulta vital

---

<sup>9</sup> UNIDAD RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN DG POLÍTICA REGIONAL COMISIÓN EUROPEA. “Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión”, 2003.

que se evalúen sistemáticamente los proyectos, los factores, los insumos y los bienes y servicios producidos.

La ubicación temporal de la evaluación de los beneficios, está fundamentalmente en la etapa *ex-ante*, la etapa de evaluación inicial, cuando se estudia la idea de un proyecto y la factibilidad de realizarlo, sirviendo sus resultados para decidir sobre la ejecución o no del proyecto.

#### d) Características y requerimientos

La etapa de definición de características y requerimientos reviste gran importancia para el proceso de adquisición. A través de ella, la necesidad de un bien o servicio se convierte en un requerimiento, es decir, se definen las características del bien o servicio que se desea adquirir, esto mediante una definición clara y precisa de los aspectos más relevantes que se necesitan o se desea que tenga el bien. Al hacer esto, también se establecen los criterios mediante los cuales se compararán las ofertas.

Para realizar esta definición será necesario tener muy claras las necesidades que originan el requerimiento. No hay que olvidar que detrás de cada compra hay alguna necesidad relacionada con la actividad de la organización, por lo que todo el proceso deberá estar orientado a satisfacer dicha necesidad de manera eficaz, eficiente y transparente.

#### e) Análisis financiero: Costo/Beneficio

Así como controlamos la ejecución del proyecto, el control de los costos es extremadamente importante para el inversionista ya que se debe de disponer de una metodología adecuada para el seguimiento y control de los costos desde el inicio del proyecto, esto hace necesario desarrollar una estimación del proyecto donde se valoran los beneficios y los costos, y se los reduce a un patrón de medida común. Si los beneficios exceden a los costos, el proyecto es aceptable; en caso contrario, el proyecto debe ser modificado o en su caso rechazado.

Los costos y los beneficios del proyecto deben medirse por comparación y sirven para determinar la utilidad de la continuación del proyecto o para establecer la conveniencia de realizar otros del mismo tipo.

En base a esta serie de puntos se planea fundamentar lo necesario y útil de la implementación de variadores de frecuencia mediante la evaluación del proyecto, en el que cada apartado se enfoca tanto desde la perspectiva del promotor del proyecto como desde la del usuario.

### **3.1 Introducción. Conceptos básicos de aire acondicionado.**

El acondicionamiento de aire es el proceso más completo de tratamiento del aire de las estancias; consiste en regular las condiciones en cuanto a la temperatura, humedad, limpieza (renovación, filtrado) y el movimiento del aire adentro de los locales. El avance de la tecnología ha hecho indispensable su aplicación en todo edificio, al contrario de lo que se piensa el aire acondicionado no es un lujo, sino una necesidad, ya que además de estar destinado para el confort se utiliza para preservar la salud humana y en muchas ocasiones también constituye un requisito indispensable para los procesos industriales.

Entre los sistemas de acondicionamiento de aire se encuentran los autónomos y los centralizados. Los primeros producen el calor o el frío y tratan el aire en una sola unidad. Los segundos tienen acondicionadores que solamente tratan el aire y obtienen la energía térmica (calor o frío) de un sistema centralizado. En este último caso, la producción de calor suele confiarse a calderas que

funcionan con combustibles. La de frío a máquinas frigoríficas, que funcionan por compresión o por absorción y llevan el frío producido mediante sistemas de refrigeración.

### 3.1.1 Volumen de Aire Constante (VAC)

El volumen de aire constante (VAC), figura 3.1, es un tipo de sistema de aire acondicionado que cuenta con calefacción y ventilación. En un sistema simple de VAC, el flujo de aire de la fuente es constante, pero debido a que cuenta con una unidad acondicionadora, la temperatura del aire varía para resolver el problema de variación de la carga térmica de un espacio.

La mayoría de los sistemas de VAC son pequeños, y sirven para climatizar una sola zona. Sin embargo existen sistemas VAC multizonas que sirven para climatizar y ventilar zonas múltiples o edificios más grandes, pero con la consecuente desventaja de que suelen ser muy ineficientes por el bajo nivel de control con el que se encuentran integrados.

Debido al potencial de ahorro de la energía consumida por el ventilador, los sistemas de volumen de aire variable (VAV) suelen ser más comunes. Sin embargo, en pequeños edificios y residencias, los sistemas de VAC son a menudo el sistema de opción debido a la simplicidad, bajo costo, y confiabilidad.

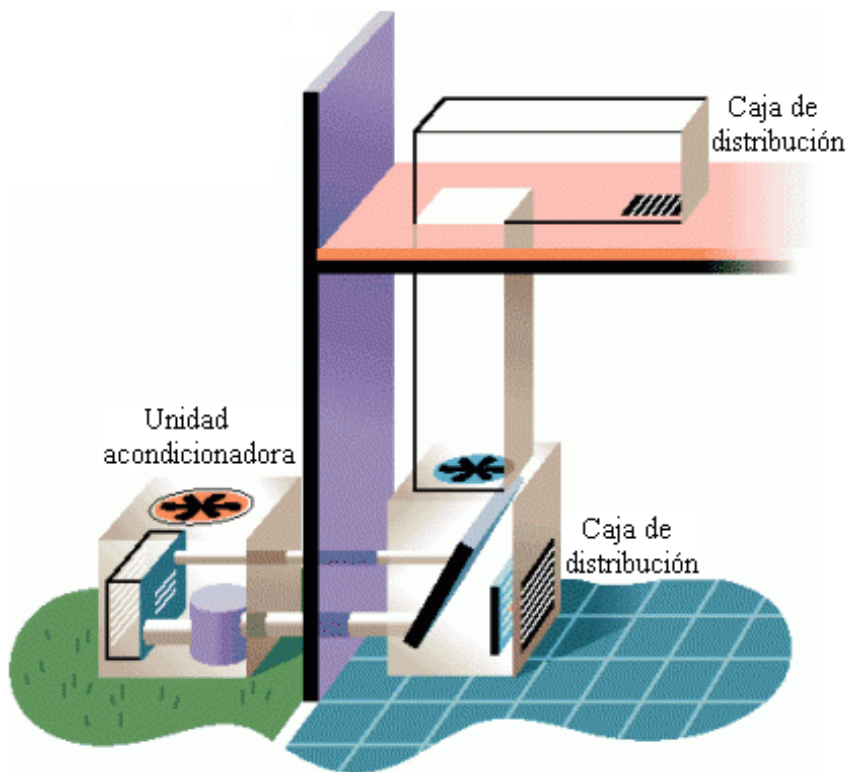


Figura 3.1. Sistema de ventilación de volumen de aire constante.

### 3.1.2 Volumen de Aire Variable (VAV)

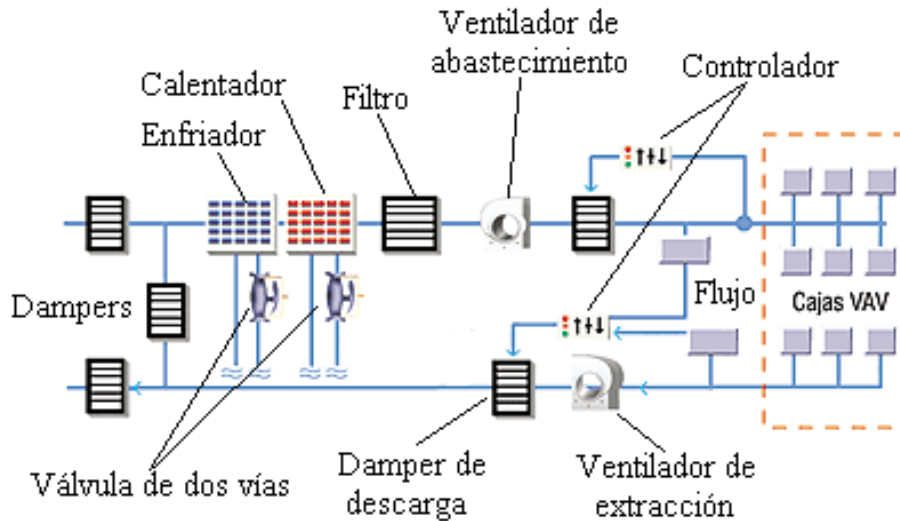


Figura 3.2. Sistema tradicional de volumen de aire variable.

En términos generales, los sistemas centralizados de Volumen de Aire Variable (VAV), figura 3.2, son un método eficiente para mantener las condiciones ambientales dentro de un edificio, cumpliendo con los requerimientos de ventilación y de temperatura del aire, al controlar la capacidad de flujo de aire de las Unidades Manejadoras de Aire (Air Handling Units, AHU), figura 3.3. La AHU no es más que el elemento encargado de suministrar de aire a todo el recinto y están diseñados para mantener la presión constante en el ducto de abastecimiento y una presión positiva en el edificio, regulando los flujos de aire de los ventiladores de abastecimiento y de extracción mediante sensores de presión. Por su parte las cajas VAV individuales suministran a la estancia un flujo variable de aire de temperatura constante.

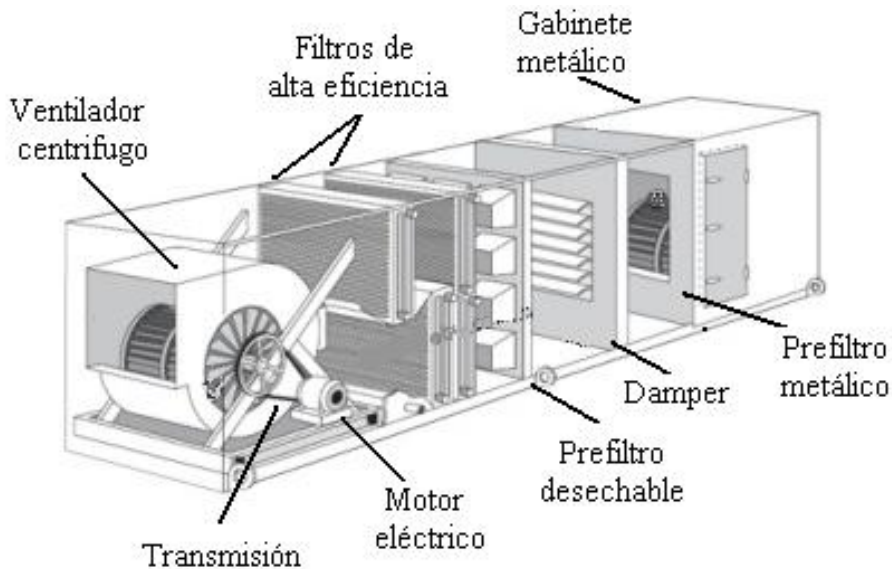


Figura 3.3. Manejadora de aire.

Asimismo, los sensores de temperatura localizados en cada zona controlan el damper de la caja VAV para mantener la temperatura constante. De igual modo, al acercarse la temperatura en el espacio acondicionado a la temperatura deseada, los dampers se van cerrando para restringir el flujo de aire.

Para mantener la temperatura de la habitación constante, tradicionalmente los dampers se instalan en las AHU's para modular la capacidad del ventilador, creando resistencia y una caída de presión en el aire que está entrando en los ductos o reduciendo la eficiencia del ventilador. Por su parte, los ventiladores de abastecimiento se regulan para mantener una presión estática fija en los ductos. En los ventiladores de extracción, los dampers comúnmente se ajustan para mantener constante el flujo de aire diferencial entre los sistemas de abastecimiento y de extracción de aire.

Mientras que en un sistema tradicional VAV los dampers trabajan para mantener una presión constante en los ductos, una solución con variador de frecuencia, figura 3.4, ahorra más energía y reduce la complejidad de la instalación. En vez de los métodos antes mencionados, un variador de frecuencia disminuye la velocidad del motor del ventilador para suministrar los flujos y presiones requeridos, controlando el ventilador de extracción para conservar la diferencia de presión de aire entre el abastecimiento y la extracción.

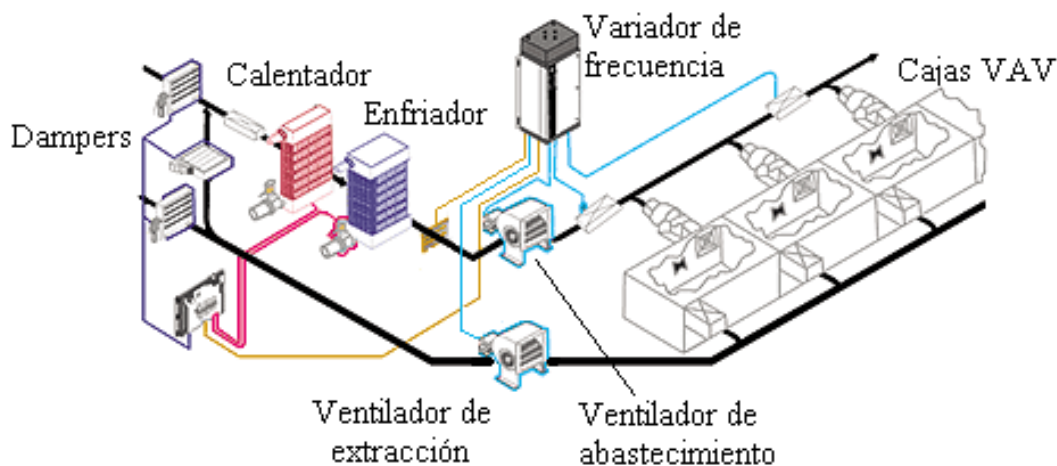


Figura 3.4. Aplicación VAV con variador de frecuencia.

Se debe tener en cuenta que los dispositivos centrífugos como ventiladores se comportan de acuerdo a las leyes de afinidad. Esto implica que los ventiladores disminuyen la presión y el flujo que producen a medida que se reduce su velocidad, por lo que su consumo de energía disminuye de manera significativa. Además, para lograr el mayor ahorro de energía es de gran importancia que el sensor, para detectar la presión requerida, sea del tipo correcto y que esté donde se encuentra la carga, lo que ayuda a bajar las pérdidas del circuito y así optimizar el sistema controlado.

### 3.2 Definición del proyecto.

En términos generales puede afirmarse que, en la mayoría de las instalaciones eléctricas, se derrocha cierto porcentaje de la electricidad que se adquiere debido a una selección y operación inadecuada de los equipos y sistemas de distribución de la electricidad. Las principales pérdidas eléctricas provienen del uso de motores, transformadores y líneas de distribución. Al respecto debe mencionarse que en el sector industrial, agrícola y minero alrededor de un 70% del total de consumo eléctrico es para la operación de los motores eléctricos, razón por la cual constituyen uno de los objetivos principales de cualquier programa de eficiencia energética. Ver figura 3.5, donde se muestra la gráfica de operación y consumo de un motor eléctrico.

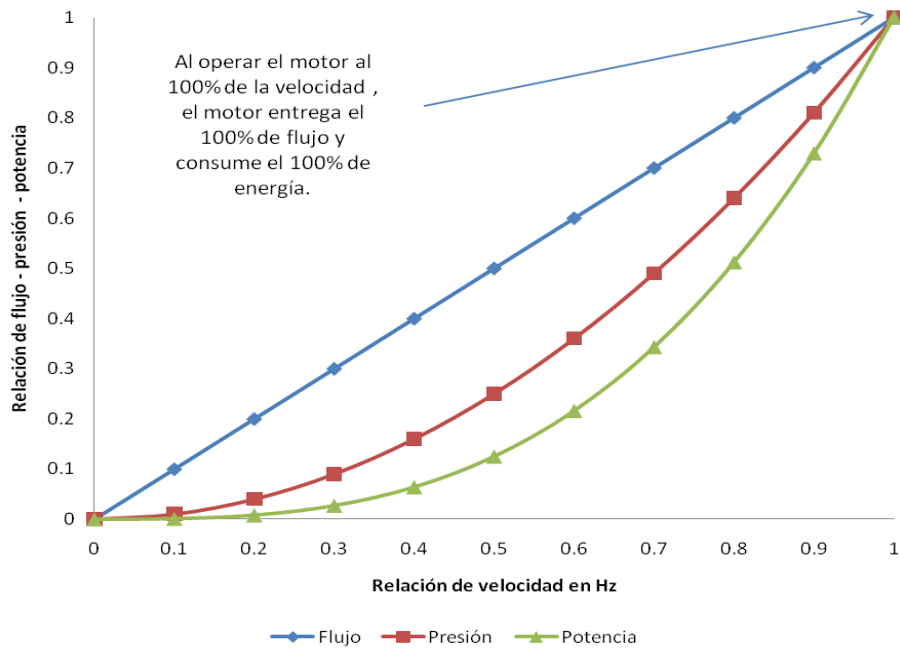


Figura 3.5. Operación y consumo de un motor eléctrico.

Es por esto que, a continuación, abordamos un ejemplo en el que se describen brevemente los términos generales de una opción para el mejoramiento de la eficiencia de las manejadoras de aire, figura 3.6, del sistema de ventilación de un edificio, considerando la implementación de un sistema de volumen de aire variable (VAV) controlado por un variador de frecuencia.

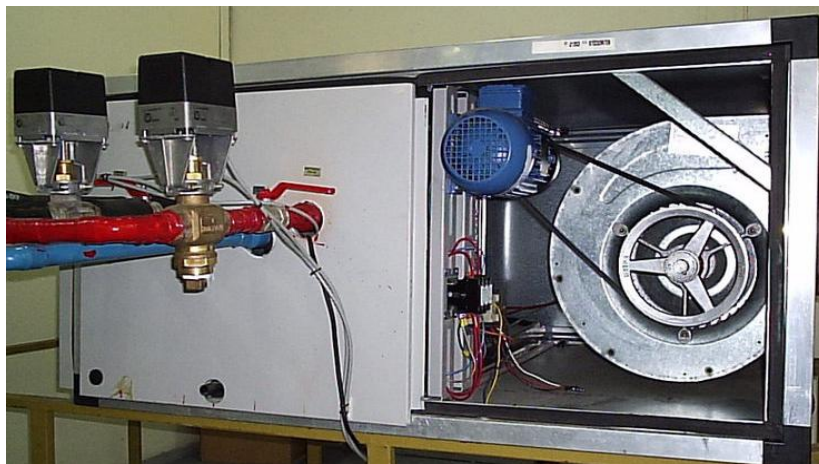
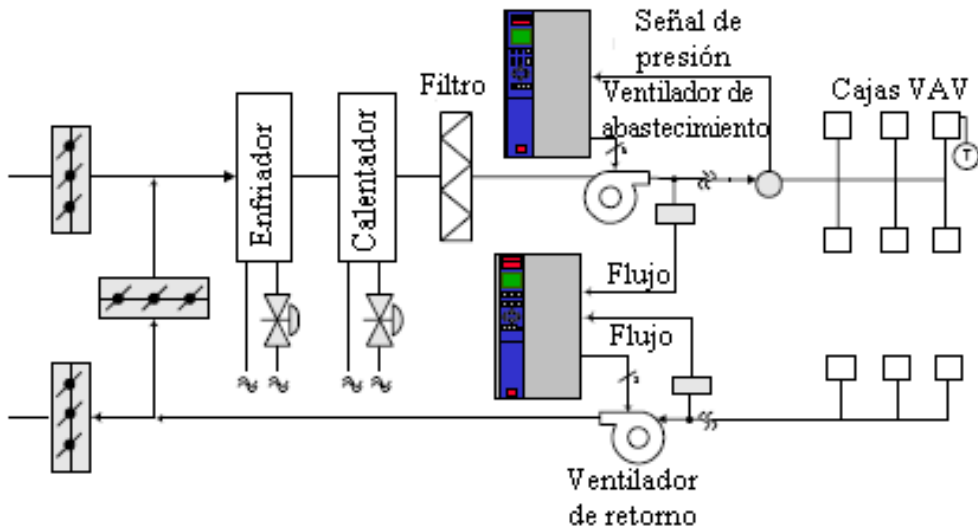


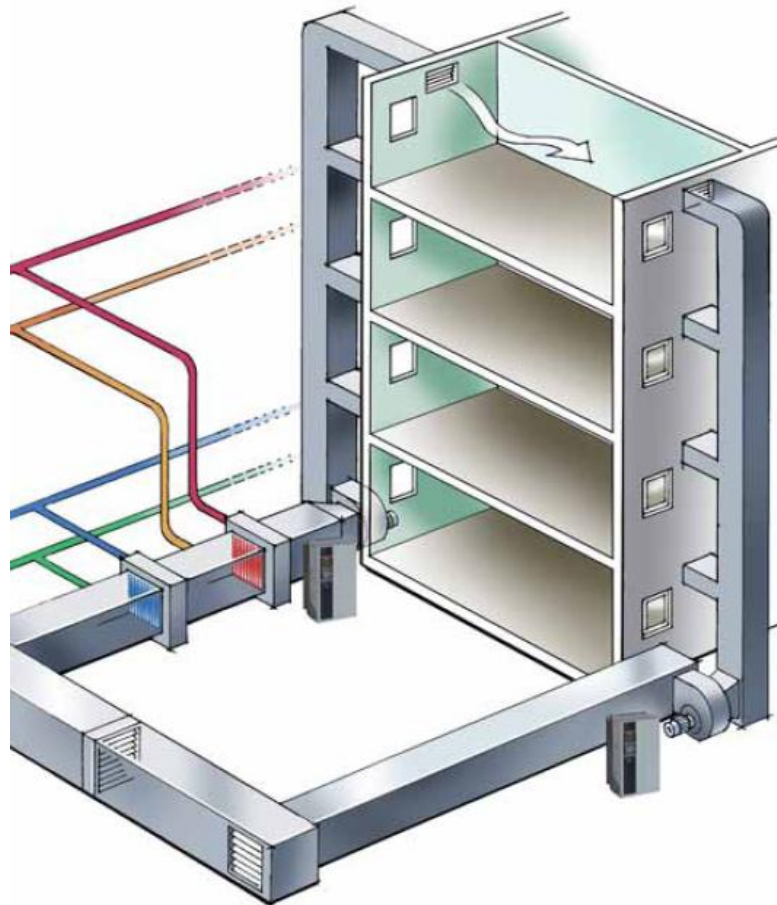
Figura 3.6. Unidad manejadora de aire.

Los sistemas de volumen de aire variable (VAV), figura 3.7 y figura 3.8, sirven para controlar la ventilación y la temperatura de un edificio en función de sus necesidades específicas. Se considera que los sistemas centralizados VAV constituyen el método de mayor rendimiento energético para el acondicionamiento de aire en edificios.



Fuente. Danfoss®, “Guía de diseño del variador de frecuencia VLT® HVAC”.

Figura 3.7. Sistema VAV controlado por variadores de frecuencia.



Fuente. Danfoss®, “Soluciones HVAC”.

Figura 3.8. Implementación de un sistema VAV.

Los sistemas VAV utilizan dispositivos centrífugos, como son los ventiladores que se encuentran contenidos en las manejadoras de aire, que funcionan según las leyes de afinidad centrífuga, figura 3.9. Esto significa que el ventilador de la manejadora reduce la presión y el flujo de aire que

produce a medida que disminuye su velocidad. Por lo tanto, el consumo de electricidad se reduce significativamente.

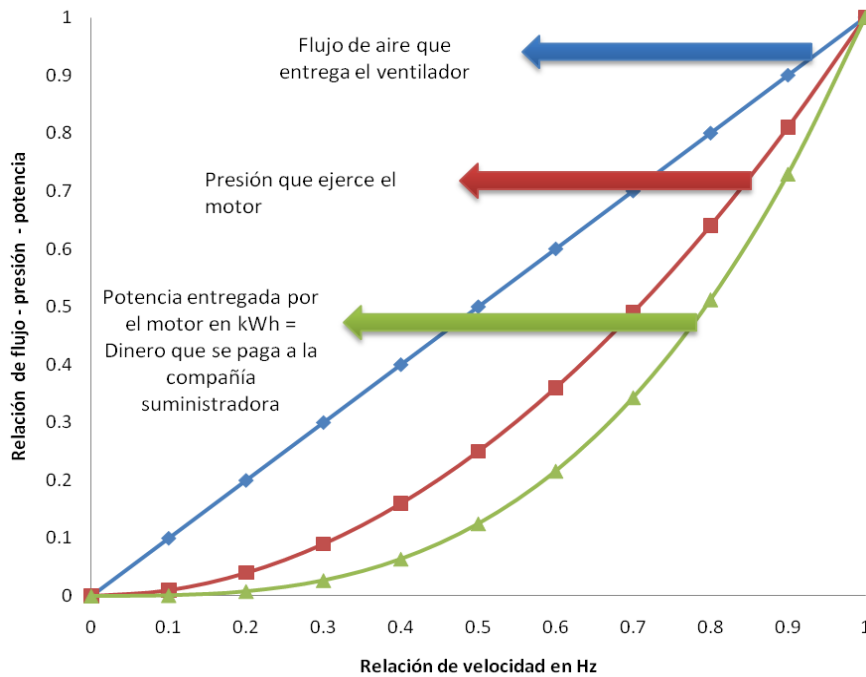


Figura 3.9. Leyes de afinidad centrífuga.

Se obtiene un mayor rendimiento con sistemas centralizados que con sistemas distribuidos. Esto se deriva del uso de ventiladores, calentadores y enfriadores de mayor tamaño, cuyo rendimiento es muy superior al de los enfriadores de aire distribuidos que utilizan equipos más pequeños.

Para el correcto funcionamiento de un sistema VAV centralizado, se debe de controlar el ventilador de retorno de la manejadora de aire para mantener una diferencia fija entre el flujo de aire de alimentación y el de retorno. Y, para eliminar la necesidad de controladores adicionales, se utiliza el controlador PID<sup>10</sup> que trae integrado el variador de frecuencia, con el cual se hace un control de presión en lazo cerrado para así mantener una presión constante dentro del edificio.

En el sistema de ventilación VAV la temperatura debe mantenerse en un valor constante, como se trata de una aplicación de climatización, si la temperatura está por encima del valor designado, debe incrementarse la velocidad del ventilador para proporcionar un mayor caudal de aire. El sensor de temperatura tiene un rango de -10 a 40 °C. El rango de frecuencia de salida del variador es de 30 a 60 Hz. Adicionalmente se agregará un sensor de presión para mantener el sistema en un rango de presión positiva. En la figura 3.10 se muestra un sistema de ventilación como el descrito.

<sup>10</sup> Ver apartado de beneficios y viabilidad.



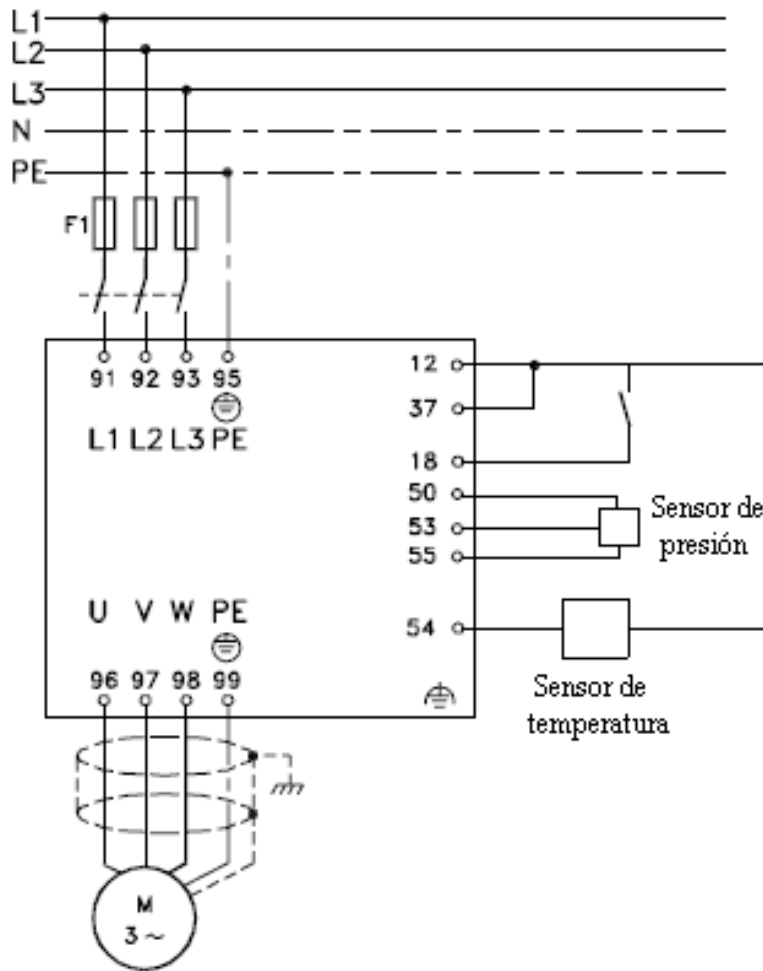


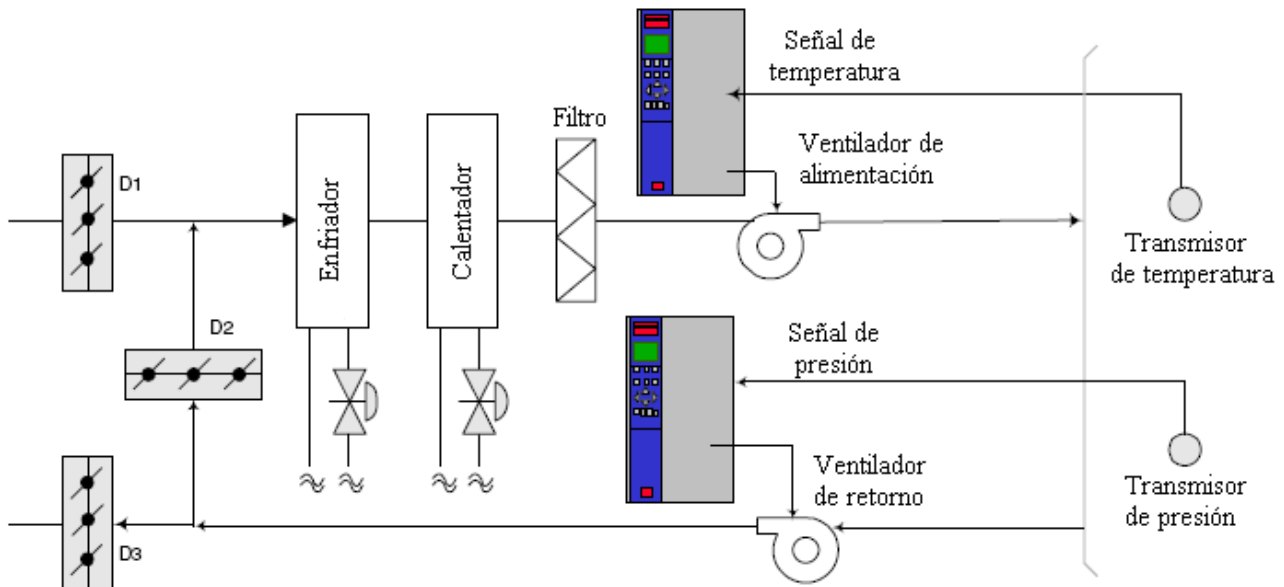
Figura 3.10. Sistema de ventilación.

Para el caso de un sistema de ventilación como el de la figura 3.10 se tiene que:

1. Arranque/paro mediante el interruptor conectado entre los terminales 12 y 18.
2. Realimentación de temperatura a través de un sensor de temperatura (-10 a 40°C, 4-20 mA) conectado a la terminal 54.
3. La presión del sistema es obtenida mediante un sensor de presión conectado a las terminales 50, 53 y 55.
4. El motor M de la manejadora de aire debe de ir conectado a las terminales 96, 97, 98 y 99, U, V, W y tierra, respectivamente.
5. La alimentación trifásica se conecta a 91, 92, 93 y 95, L1, L2 L3 y tierra, respectivamente.

Los sistemas centralizados de ventilación se utilizan para abastecer grandes zonas comunes con la mínima cantidad de aire acondicionado, se pueden encontrar en edificios comerciales divididos en varias zonas, en edificios de oficinas, en plantas de producción, entre otros lugares.

En este trabajo se analiza un sistema VAV usado para climatizar un edificio de oficinas, ver figura 3.11.



Fuente. Danfoss®, “Guía de diseño del variador de frecuencia VLT® HVAC”.

Figura 3.11. Sistema centralizado de ventilación VAV.

Los intercambiadores, suelen emplearse para satisfacer los requisitos de calefacción y refrigeración de zonas controladas. En este tipo de casos los variadores de frecuencia permiten obtener importantes ahorros energéticos y, al mismo tiempo, mantener un control de la ventilación adecuado del edificio. Los sensores de temperatura y de presión se utilizan como señal de realimentación para el control PID de los variadores. Estos sistemas funcionan de acuerdo con las condiciones reales de un edificio.

El objetivo principal de la instalación de los variadores de frecuencia en las manejadoras de aire del sistema VAV va más allá del ahorro de energía, con estos dispositivos se tienen, además, los siguientes beneficios: la eliminación de picos de corriente, mejoramiento del factor de potencia, reducción del estrés mecánico de los motores y contar con la debida protección de los motores contra corto circuito, pérdida de fase a la entrada y a la salida, protección térmica del motor, protección contra sobrevoltaje, sobrecorriente y otros beneficios adicionales, tales como prolongación de la vida útil de los equipos accionados por los motores, menor ruido, menor desgaste y control más adecuado.

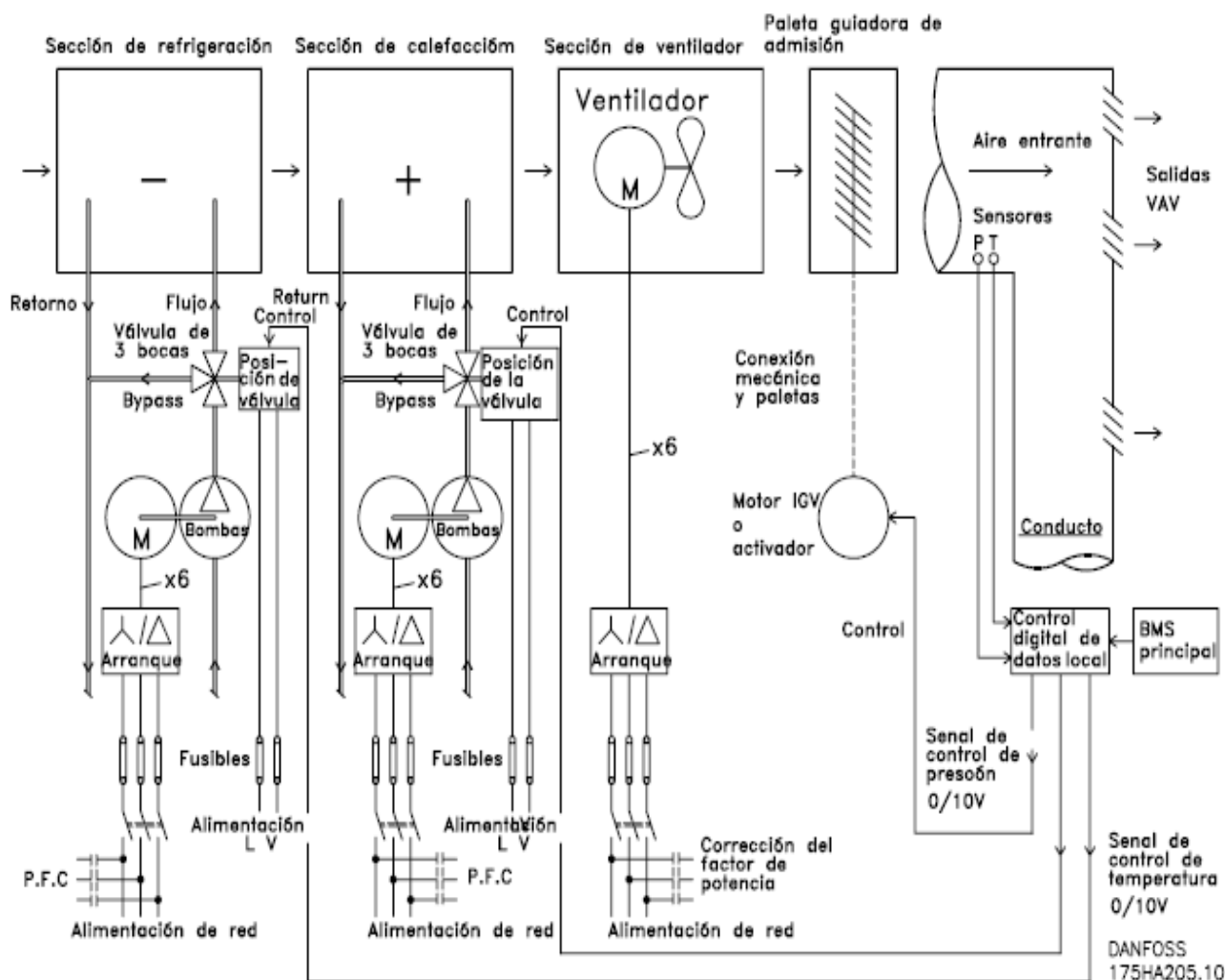
La opción tecnológica que se plantea se ajusta en la gran mayoría de los casos a las características físicas y económicas de los inmuebles, lo que la hace una solución altamente recomendable.

### 3.3 Evaluación de beneficios y viabilidad

Como ya sabemos, los variadores de frecuencia en general son dispositivos que convierten magnitudes fijas de frecuencia, voltaje y corriente de la red eléctrica en magnitudes variables, permitiendo así variar la velocidad y el torque de los motores. Por ello, estos equipos se utilizan cuando en una aplicación de climatización se requiere tener bajo control el sistema de ventilación, como en el caso de las manejadoras de aire de los sistemas centralizados VAV. Estas son solo algunas de las características que como parte de la evaluación debe de cumplir el variador al ser instalado en este tipo de sistemas, pero en adición el variador cuenta con otros beneficios que dan mayor soporte y fiabilidad al sistema. Estos beneficios se mencionan a continuación:

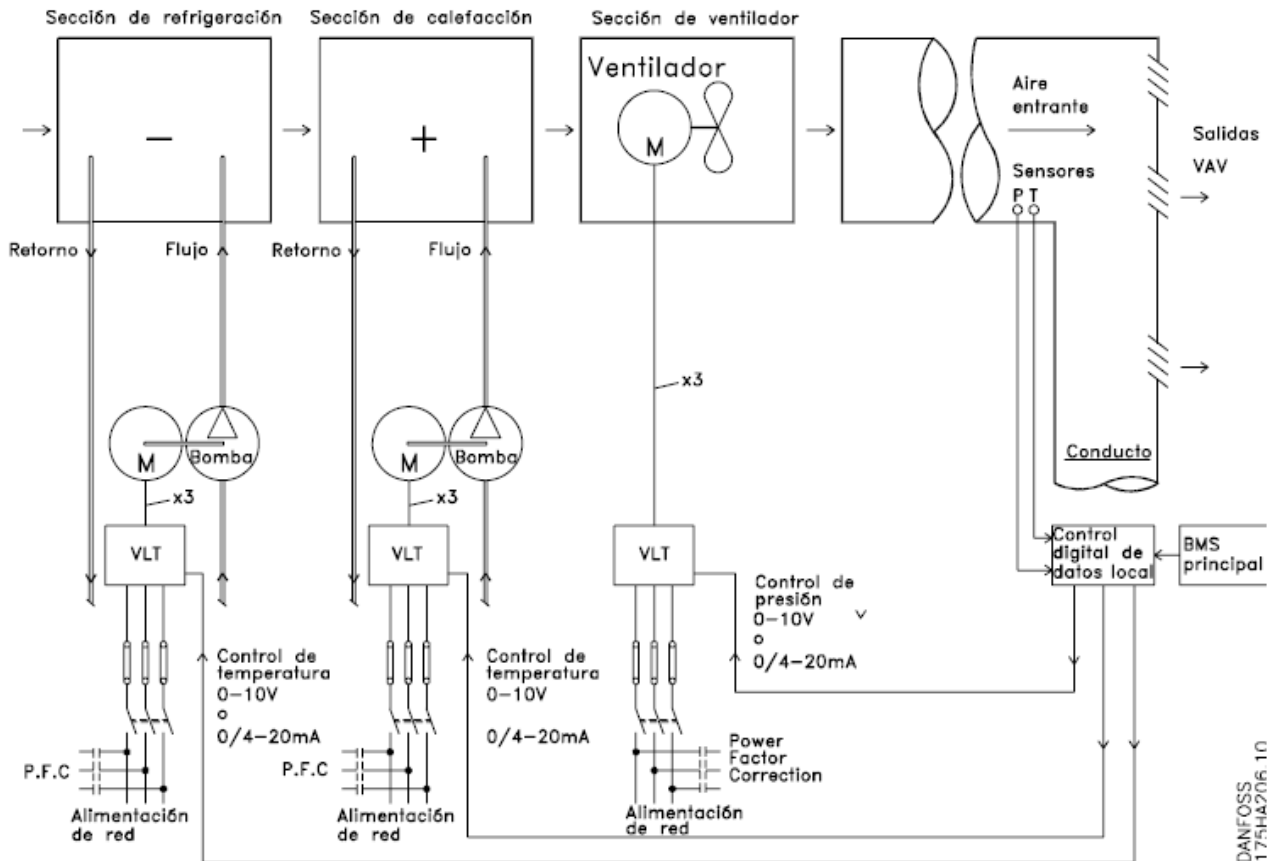
### 3.3.1 Costo

El costo de utilizar un variador de frecuencia no es mayor que los sistemas tradicionales en determinado plazo; como se puede observar en el siguiente ejemplo en el que se muestra esquemáticamente las partes de las que consta un sistema de ventilación tradicional implementado con base en arrancadores estrella/delta, válvulas de estrangulación, dampers o IGV y un sistema de control digital, figura 3.12, en comparación con un sistema de ventilación controlado por variadores de frecuencia, figura 3.13.



Fuente. Danfoss®, “Guía de diseño del variador de frecuencia VLT® HVAC”.

Figura 3.12. Sistema de ventilación sin control por variador de frecuencia.



Fuente. Danfoss®, “Guía de diseño del variador de frecuencia VLT® HVAC”.

Figura 3.13. Sistema de ventilación controlado por variadores de frecuencia.

En la primera opción, figura 3.12, el control del caudal se realiza mediante válvulas, mientras que para la regulación del aire se utiliza un dámper o IGV, con esto el sistema de ventilación mantiene una presión y una temperatura constantes en las tuberías; en la segunda opción utilizando variadores de frecuencia, figura 3.13, se tendrá un ahorro de energía y se reducirá la complejidad de la instalación, ya que no requiere de las válvulas de control del caudal de aire ni del IGV. En lugar de crear un descenso de presión artificial o provocar una reducción en el rendimiento del ventilador, el variador de frecuencia reduce la velocidad del ventilador para proporcionar el flujo y la presión que precisa el sistema.

### 3.3.2 Controlador de lazo cerrado (PID)

El controlador de lazo cerrado, figura 3.14, permite que el variador de frecuencia se convierta en parte integral del sistema controlado. El variador de frecuencia recibe una señal de realimentación desde un sensor en el sistema. A continuación, compara esta señal con un valor de referencia y determina el error, en caso de que lo haya. Finalmente, ajusta la señal de salida para corregir el error.

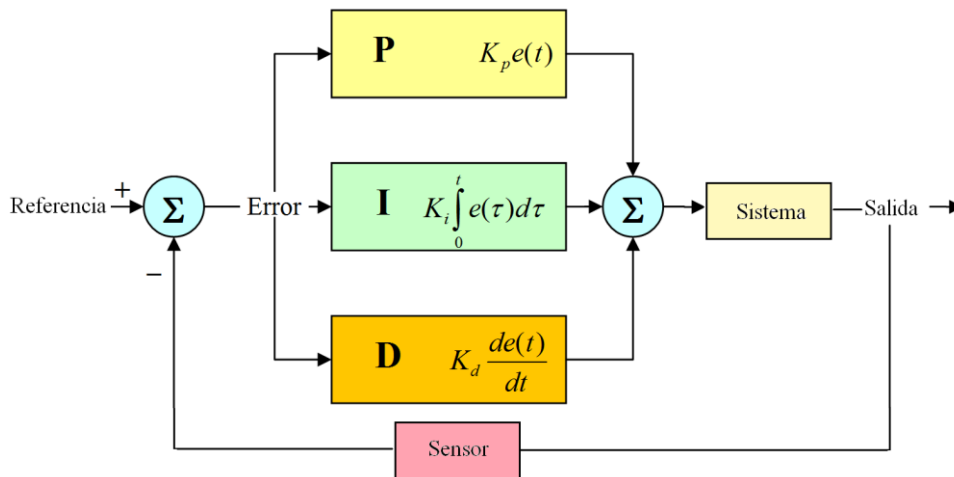


Figura 3.14. Diagrama de bloques de un controlador PID.

Por ejemplo, consideremos un sistema de ventilación donde la velocidad del ventilador de inyección tenga que controlarse de forma que la presión en los ductos sea constante.

El valor deseado de presión estática se suministra al variador de frecuencia como referencia. Un sensor de presión estática mide la presión estática real en el ducto y suministra este dato al variador en forma de señal de realimentación. Si la señal de realimentación es mayor que la referencia, el variador de frecuencia desacelerará al ventilador para reducir la presión. Del mismo modo, si la presión en el ducto es inferior a la referencia, el variador acelerará de forma automática para aumentar la presión suministrada por el ventilador.

### 3.3.3 Control local (Hand On) y remoto (Auto On).

El variador de frecuencia puede accionarse manualmente a través del panel de control local (LCP) o de forma remota a través de entradas analógicas y digitales, así como a través del bus serie que ya viene integrado.

Si se permite, es posible arrancar y parar el variador de frecuencia mediante el LCP utilizando las teclas [Off] (Apagar) y [Hand ON] (Control local). Tras pulsar la tecla [Auto On] (Control remoto), el variador de frecuencia pasa al modo automático y sigue (de manera predeterminada) la referencia remota. En este modo, resulta posible controlar el variador de frecuencia mediante las entradas digitales y diferentes interfaces serie (RS-485, USB o un bus de campo opcional).

### 3.3.4 Arranque del motor.

Cuando se necesita arrancar motores relativamente grandes, es necesario usar equipos que limitan la tensión de arranque. En los sistemas tradicionales, se utiliza con frecuencia un arrancador en estrella/delta o un arrancador suave. Estos arrancadores de motor no se necesitan si se usa un variador de frecuencia. Como se ilustra en la siguiente figura 3.15, un variador de frecuencia no requiere más tensión que la nominal.

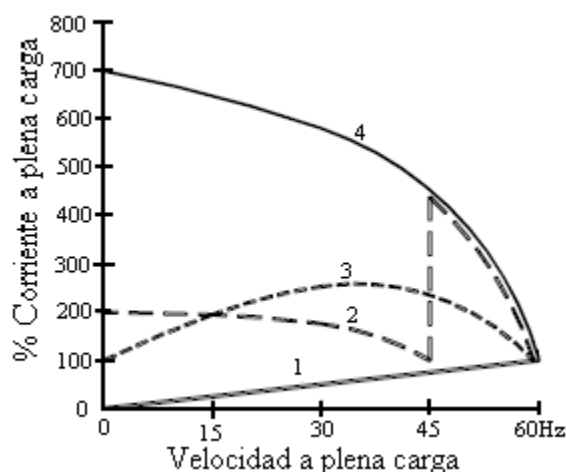


Figura 3.15. Formas típicas de arrancar un motor eléctrico.

1 = Variador de frecuencia.

2 = Arrancador estrella / delta.

3 = Arrancador suave

4 = Arranque directamente con la alimentación de la red.

### 3.3.5 Pre calentamiento del motor.

Para alargar la vida de un motor en un entorno húmedo, puede alimentarse una pequeña cantidad de corriente en el motor para protegerlo de la condensación y de los efectos de un arranque en frío.

### 3.3.6 Arranque suave del motor.

Una aceleración suave del motor reduce el ruido, la intensidad pico, la carga térmica del motor y el estrés mecánico para el sistema. Además, una aceleración suave alarga la vida del motor.

### 3.3.7 Permiso de arranque.

Una señal de “sistema preparado” antes del funcionamiento evita que el variador de frecuencia arranque y garantiza que las compuertas u otros equipos del sistema se encuentren en un estado perfecto antes de arrancar el motor.

### 3.3.8 Re-arranque automático.

La puesta en marcha automática después de una desconexión mejora el funcionamiento automatizado para sistemas controlados de forma remota.

### 3.3.9 Optimización automática de la energía (AEO).

El variador de frecuencia controla de forma continua la relación entre la tensión y la corriente en el motor, ajustando la tensión de salida para minimizar la corriente y maximizar la eficacia del motor y del variador de frecuencia.

### 3.3.10 Compensación de factor de potencia ( $\cos \phi$ ).

En general, un variador de frecuencia con un factor de potencia ( $\cos \phi$ ) igual o muy cercano a 1 proporciona una corrección del factor de potencia del motor, lo que significa que no hay necesidad de considerar al motor cuando se dimensiona la unidad de corrección del factor de potencia.

### 3.3.11 Corte en la alimentación.

Durante un corte en la alimentación, el variador de frecuencia sigue funcionando hasta que la tensión del circuito intermedio desciende por debajo del nivel mínimo para parada. Generalmente, dicho nivel es un 15% inferior a la tensión de alimentación nominal del variador de frecuencia. La tensión de alimentación antes del corte y la carga del motor determinan el tiempo necesario para la parada de inercia del inversor.

### 3.3.12 Cortocircuito (Fase del motor - Fase).

El variador de frecuencia está protegido contra cortocircuitos por medio de la lectura de la intensidad en cada una de las tres fases del motor. Un cortocircuito entre dos fases de salida provoca una sobreintensidad en el inversor. El inversor se cierra individualmente cuando la corriente del cortocircuito sobrepasa el valor permitido.

### 3.3.13 Filtros de salida.

La conmutación de alta frecuencia del variador produce algunos efectos secundarios, como armónicos, ruido y distorsión de alta frecuencia, que influyen en el motor y en el entorno circundante. Estos efectos secundarios son tratados por dos tipos de filtros diferentes, el filtro  $dU/dt$  y el filtro de onda senoidal.

#### ➤ *Filtros $dU/dt$*

La fatiga del aislamiento del motor es causada por la combinación del incremento rápido de tensión y de la corriente. Los cambios rápidos en la energía pueden también reflejarse en la línea de CC del variador, y causar su apagado. El filtro  $dU/dt$  está diseñado para reducir el tiempo de incremento de tensión y el cambio rápido de energía en el motor, y mediante dicha intervención evitar el envejecimiento prematuro y las descargas eléctricas en el aislamiento del motor.

#### ➤ *Filtros senoidales*

Los filtros senoidales están diseñados para dejar pasar sólo las bajas frecuencias. Las frecuencias altas son, por lo tanto, derivadas, lo que da como resultado una forma de onda de tensión sinusoidal de fase a fase, y formas de ondas de corriente sinusoidales.

Con las formas de onda sinusoidales, ya no es necesario el uso de motores especiales para variadores de frecuencia con aislamiento reforzado. El ruido acústico del motor también resulta amortiguado como consecuencia de la condición de onda.

Además de las funciones del filtro  $dU/dt$ , el filtro de onda senoidal reduce la fatiga del aislamiento y las corrientes en los rodamientos del motor, lo que da como resultado una vida más larga del motor e intervalos de mantenimiento más espaciados. Los filtros de onda senoidal permiten el uso de cables de motor más largos en aplicaciones en que éste está instalado lejos del variador de frecuencia. Desafortunadamente, la longitud está limitada porque el filtro no reduce las corrientes de fuga en los cables.

### **3.3.14 Bypass de frecuencia.**

Con la implementación del variador de frecuencia se ejerce un control sobre el motor del ventilador de la manejadora de aire que hace que evite aquellas velocidades que provocarían vibraciones mecánicas, evitando así posibles daños en los componentes mecánicos en el sistema.

### **3.3.15 Sistema de medición.**

El panel de control local (LCP) del variador de frecuencia puede utilizarse para visualizar muchas variables de funcionamiento del variador o sistema, incluyendo kWh, horas de funcionamiento, presión estática en los conductos, temperatura de retorno del aire, etc.

### **3.3.16 Modo de reposo.**

El variador de frecuencia detiene automáticamente el funcionamiento del ventilador cuando la temperatura del aire permanece a un nivel constante durante un periodo predeterminado.

### **3.3.17 Reloj de tiempo real.**

El reloj de tiempo real lleva a cabo acciones predefinidas. Se trata de una potente herramienta para el control de sistemas, donde los variadores de frecuencia no están conectados a un sistema de monitoreo a distancia, de gestión de edificios (BMS) o si el variador de frecuencia se utiliza como un componente inteligente.

### **3.3.18 Mantenimiento preventivo.**

En la memoria del variador de frecuencia pueden programarse hasta 20 acciones como recordatorio para garantizar que se realice un mantenimiento planificado a las instalaciones y así contar con un sistema más fiable.

De manera superficial, un variador de frecuencia suele verse como un simple gasto de capital. Sin embargo, su rentabilidad óptima se percibe realmente cuando el variador de frecuencia adicionado con todas sus características se ha integrado totalmente en el sistema.

## **3.4 Características y requerimientos**

De las principales características que se debe de tomar en cuenta al proyectar el uso de variadores de frecuencia es la reducción de potencia al utilizarlos con bajas presiones atmosféricas, a bajas velocidades, con cables de motor largos, con cables de gran sección o a temperaturas ambiente elevadas; acerca de lo cual a continuación damos una explicación.

### **3.4.1 Reducción de potencia debido a la temperatura ambiente<sup>11</sup>.**

La media de temperatura ( $T_{AMB, AVG}$ ) calculada durante un período de 24 horas debe ser, como mínimo, 5 °C inferior a la máxima temperatura ambiente permitida para el variador ( $T_{AMB, MAX}$ ). Esto es, el variador de frecuencia soporta temperaturas como máximo de 50°C (122°F) y como mínimo 0°C (32°F), con estas consideraciones la temperatura ambiente de trabajo del variador de frecuencia no debe de sobrepasar los 45°C. Si el variador de frecuencia se utiliza a temperaturas ambiente elevadas, deberá reducirse la intensidad de salida constante.

---

<sup>11</sup> Para mayor información consultar el apéndice C



### 3.4.2 Reducción de potencia debido a funcionamiento a velocidad bajas.

Al conectar un motor a un variador de frecuencia, es necesario comprobar si la ventilación del motor es adecuada.

Se puede producir un problema con velocidades bajas en aplicaciones de par constante. El ventilador del motor tal vez no pueda suministrar el volumen de aire necesario para el enfriamiento, y esto limita el par admisible. Por lo tanto, si se va a hacer funcionar el motor constantemente a una velocidad inferior a la mitad del valor nominal, debe recibir aire adicional para su enfriamiento (o debe utilizarse un motor diseñado para este tipo de funcionamiento).

Una alternativa es reducir el nivel de carga del motor eligiendo un motor más grande. No obstante, el diseño del variador de frecuencia establece un límite en cuanto al tamaño del motor.

### 3.4.3 Reducción de potencia debido a la baja presión atmosférica<sup>12</sup>.

La capacidad de refrigeración del aire disminuye en caso de baja presión atmosférica. Por debajo de 1000 m de altitud, no es necesaria ninguna reducción, pero por encima de los 1000 m, la temperatura ambiente ( $T_{AMB}$ ) o la intensidad de salida máxima ( $I_{out}$ ) deben reducirse de acuerdo con el diagrama mostrado en la figura 3.16.

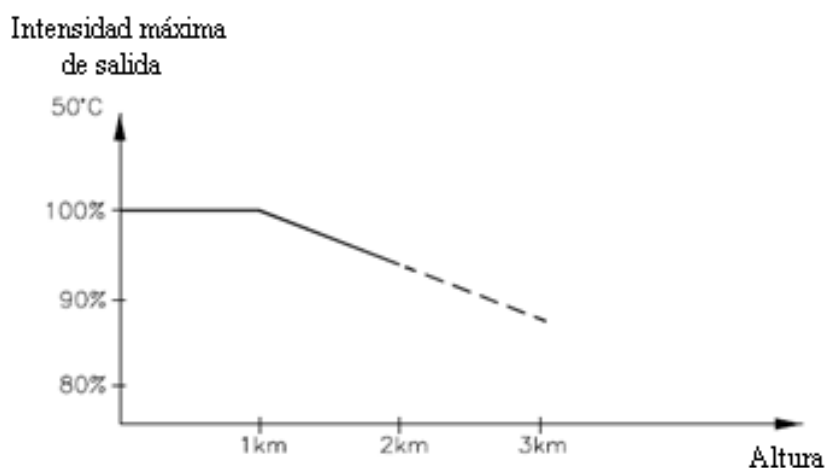


Figura 3.16. Reducción de la intensidad de salida en relación con la altitud a  $T_{AMB, MAX}$ .

Para altitudes superiores a 2 Km, una alternativa es contar con un sistema de refrigeración que reduzca la temperatura ambiente, lo que garantiza el 100% de intensidad de salida.

### 3.4.4 Reducción de potencia por la instalación de cables de motor largos o de mayor sección<sup>13</sup>.

La longitud máxima de cable para este variador de frecuencia es de 300 m de cable no blindado y de 50 m de cable blindado.

El variador de frecuencia se ha diseñado para funcionar utilizando un cable de motor con una determinada sección. Si se utiliza otro cable con una sección mayor, reduzca la intensidad de salida

<sup>12</sup> Para mayor información consultar el apéndice C

<sup>13</sup> Para mayor información consultar el apéndice C

en un 5% por cada paso que se incremente la sección del cable. (Una mayor sección del cable produce una mayor capacidad a tierra, y con ello, una mayor corriente de fuga a tierra).

### **3.4.5 Criterios generales de selección.**

Las principales cuestiones que hay que considerar son:

- Verificar la tensión de suministro y las tensiones nominales del variador y del motor.
- Seleccionar el variador adecuado a la potencia nominal del motor.
- Comprobar que la corriente nominal del variador sea igual o mayor que la del motor seleccionado.
- Poner atención a los casos especiales de momento de arranque o de momento máximo.
- Debe comprobarse el intervalo de velocidad requerido y el que puede proporcionar el variador.
- La velocidad máxima permisible del motor no se puede exceder (esto se debe verificar con las normas).
- Analizar si hay necesidades especiales en cuanto al medio ambiente.
- Debe comprobarse el sistema de tierra del motor y del equipo accionado.
- Verificar técnica y económicamente si un sistema separado de enfriamiento reduce el tamaño del motor y, consecuentemente, el tamaño del variador.
- A altas velocidades debe prestarse especial atención a la construcción de los rodamientos, la lubricación, el ruido del ventilador, el balanceo, las velocidades críticas, los sellos de los ejes y el momento máximo del motor.
- A bajas velocidades debe evaluarse la lubricación de los rodamientos, la ventilación del motor y el ruido electromagnético.

### **3.5 Análisis financiero: Costo/Beneficio**

La eficiencia energética sólo tiene sentido en la medida que permite reducir los costos globales de producción. Ello implica considerar, no sólo el costo total de los equipos nuevos, en el caso de reemplazar los equipos ya existentes, sino tomar en cuenta los costos diferenciales de operación y mantenimiento de los equipos eficientes respecto de los normales, las diferencias de productividad entre ambas opciones y demás cuestiones implicadas.

Para realizar un análisis fiable del costo nos valdremos de una potente herramienta de diseño, el software Energy box<sup>®</sup> desarrollado por Danfoss<sup>®</sup>, el cual permite calcular el consumo de energía de los ventiladores usados por las manejadoras de aire en los sistemas de climatización y hacer comparaciones con otros sistemas de climatización y métodos alternativos de control de flujo. Esta herramienta brinda muchas ventajas en su uso, ya que puede ser utilizada para proyectar, con la mayor precisión posible, los costes y el ahorro en el uso de unidades de climatización.

Para llevar a cabo este análisis se necesitan algunos valores característicos del sistema en cuestión, estos son muy importantes ya que son valores propios de diseño y de su correcta elección dependerá la funcionalidad que tenga el sistema al momento de su implementación. Esto es, para un sistema centralizado de volumen de aire variable (VAV) que conste de dos variadores de frecuencia (no se considera la instalación de los ductos, puesto que el análisis se basa en el hecho de que se pretende hacer más eficiente un sistema de climatización de volumen de aire constante (VAC) ya existente), uno para el ventilador de suministro y otro para el ventilador de retorno, se tiene los siguientes valores:

- Presión de diseño (Design head): La presión total de diseño es de 5 cmwg (centímetros de agua).

- Referencia estática (Set point static head): La presión estática dentro de los ductos es de 0.75 cmwg.
- Potencia transmitida (Shaft power): La potencia transferida a la banda del ventilador es de 11 kW, se considera que no hay pérdidas en la banda.
- Caída de presión (Removed pressure drop): Las pérdidas de presión en los ductos son equivalentes a 0.01 cmwg (centímetros de agua).
- Potencia del motor (Motor power): La potencia de cada uno de los motores es de 11kW.
- Eficiencia del motor (Motor efficiency): La eficiencia de los motores es de 90%.
- Potencia del variador de frecuencia (Drive power): La potencia del variador es de 11kW, igual o superior que la del motor.
- Eficiencia del variador de frecuencia (Drive efficiency): La eficiencia del variador, 98%, es una característica de diseño que se reporta en la hoja de características del variador seleccionado, ver apéndice C.
- Costo del variador de frecuencia (Drive cost): El costo en dólares de los variadores instalados asciende a \$6817, debido a que son dos variadores y el costo por variador es \$2938 + IVA.

$$\begin{array}{r}
 2938.0 \\
 \underline{\times 1.16} \\
 3408.08 \\
 \underline{\times 2} \\
 6816.16
 \end{array}$$

- Costo por kWh (Cost per kWh): El costo en dólares del kWh es de \$0.092. Para hacer la conversión a dólares se toma \$12.60 pesos el valor de cambio del dólar y en la tabla 3.1 ubicamos que para la región central de México el costo por consumo de energía eléctrica por kWh es \$1.159 pesos, con esto hacemos la siguiente operación.

$$1.159 / 12.60 = 0.09198$$

Región	Cargo por kilowatt de demanda máxima media	Cargo por kilowatt – hora de energía Consumida
Baja California	\$130.13	\$1.159
Baja California Sur	\$144.12	\$1.565
Central	\$147.22	\$1.159
Noreste	\$135.36	\$1.083
Noroeste	\$138.18	\$1.073
Norte	\$135.91	\$1.083
Peninsular	\$151.98	\$1.106
Sur	\$147.22	\$1.120

Fuente. <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>

Tabla 3.1. Tarifas eléctricas por zona.

- Incentivos de utilidad (Utility incentive): Es la utilidad por bajo consumo en dólares, \$0.00 ya que en México no hay incentivos por consumo.

- Horas por día (Hours per day): Se consideran 12 horas de operación por día.
- Días por semana (Days per week): 5.5 días de operación por semana.
- Semanas por año (Weeks per year): 52 semanas de operación por año.
- Tiempo total de operación (Total operating time): Tiempo total de operación por año en horas.
- Ciclo de trabajo (Duty cycle): El ciclo de trabajo de los motores se fija con base en estudios de operación, necesarios para saber las velocidades de operación adecuadas. Para este caso se fijó el ciclo de trabajo de la siguiente manera, figura 3.17:

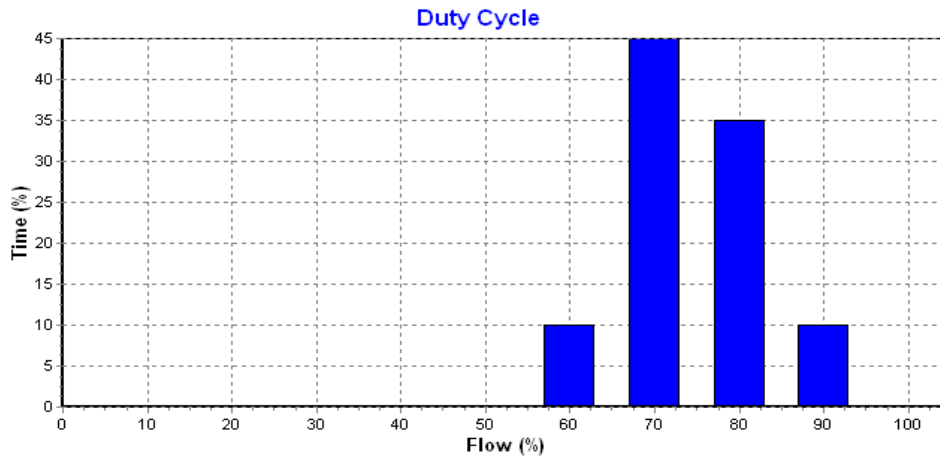


Figura 3.17. Ciclo de trabajo para una manejadora de aire de un sistema VAV.

Este ciclo de trabajo representa porcentualmente la distribución de las horas de trabajo del motor, esto es, del 100% de tiempo que el motor va a estar funcionando, este funcionará un 10% al 60% de su capacidad, un 45% al 70% de su capacidad, un 35% al 80% de su capacidad y un 10% al 90% de su capacidad, así si consideramos que el motor funcionará 3432 horas por año, el motor funcionará 343.2 hrs por año al 60% de su capacidad, 1544.4 hrs por año al 70% de su capacidad, 1201.2 hrs por año al 80% de su capacidad y 343.2 hrs por año al 90% de su capacidad, respectivamente.

Con estos datos se llenan los recuadros de la pantalla principal del Energy box<sup>®</sup>, la cual queda de la siguiente manera, ver figura 3.18:

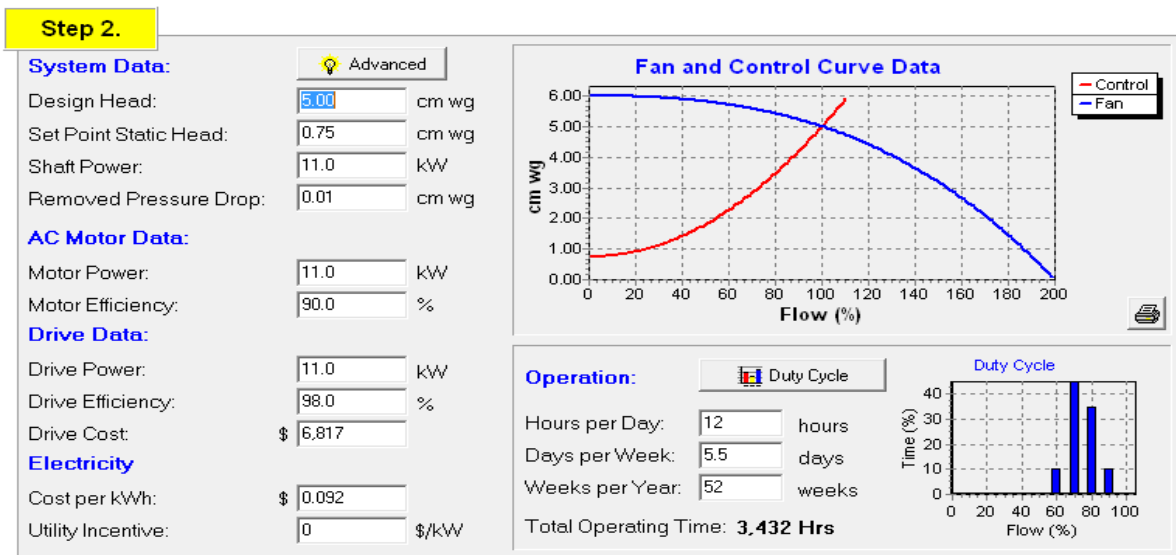


Figura 3.18. Pantalla principal del Energy box®.

Se puede observar que al llenar las casillas aparece la gráfica “Fan and Control Curve Data”, figura 3.19. Esta es la representación del punto de trabajo de nuestro sistema, tomando como base la curva característica del ventilador y la gráfica del caudal que estará presente en el sistema.

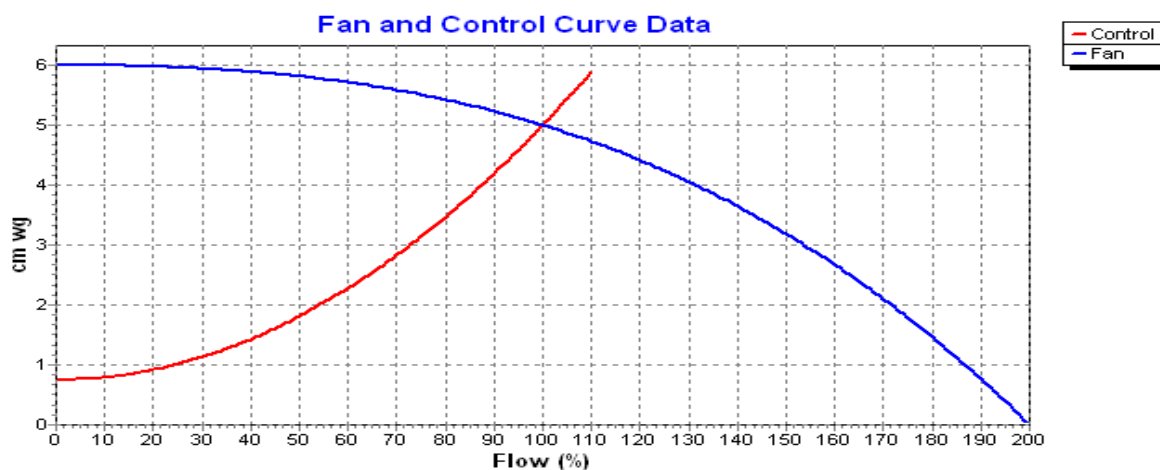


Figura 3.19. Punto de trabajo del ventilador centrífugo.

La curva característica, figura 3.20, se utiliza para conocer el punto en que trabajará el ventilador, para esto se fija una determinada pérdida de carga que debe vencer el mismo y se señala sobre el eje de las ordenadas en cmwg. En el eje de las abscisas se indica el rendimiento equivalente, es decir, el caudal que proporciona el ventilador para una determinada presión.

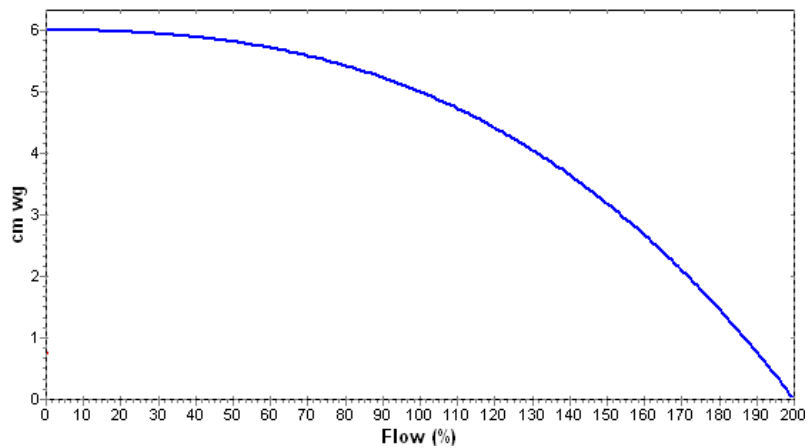


Figura 3.20. Curva característica del ventilador centrífugo.

A partir de aquí se fija la presión de trabajo y se traza una línea horizontal que llegue a cortar la curva característica del ventilador en un punto, de este punto mediante una línea vertical llegaremos a cortar el eje de las abscisas, en donde nos indicará el caudal que proporcionará el ventilador en cuestión, trabajando contra la pérdida de carga que hemos considerado inicialmente.

Por ejemplo, para nuestro caso en que el ventilador debe vencer 5 cmwg, a partir de este valor sobre el eje de las ordenadas, con una horizontal cortaremos la curva en el punto de trabajo y de aquí, con una vertical que se prolongue hasta el eje de las abscisas encontraremos que nos da el 100% de caudal.


Además, como disponemos de las pérdidas que tiene el sistema, se puede encontrar de forma fácil el punto de trabajo del ventilador sin más que superponer las curvas características del ventilador y la curva de presión del sistema, en la que se parte de la base de que en las instalaciones de ventilación la pérdida de carga que se origina varía proporcionalmente al cuadrado del caudal que fluye a través de la canalización, según se indica en la figura 3.19.

Como siguiente paso en nuestro análisis se tiene que fijar una referencia para hacer la comparación. Así, se toma un sistema de volumen de aire constante (VAC) como sistema de comparación, de entre las posibles opciones se escoge está por la similitud que guarda con un sistema VAV, ver figura 3.21.

**Step 3.**

**Compare Drive System to:**

- Constant Volume
- Cycling
- Inlet Guide Vanes
- Outlet Dampers



Select a conventional system that you would like to compare against the Danfoss Drive System.

Figura 3.21. Cuadro de comparación.

La fijación de costos se realiza en el paso 4, figura 3.22, en donde ya no se toma en cuenta el costo del sistema, sino que ahora se toman en cuenta los costos de instalación, de puesta en marcha, los costos equivalentes al mantenimiento y al equipo adicional que pueda ser necesario al momento de la implementación y que no haya sido considerado.

**Step 4.**

Initial Cost, Comparison System		Initial Costs, Drive System	
Installation	\$ 1.350	Installation	\$ 800
Startup	\$ 150	Startup	\$ 100
Equipment	\$ 600	Equipment	\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	+		+
	<b>\$ 2.100</b>		<b>\$ 900</b>
Annual Costs, Comparison System		Annual Costs, Drive System	
Maintenance	\$ 350	Maintenance	\$ 0
Other	\$ 200		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	+		+
	<b>\$ 550</b>		<b>\$ 0</b>

Figura 3.22. Costos de implementación.

En el paso 5, figura 3.23, se muestran los resultados. En el recuadro “System Flow Requirements” se muestran las horas totales de operación del sistema distribuidas según el ciclo de trabajo propuesto en el paso 2. Los otros dos recuadros muestran el consumo, en kWh, de cada uno de los sistemas en cuestión distribuidos según el ciclo de trabajo del paso 2.

**Step 5. Energy Calculations**

System Flow Requirements			Constant Volume System		Danfoss Drive System	
System Flow %	Annual Operating Time		Power Required kW	Annual Energy Use kWh	Power Required kW	Annual Energy Use kWh
	%	hrs				
100	0	0	12	0	12	0
90	10	343	12	4.195	10	3.304
80	35	1.201	12	14.681	7	8.821
70	45	1.544	12	18.876	6	8.524
60	10	343	12	4.195	4	1.402
50	0	0	12	0	3	0
40	0	0	12	0	2	0
30	0	0	12	0	2	0
20	0	0	12	0	1	0
10	0	0	12	0	1	0
<b>Total:</b>		3.432	<b>Total:</b> 41.947		<b>Total:</b> 22.051	

Figura 3.23. Energía consumida bajo un ciclo de trabajo propuesto.

En la figura 3.24 se muestra una comparación de la energía consumida según los ciclos de trabajos propuestos para ambos sistemas.

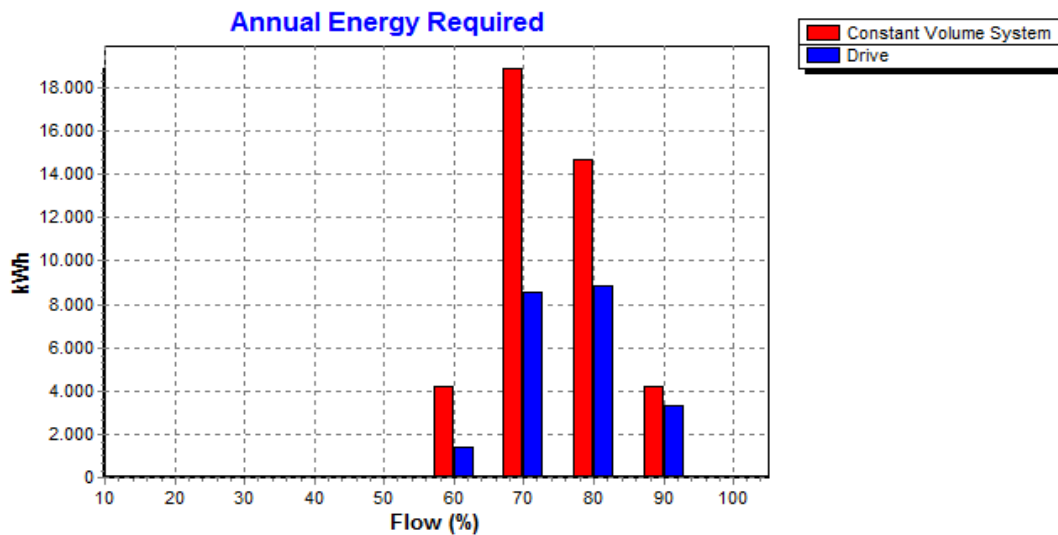


Figura 3.24. Energía consumida bajo un ciclo de trabajo propuesto.

En el paso 6, figura 3.25, se muestran dos recuadros, el primero no es más que un cuadro resumen de los costos de cada sistema y en el segundo se muestran los costos netos y el tiempo de retorno de la inversión.



**Step 6. Energy Savings**

Individual System Costs		Drive System Cost Comparison	
<b>Constant Volume System</b>		<b>Net Cost Savings</b>	
Initial Cost:	\$ 2.100	Drive System Inc. Initial Cost:	\$ 5.617
Annual Energy Cost:	\$ 3.859	Utility Incentive:	\$ 0
Other Annual Cost:	\$ 550	Annual Energy Cost Savings:	\$ 1.830
<b>Drive System</b>		Other Annual Cost Savings:	\$ 550
Drive Cost:	\$ 6.817	* Initial cost includes drive cost	
Initial Cost:	\$ 900	<b>Drive System Payback</b>	
Annual Energy Cost:	\$ 2.029	Simple Payback Time:	2.36 Years
Other Annual Cost:	\$ 0		

*Figura 3.25. Cuadro resumen.*

El tiempo de retorno de la inversión que se observa en el recuadro de la derecha es calculado haciendo la comparación con un sistema de volumen de aire constante, esto es:

Costo del variador: \$6817

Diferencia de los costos de operación e instalación: \$2100 - \$900 = \$1200

Valor del ahorro anual de energía: \$1830

Ahorro del mantenimiento: \$550

Con estos valores se calcula de la siguiente manera el tiempo de retorno de la inversión comparado con el sistema VAC.

$$(6817-1200)/(1830+550)=2.36$$

De esta manera, el tiempo de retorno se calcula comparando el sistema de aire constante con el sistema de aire variable con variador de frecuencia en el que se tienen ahorros por instalación y mantenimiento.

Ahora bien, si lo que queremos es obtener el tiempo de retorno de la inversión sin tomar en cuenta ningún sistema como comparación, el análisis quedaría de la siguiente manera:

Costo del variador: \$6817

Costo de operación e instalación: \$900

Valor del ahorro anual de energía: \$1830

$$(6817+900)/1830 = 4.2$$

Se puede observar que el tiempo de retorno de la inversión aumenta considerablemente, puesto que no se toma en cuenta ningún sistema como referencia para el ahorro de capital. Este tipo de análisis se lleva a cabo cuando no se trata de hacer más eficiente un sistema ya existente, sino cuando se instala desde un principio un sistema VAV controlado por variadores de frecuencia.

Dado que para la evaluación de los beneficios relativos de las inversiones en eficiencia energética se requiere determinar los costos anuales de capital involucrados en las distintas alternativas, a continuación se presenta una grafica anualizada, figura 3.26, que muestra el tiempo de recuperación de la inversión.

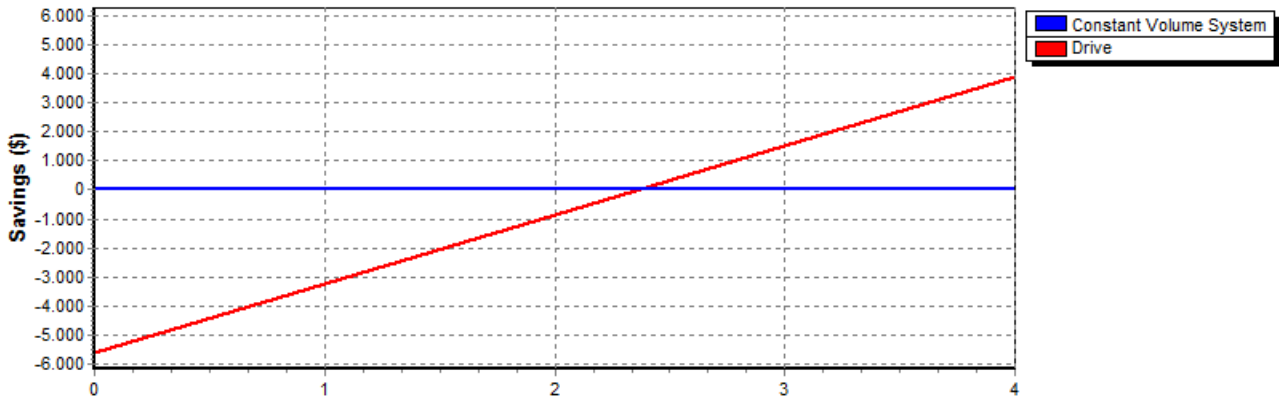


Figura 3.26. Tiempo de recuperación de la inversión.

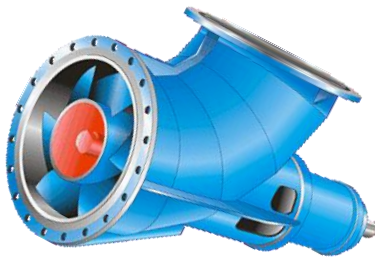
Al analizarlo se percibe un panorama alentador, si consideramos el tiempo de vida de los variadores de frecuencia que rebasa los 15 años, vemos que, después de los dos años prácticamente el costo del variador se justifica con los ahorros de energía que trae consigo.

Cabe mencionar que este análisis es una comparación entre dos tipos diferentes de operación del mismo sistema, por lo que el ahorro de energía también está sujeto a la eficiencia del sistema de volumen de aire constante (VAC).

Invertir en eficiencia energética supone un gasto de capital inicial, sin embargo, en corto tiempo, se tendrán los beneficios tanto económicos como ecológicos.

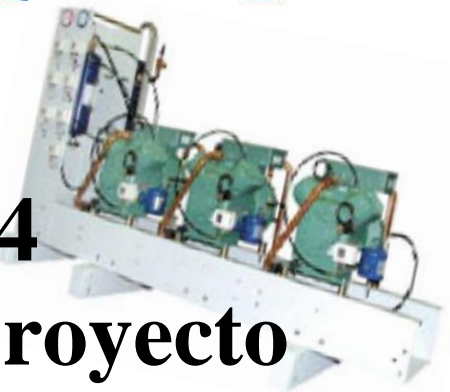
Del análisis anterior concluimos lo siguiente.

1. El ahorro de energía es proporcional a las horas de operación del equipo, si la operación del sistema es mínima el tiempo de retorno de la inversión se dispara.
2. El ciclo de trabajo es una parte fundamental de ahorro de energía, gracias a las leyes de la proporcionalidad mientras el ciclo se encuentre más cargado a la zona de menor flujo, más ahorros se tendrán.
3. La vida del variador de frecuencia rebasa los 15 años, por lo que el ahorro de energía y el ahorro económico que esto supone es de gran relevancia para tomar la decisión de instalar un variador.
4. Su impacto ecológico es importante, ya que al ahorrar en el consumo de energía implícitamente, los recursos naturales explotados para generarla no son consumidos y, por ende, disminuye la generación de gases contaminantes.



## Capítulo 4

# Análisis de un proyecto de bombas centrífugas.



Anteriormente, en el capítulo 3, se analizó un proyecto con base en un sistema de aire acondicionado, en este capítulo se analizará un proyecto para el control de bombas centrífugas de agua, por lo que primero plantearé las bases de los tipos de bombas hidráulicas y de los sistemas de bombeo de agua. Una vez que se tengan los conceptos básicos acerca de estos sistemas, su composición y su comportamiento realizaremos el análisis costo beneficio del proyecto.

#### 4.1 Conceptos y definiciones básicos.

Para entender el sistema, primero repasaremos algunos conceptos básicos relacionados con las bombas hidráulicas.<sup>14</sup>

Presión.- La definición básica de presión es fuerza por unidad de área, comúnmente en hidráulica se expresa como libras por pulgada cuadrada.

Presión atmosférica.- Es la fuerza ejercida en una unidad de área por el peso de la atmosfera.

Gasto.- Es la cantidad de fluido (volumen) que proporciona una bomba en una unidad de tiempo...

Carga.- Es una medida de presión, normalmente expresada en metros o pulgadas de agua (*inwg*).

Carga estática.- Es la diferencia de la altura entre la succión y la descarga, esta carga debe ser vencida por la bomba para mover el fluido.

Carga dinámica.- Es la pérdida de presión a través de una tubería o sistema debida al flujo de agua, y solo se presenta cuando la bomba se encuentra en operación.

Carga neta positiva de succión (NPSH, por sus siglas en inglés "Net Positive Suction Head").- Es la condición mínima de presión requerida por la bomba en la boquilla de succión. Si en algún momento durante la operación se tiene en la línea de succión una presión menor al NPSH requerido por la bomba, el estado del fluido dentro de la bomba puede cambiar de líquido a vapor

A continuación hablaremos de los diferentes tipos de bombas. Una clasificación de las bombas es, de acuerdo, a su mecanismo de accionamiento:

➤ Clase de mecanismo<sup>15</sup>

1. Impulsor
  - Centrifuga
  - Propulsor
  - Turbina
2. Cámara de cigüeñales
  - Guías
  - Disco oscilante
3. Cámara de engranes
  - Lóbulos dobles
  - Behrens
  - Tornillo
4. Reciprocante
  - Pistón
  - Diafragma
5. Misceláneo

<sup>14</sup> Waukesha Cherry-Bunerll (2000). Engineering Manual. USA: autor. pp 13-20

<sup>15</sup> R. Sherwood, David & J. Whistence, Dennis (1991). The pipin guide. USA: Construction Trade Press pp 40, 41.

- Moyno
- Peristáltico

Cada una de estas bomba tiene un propósito en particular, dependiendo del tipo de fluido, para nuestro estudio nos basamos en la bomba centrífuga, ya que ésta cumple con las leyes de la afinidad.

Para conocer un poco más de la bomba centrífuga, estudiaremos generalidades de la misma y de las variables que se presentan en los sistemas de bombeo.

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de la clasificación de las bombas.

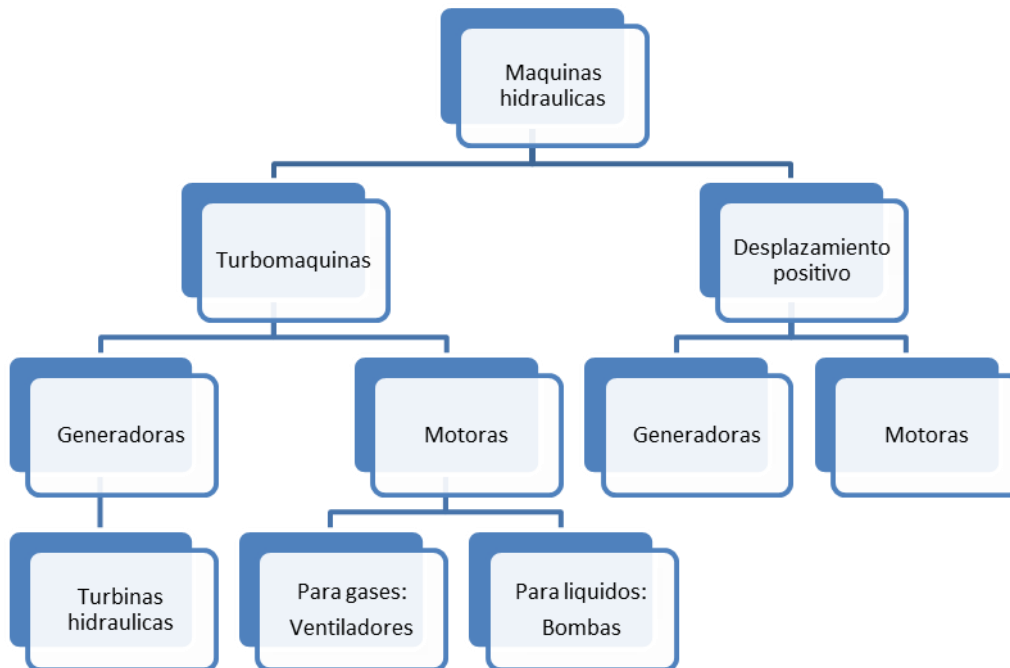


Figura 4.1 Clasificación de máquinas hidráulicas.

La bomba se define como una máquina que absorbe *energía mecánica* y restituye al líquido que la atraviesa, *energía hidráulica*.

Las bombas se emplean para impulsar toda clase de líquidos, incluso algunos con sólidos en suspensión. Las bombas se clasifican en:

1. Las Bombas turbomáquinas o rotodinámicas- Estas son siempre rotativas y su órgano transmisor de energía se llama rodete.
2. Bombas de desplazamiento positivo.

Clasificación de las bombas rotodinámicas.

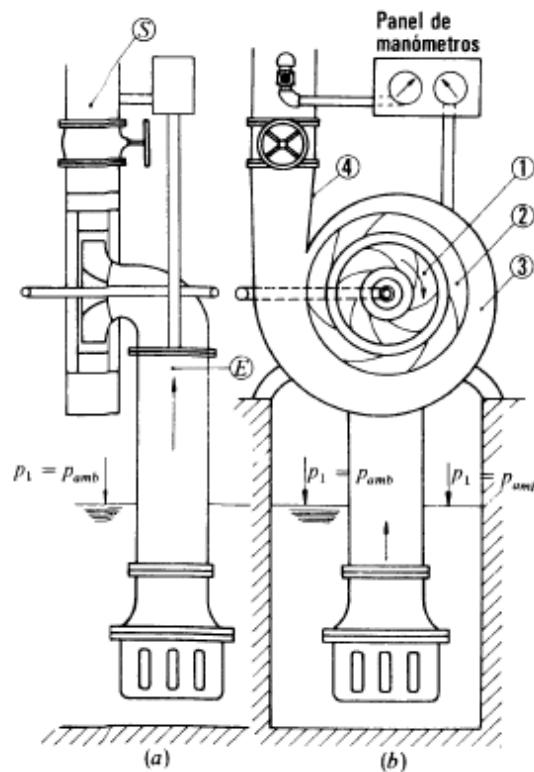
- Según la dirección del flujo: bombas de flujo radial, de flujo axial y de flujo radioaxial.
- Según la posición del eje: Bombas de eje horizontal, de eje vertical y de eje inclinado.
- Según la presión engendrada: Bombas de baja presión, de media presión y de alta presión.
- Según el número de flujos en la bomba: de simple aspiración o un flujo y de doble aspiración o de dos flujos.
- Según el número de rodets: De un escalonamiento o de varios escalonamientos.

Entre las bombas rotodinámicas está la bomba centrífuga. A continuación describiremos la bomba centrífuga o bomba radial de eje horizontal (figura 4.2) y se mostraran sus partes en la figura 4.3.

- Rodete (1), es el elemento que gira con el eje de la máquina y consta de un cierto número de alabes que imparten energía al fluido en forma de energía cinética y presión.
- Corona directriz (2), recoge el líquido del rodete y transforma la energía cinética comunicada por el rodete en presión. Este elemento no se presenta en todas las bombas por que encarece su construcción; aunque hace a la bomba más eficiente.
- Caja espiral (3), es la parte que transforma la energía dinámica en presión, y recoge el fluido que sale del rodete, conduciéndolo hasta la tubería de salida o tubería de impulsión.
- Tubo difusor troncocónico (4), realiza una tercera etapa de difusión, o sea de transformación de energía dinámica en presión.



Figura 4.2 Bomba centrífuga comercial.



Fuente: Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Mataix, Claudio.  
Figura 4.3 Elementos que constituyen a una bomba centrífuga  
a) Vista lateral b) Vista frontal.

## 4.2 Definición del proyecto.

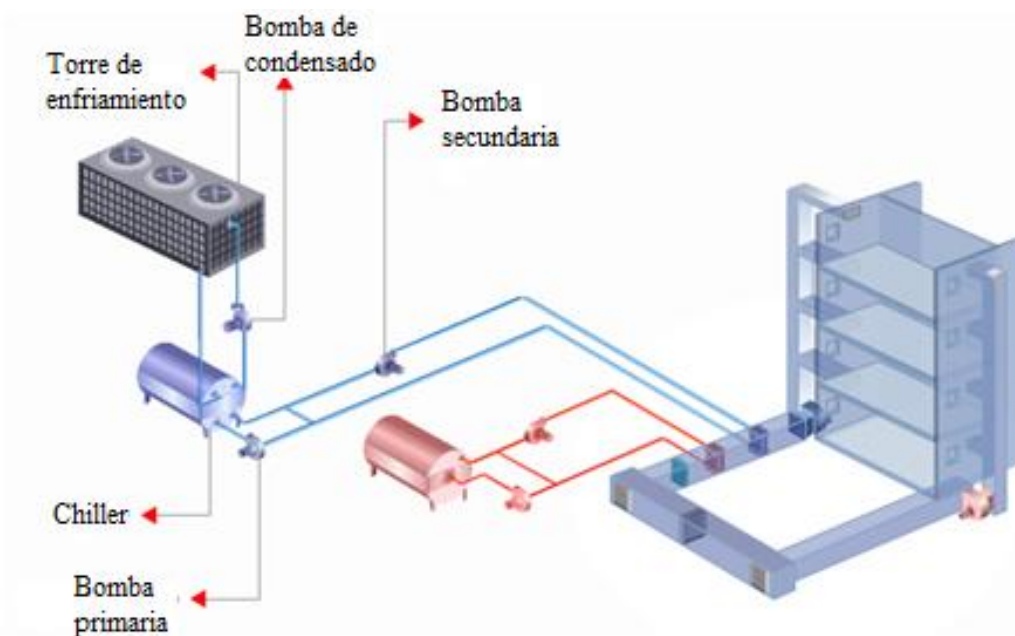
En los sistemas de aire acondicionado, como el mencionado en el capítulo anterior, el aire que es inyectado a los recintos a climatizar, se enfría mediante agua helada proporcionada por enfriadores (chillers), esta agua tiene que ser transportada por todo el sistema, hasta donde se encuentra la carga térmica, en cuartos o recintos que se desean climatizar.

El sistema completo de HVAC está compuesto por: el sistema de calefacción, el sistema de enfriamiento y la unidad manejadora de aire (Ver figura 4.4).

El sistema de enfriamiento está compuesto por chillers, torres de enfriamiento, bomba de condensado, bomba primaria, y bomba secundaria, más los accesorios como lo serian válvulas de dos vías, válvulas de tres, válvulas de balanceo, etc.

Para entender al sistema de enfriamiento explicaremos su funcionamiento.

1. El agua que no ha sido enfriada por el chiller, es dirigida a la torre de enfriamiento mediante la bomba de condensado.
2. En la torre de enfriamiento, disminuye la temperatura del agua, pero no lo suficiente, por lo que el agua que tiene menor temperatura regresa al chiller para ser enfriada a cierta temperatura mayor de 4 grados Celsius.
3. Al salir del chiller, el agua helada es transportada en un circuito de presión y flujo constante, por lo que posiblemente no sea necesaria la instalación de un variador de frecuencia, a menos que la bomba primaria éste sobredimensionada.
4. El agua helada que se transporta a los serpentines mediante la bomba secundaria, utiliza presión y flujo variable, por lo que aquí se centrara nuestra atención para el ahorro de energía. Estas bombas son de uso constante durante todo el año.<sup>16</sup>



Fuente: Danfoss VLT® HVAC Application training  
Figura 4.4 Sistema de enfriamiento.

Como ejemplo tenemos el caso de los hoteles del Caribe Mexicano, los cuales no requieren de calefacción, pero sí del sistema de enfriamiento en forma continua.

<sup>16</sup> Esto depende del clima local. En lugares con climas extremos durante el año, o incluso durante el día, alternan el uso del sistema de calefacción y de enfriamiento.

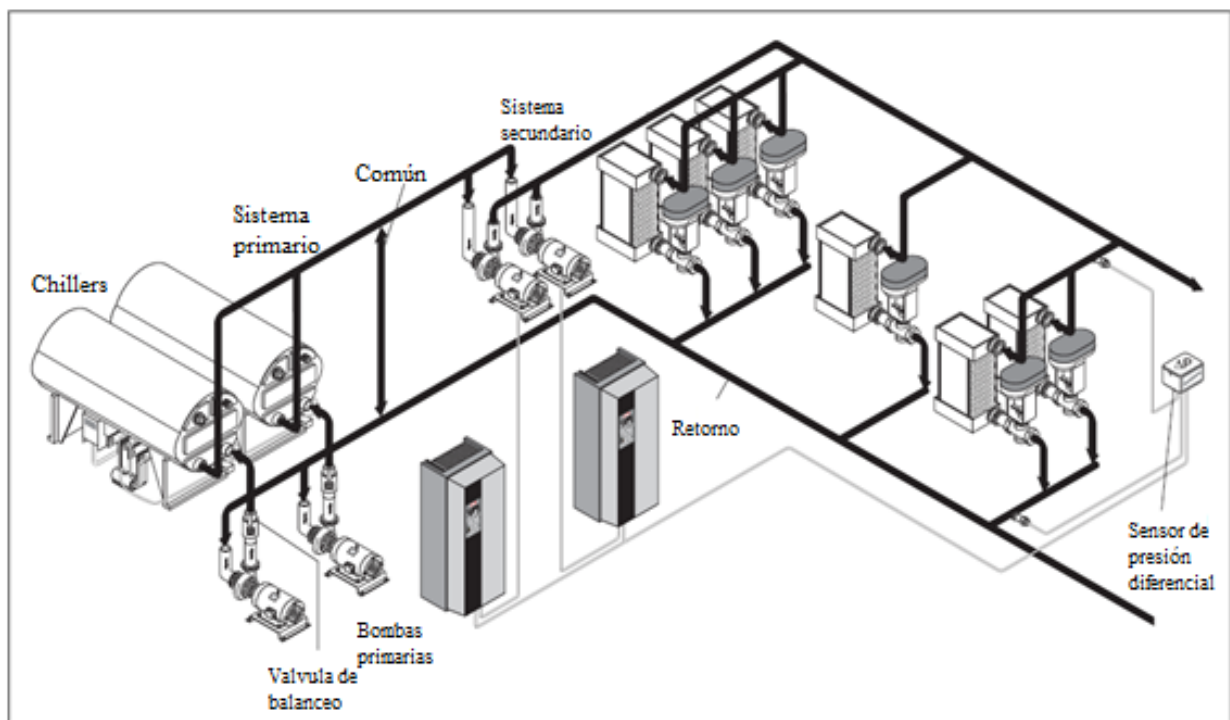
En estos sistemas, en ocasiones se divide el esfuerzo total en partes, esto quiere decir que en lugar de tener una sola bomba que se encargue del flujo, se pueden colocar dos o más dependiendo de las dimensiones del mismo, incluso si no es necesario, suele hacerse para tener un respaldo en caso de que la bomba principal sea dañada.

Para este caso se pueden instalar dos variadores, en una configuración maestro seguidor, para que ambas bombas trabajen al mismo tiempo a una velocidad menor a la que lo haría cada una en su operación, esto reduciría desgaste mecánico, se evitaría el golpe de ariete, al controlar el flujo, y desgaste en tuberías al regular la presión; también se puede evitar que se dañe la bomba, en caso de que el sistema se quede sin agua.

Esto tiene varias implicaciones que más adelante explicaremos al hacer los cálculos del retorno de la inversión. Lo que se hace en este tipo de control, es que el transmisor de presión es conectado a solo uno de los dos variadores, el maestro, y este manda una señal de control al segundo variador, el seguidor, para que trabaje a cierta velocidad.

### 4.3 Evaluación de beneficios.

De lo expuesto en el capítulo 3, las ventajas y beneficios que tiene usar variadores de frecuencia contra otras opciones de control, nos concentraremos en funciones específicas para el sistema de bombeo.



Fuente. Danfoss. VLT® HVAC drive applications

Figura 4.5 Sistema de bombeo primario/secundario.

Para el caso planteado en la figura 4.5, podemos observar que el sistema de bombeo está dividido a su vez en dos partes, el sistema bombeo primario y el secundario. Los elementos que se señalan en dicha figura, pertenecen al sistema de climatización en su conjunto de enfriamiento.



Para la aplicación de bombas, el variador incluye funciones específicas para ello.

#### **4.3.1 Control multizona**

El convertidor de frecuencia cuenta con capacidad para tres señales de retorno para tres sensores diferentes. Esto permite la regulación de un sistema con múltiples sensores cuando la carga se encuentra distribuida en varias zonas. El convertidor de frecuencia toma las decisiones de control mediante la comparación de las señales para optimizar el rendimiento del sistema.

#### **4.3.2 Sin flujo**

Esta función es útil para detectar las condiciones en que una bomba no produce el flujo, pero está en marcha. Una condición de no flujo de la bomba puede causar daño si no se detecta y corrige. Esta función no requiere de elementos extras como interruptores de flujo o sensores de presión extra ni el cableado asociados a los mismos.

La detección de la falta de flujo se basa en la medición de la potencia del motor a velocidades específicas. El convertidor de frecuencia controla el poder real y la frecuencia del motor y los compara con la potencia calculada a una velocidad específica. Si la potencia medida a una frecuencia específica es mayor que la potencia calculada por la unidad, la bomba está produciendo flujo. Si la potencia medida a una frecuencia específica es menor que la potencia calculada, una advertencia o alarma se genera para notificar al operador de la condición.

#### **4.3.3 Bomba seca**

Esta función es útil para detectar cuando la bomba está funcionando pero no hay agua en el sistema. Cuando la bomba trabaja en seco puede causarle daños si no se detectan y corrige. La detección de bomba en seco no requiere el uso de interruptores diferenciales externos de presión o de flujo y el cableado asociado.

Si no hay agua en el sistema, la bomba no produce presión. El convertidor de frecuencia se destinará a la máxima velocidad para tratar de producir una presión. Porque no hay agua, la carga sobre el motor se baja y el consumo de energía será bajo. Si el convertidor de frecuencia está funcionando a la velocidad máxima y el consumo de energía del sistema es bajo, una advertencia o alarma se genera para notificar al operador de la condición.

#### **4.3.4 Comunicaciones de campo**

El VLT ® HVAC Drive cuenta con medios de comunicación, reduciendo o eliminando la necesidad de dispositivos externos.

Los siguientes protocolos de comunicaciones pueden incorporarse al VLT ® HVAC Drive: Modbus RTU, Johnson Controls Metasys ® N2, Siemens Apogee ® FLN. BACnet ™ y LonWorks® los cuales están disponibles en tarjetas que son fáciles de montar en el interior del VLT ® HVAC Drive.

### **4.4 Características y requerimientos.**

Las especificaciones de la bomba son:

- No. de fases: 3 fases
- Tensión: 220/440 V
- Potencia: 25HP
- Corriente: 70/35 A
- Tipo: FS 1

El variador va a ser instalado en un cuarto de máquinas dentro de un gabinete; por lo que se selecciona un variador de frecuencia IP20<sup>17</sup>.

En los equipos utilizados existe la versión autocontenida en un gabinete capaz de soportar las condiciones de instalación, aunque su precio se incrementa considerablemente, en los casos donde no exista el espacio suficiente para un gabinete, o que los elementos de seguridad y/o control ya se encuentren instalados.

En los casos de acondicionamiento en instalaciones al nivel del mar, el variador opera con una eficiencia mayor a la que trabaja en lugares altos, por ejemplo, la ciudad de México.

Por lo que la especificación del variador queda de la siguiente forma:

1 Variador de frecuencia de 25 HP, 220V a 74.8A IP 20 con display gráfico marca Danfoss.

#### **4.5 Análisis financiero: Costo / beneficio**

De una forma similar a la planteada en el capítulo anterior, lo que se busca es hacer más eficiente al sistema, que consuma solo la energía que se requiere y que por ende no exista desperdicios de la misma. Para ello seguimos el mismo esquema de la comparación de dos estados del sistema; el primero solo con una válvula estranguladora.

En este caso los datos pertenecen a una bomba secundaria de un sistema de climatización, que alimenta a los serpentines para enfriar el aire que será inyectado en algún recinto. Estos datos fueron descritos en el capítulo anterior:

- Presión de Diseño (Design head): 29 PSI.
- Referencia estática (Set point static head): 2.9 PSI.
- Potencia transmitida (Shaft power): 21 HP(dependiendo de la eficiencia de la bomba, 85% para este caso).
- Caída de presión (Removed pressure drop): 0 PSI (En un circuito cerrado, idealmente no hay pérdidas o son despreciables)
- Potencia del motor (Motor power): 25 HP.
- Eficiencia del motor (Motor efficiency): 90%.
- Potencia del variador de frecuencia (Drive power): 25 HP.
- Eficiencia del variador de frecuencia (Drive efficiency): 96%(La eficiencia puede variar dependiendo de la altitud).
- Costo del variador de frecuencia (Drive cost): El costo en dólares de los drives es \$10 052.56 dólares, debido a que son dos variadores y el costo por variador es \$4333.00 + IVA.

---

<sup>17</sup> El IP es una normativa internacional de protección contra polvo y líquidos, en este caso es la más baja.

$$\begin{array}{r}
 4333.00 \\
 \times 1.16 \\
 \hline
 5026.28 \\
 \times 2 \\
 \hline
 10052.56
 \end{array}$$

- Costo por KWh (Cost per kWh): El costo en dólares del kWh es de \$0.092.
- Incentivo de utilidad (Utility incentive): \$0.00 dolares.
- Horas por día (Hours per day): Se considera una operación continua de 24 horas.
- Días por semana (Days per week): 7 días de operación por semana.
- Semanas por año (Weeks per year): 52 semanas de operación por año.
- Tiempo total de operación (Total operating time): Tiempo total de operación por año en horas.
- Ciclo de trabajo (Duty cycle): El ciclo de trabajo de los motores se fija con base en estudios de operación, necesarios para saber las velocidades de operación adecuadas. En este caso, las bombas conectadas en maestro-seguidor, pueden compartir esfuerzos, por lo que el ciclo de trabajo se concentra en la zona del 50%. Este ciclo se observa en la figura 4.6.

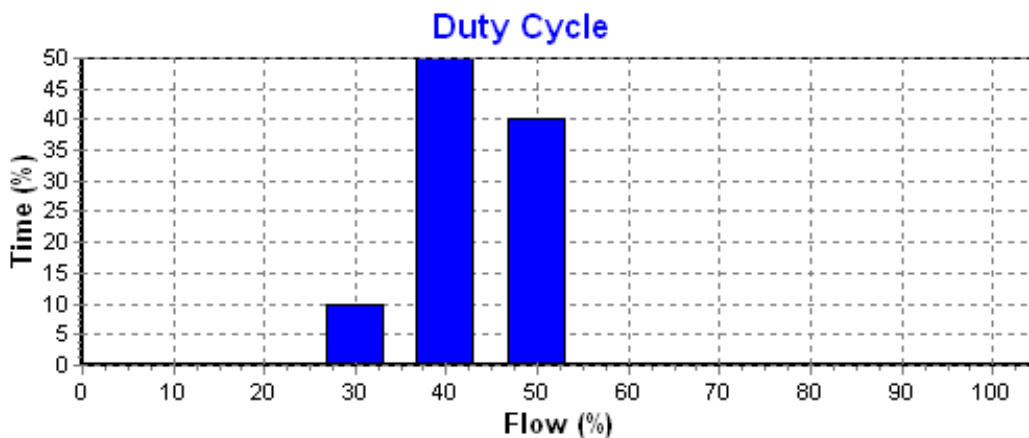


Figura 4.6 Ciclo de trabajo de bombas maestro-seguidor.

Esto es porque las bombas trabajan simultáneamente en lugar de alternarse o de mantener una en trabajo constante y la otra de respaldo en caso de emergencia.

Si el sistema de bombeo está sobredimensionado, entonces para ajustarlo a las necesidades del mismo es ponerlo a trabajar a menos de 100% de flujo, si el esfuerzo se comparte entre dos bombas, entonces el flujo por cada una es menor al 50%, en pocos casos, los requerimientos serán menores del 40% y casi nula la posibilidad de trabajar mayor al 50%, debido al diseño.

Toda la información anterior se vacía en el Energy box<sup>®18</sup>, para empezar a generar los resultados de análisis de retorno de inversión, ver figura 4.7.

<sup>18</sup> Para mayor información consultar el capítulo 3

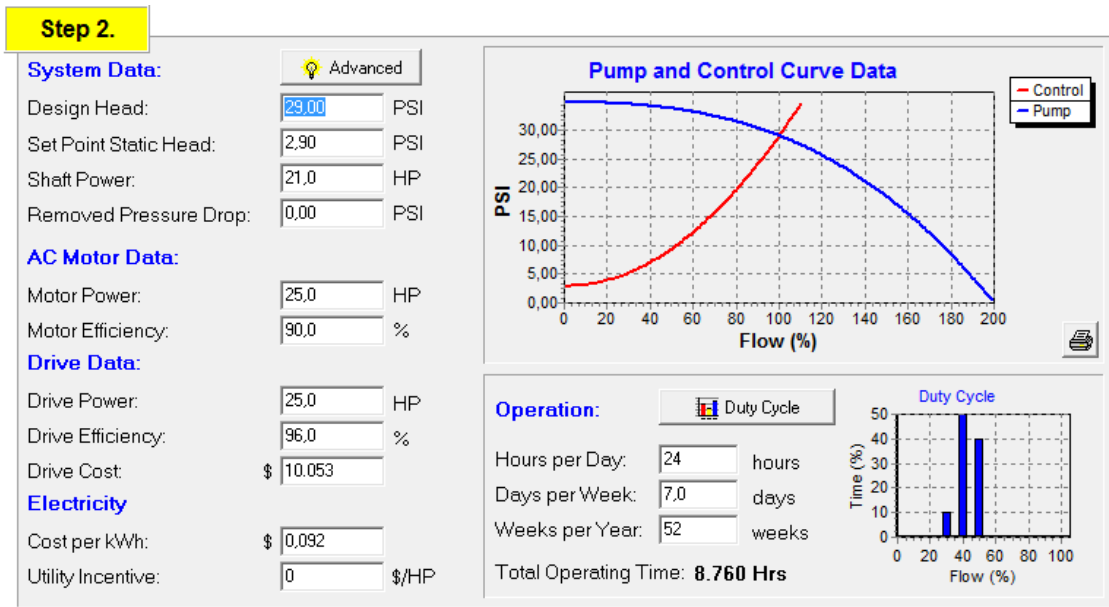


Figura 4.7 Pantalla del Energy box®.

De igual forma que con el caso del ventilador, aparece la curva característica de la bomba junto con el punto de operación óptimo para los requerimientos. En caso de ser necesario modificar dicho comportamiento, basta con dar click sobre la grafica para modificarla. Figura 4.8

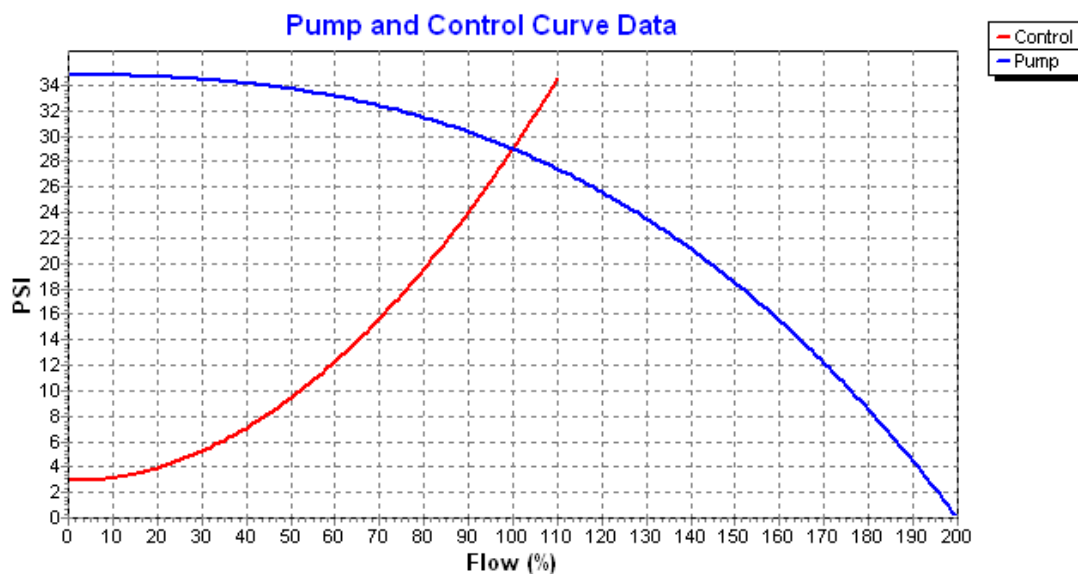


Figura 4.8 Curva de la bomba y punto de operación.

Esta gráfica se obtiene del comportamiento estándar de bombas con el 85% de eficiencia.

En la figura 4.9, observamos el cuadro de comparación de los sistemas, colocamos los gastos que implica cada uno de ellos. La comparación se basa en la premisa de que el sistema no está instalado. En el paso 3 escogemos que se compare contra una válvula de estrangulamiento, que es una forma de controlar el desempeño de la bomba, provocando una caída de presión artificial.

**Step 3.**

Compare Drive System to:

Constant Volume

Cycling

Throttling Valve

➔

Select a conventional system that you would like to compare against the Danfoss Drive System.

**Step 4.**

Initial Cost, Comparison System		Initial Costs, Drive System	
Installation	\$ 500	Installation	\$ 800
Startup	\$ 0	Startup	\$ 100
Equipment	\$ 300	Equipment	\$ 200
	\$ 0		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
+		+	
<b>\$ 800</b>		<b>\$ 1.100</b>	
Annual Costs, Comparison System		Annual Costs, Drive System	
Maintenance	\$ 200	Maintenance	\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
+		+	
<b>\$ 200</b>		<b>\$ 0</b>	

Figura 4.9 Comparación de costos de los sistemas.

En la figura 4.10, observamos los resultados del análisis, de lo cual destaca el primer recuadro, los requerimientos de flujo, cabe señalar que eso es para cada una de las bombas, lo correcto en este caso serían valores alrededor del 90% u 80%. Para este caso, de igual forma, la válvula de estrangulamiento debería trabajar dentro de estos rangos.

**Step 5. Energy Calculations**

System Flow Requirements			Throttling Valve System		Danfoss Drive System			
System Flow	Annual Operating Time		Power Required	Annual Energy Use	Power Required	Annual Energy Use		
%	%	hrs	kW	kWh	kW	kWh		
100	0	0	17	0	18	0		
90	0	0	17	0	14	0		
80	0	0	16	0	11	0		
70	0	0	15	0	8	0		
60	0	0	14	0	6	0		
50	40	3.504	13	44.912	4	15.137		
40	50	4.380	11	50.069	3	13.872		
30	10	876	10	8.466	2	2.072		
20	0	0	7	0	2	0		
10	0	0	5	0	2	0		
<b>Total:</b>		8.760	<b>Total:</b>		103.448	<b>Total:</b>		31.081

Figura 4.10 Energía consumida en los ciclos propuestos.

Throttling Valve System	
Power Required	Annual Energy Use
kW	kWh
17	61.107
17	72.682
16	13.803
15	0
14	0
13	0
11	0
10	0
7	0
5	0
<b>Total:</b>	<b>147.592</b>

Figura 4.11 Corrección para la válvula de estrangulamiento.

Como se puede observar de la figura 4.11, la energía consumida se incrementa, este gasto de energía es el verdadero consumo, ya que en la figura 4.10 se hizo el cálculo con un ciclo de trabajo para las bombas trabajando en maestro-seguidor, pero para la válvula corresponde otro ciclo de trabajo, ya que solo una será la que se haga cargo de la regulación.

También se tiene que aclarar que para la figura 4.10, el consumo de energía anual para el variador, es para cada uno de ellos, por lo que de ambos se esperaría consumir el doble.

La figura 4.12 es la gráfica de la energía anual requerida, donde se muestra el consumo total de ambas opciones, cada una con su ciclo de trabajo e incluyendo ambos variadores en el consumo energético.

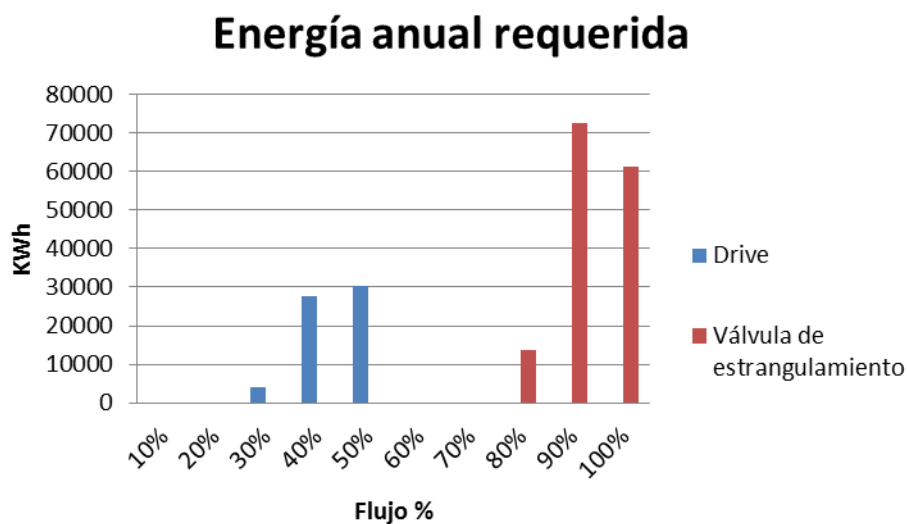


Figura 4.12 Energía consumida bajo el esquema planteado.

Del consumo energético tenemos que la válvula de estrangulamiento consume 147592 KWh por año, y que con los variadores se consumirían 62162 KWh.

Por lo que comparando ambos sistemas obtenemos

$$\begin{array}{r} 147592 \\ -62162 \\ \hline 85430 \end{array}$$

El ahorro anual en dólares será:

$$85430 [KWh] \times 0.092 \left[ \frac{\$}{KWh} \right] = 7859.56 [\$]$$

Para saber en cuanto tiempo recuperamos la inversión realizada basta con dividir los costos de los drives con el ahorro de energía y ahorro en mantenimiento.

$$\frac{10053 [\$]}{(7859.56 + 200) \left[ \frac{\$}{Año} \right]} = 1.2473 [Años]$$

Esto se puede apreciar en la figura 4.13, donde se puede observar que son casi 15 meses en los que se recupera la inversión.

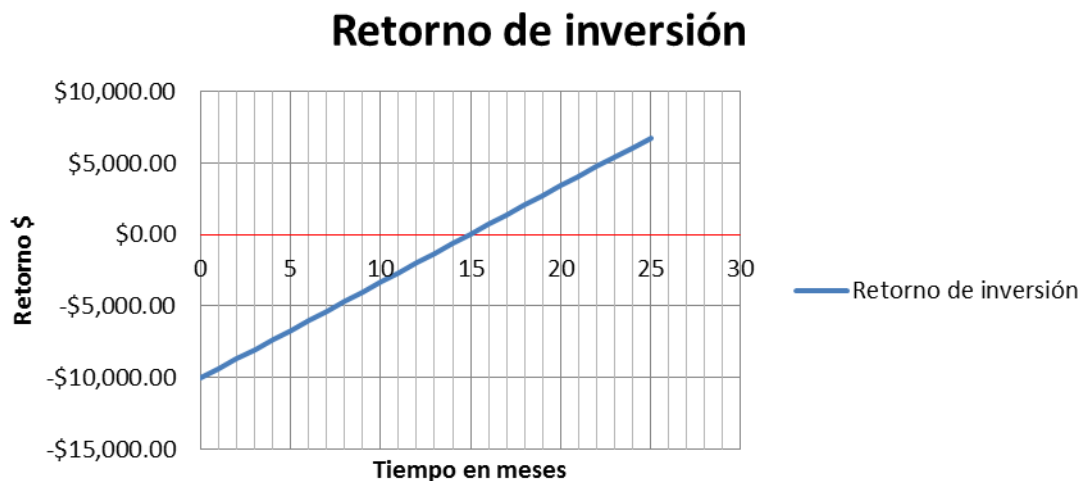


Figura 4.13 Tiempo de recuperación de la inversión.

Las conclusiones de esta parte son:

1. El dividir esfuerzos en este tipo de sistemas puede ser alto en costo, pero el retorno de inversión es relativamente rápido.
2. El retorno se ve afectado directamente por la cantidad de horas de operación de los motores, mientras más sean las horas de operación más rápido retorna la inversión. Si la operación es mínima el retorno se dispara.
3. El ahorro en energía es casi del doble, por lo que las emisiones de dióxido y monóxido de carbono disminuyen proporcionalmente.
4. Es importante considerar que no todos los motores aceptan variadores de frecuencia, o que solo pueden trabajar dentro de cierto rango de frecuencia, por lo que se debe consultar con el fabricante del motor antes de instalar un variador de frecuencia.



## **Conclusiones**



En los últimos años el consumo de energía eléctrica se ha elevado a un ritmo superior comparado con años pasados. Debido a este inusual ritmo de crecimiento y a las repercusiones que acarrea, se deben de poner en práctica acciones que tengan por objeto el ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica. Es fácil percibir que algo se está malgastando cuando es tangible, como por ejemplo en una llave que derrama agua, pero cuesta trabajo percibir que sucede lo mismo cuando: se deja encendido un foco, se deja prendido el aire acondicionado de las estancias donde no es necesario, se tiene la radio, el televisor y el calentador de agua funcionando mientras se está planchando o leyendo el periódico. Debemos de tomar en cuenta que la electricidad no es sólo ese enchufe donde se conectan los equipos, sino que es todo un enorme sistema que la produce y la transporta hasta los usuarios en el mismo instante en que la necesitan. Todo este sistema eléctrico debe mantenerse al día, lo cual requiere personal especializado y tecnología en materiales y equipos. Con todo esto es de imaginarse que la energía eléctrica no es barata y que las repercusiones de su utilización van más allá de encender un equipo, en realidad la problemática del consumo no sólo se refleja en el uso doméstico, sino, sobre todo, en las industrias, donde la búsqueda de soluciones a los altos consumos de electricidad es más notoria que nunca, ya que esto repercutirá en ahorros para las mismas. Pensando en esto se han desarrollado innumerables equipos y dispositivos de alta tecnología que controlan o gestionan los sistemas para reducir el consumo de energía eléctrica, como lo son los variadores de frecuencia que tiene como ventaja, además de controlar los motores, hacer más eficiente el uso de energía eléctrica. Como es de suponerse, la implementación de este tipo de equipos requiere que se tengan conocimientos de los siguientes aspectos:

- Causa que generan la ineficiencia.
- Oportunidades de mejoras.
- Beneficios esperados de las mejoras de la eficiencia.

El éxito de cualquier programa de eficiencia energética depende en gran medida del compromiso de aplicarlo por parte de todos los miembros de la organización y de las costumbres y estilos de vida. En este caso, la ventaja es que no solo se obtiene un ahorro energético, sino que la automatización de algunos sistemas permite corregir algunas malas costumbres.

Por consiguiente, el elemento humano es la clave de cualquier programa de eficiencia energética. Como los trabajadores se guían por la dirección, ésta debe iniciar los esfuerzos para ahorrar energía. En el nivel técnico, debe esperarse que participen en el ahorro de energía los especialistas en ingeniería, mecánicos, eléctricos, industriales, etc. Estos especialistas deben estudiar qué se puede cambiar y qué equipo se ha de comprar. Los directores y los supervisores deben contar con los conocimientos técnicos de los ingenieros para reunir gran parte de la información básica que se necesita para mejorar la planificación.

El ahorro es un concepto económico y como tal va asociado al concepto tiempo. Un equipo consume tanta más energía cuanto más tiempo funciona. En este sentido, pues, el ahorro debe ser una preocupación del usuario del equipo, del consumidor, el cual debe tener también la adecuada sensibilidad frente a la conservación de la energía.

Con el fin de gozar de los beneficios del ahorro energético, se ha de realizarse una serie de tareas prácticas de gestión y recopilación de información en los puntos de control, por lo general en la máquina o como en este caso, en los motores eléctricos.

Es interesante realizar una simple medición de la eficiencia de los motores, pero este tipo de medición no aporta gran información acerca del sistema. Las mediciones sólo sirven cuando se utilizan en conjunto, ya sea en forma grafica o en modelos. La interpretación de los datos es un aspecto fundamental en el proceso de hacer más eficiente un sistema.

A fin de administrar la eficiencia de los motores, se necesita tomar mediciones iniciales de potencia para establecer las condiciones de base y luego monitorear periódicamente los flujos de potencia y así brindar información sobre las tendencias de eficiencia, las condiciones ineficientes y las oportunidades de mejoras.

En un programa de conservación de la energía se debe analizar y evaluar sistemáticamente la situación real y promover medidas de conservación de la energía, elaborar planes prácticos, organizar su puesta en marcha y evaluar los resultados.

Así de este desarrollo se desprenden una serie de conclusiones generales:

Hacer un uso más eficiente de la energía es la manera más fácil y barata de reducir el consumo energético, evitando derroches y mejorando rendimientos energéticos. La situación actual de consumo energético no es sostenible. Es necesario un modelo de producción energética en el que los combustibles fósiles reduzcan su papel como fuente primaria de energía.

1. Se necesita energía eléctrica limpia, procedente de energías renovables. Urge una política activa para favorecer el desarrollo de las energías y combustibles limpios, renovables, capaces de satisfacer masivamente la demanda.
2. Es necesario abrir un mercado de consumo y fomentar la inversión en la generación de energía eólica, ya que es la energía renovable más desarrollada, en la que los costes de producción son más bajos que los de las energías convencionales. La energía solar termoeléctrica y la fotovoltaica, en creciente expansión, deberán seguir los pasos de desarrollo de la energía eólica, abriéndose los correspondientes mercados, todavía incipientes. Los principales inconvenientes de las energías renovables son los elevados costes y su carácter intermitente. A corto plazo, el elevado coste será el factor limitante, superable con el tiempo. El carácter intermitente es un inconveniente intrínseco que se solventará cuando se resuelva el problema del almacenamiento de la energía generada.
3. El petróleo (y, en general, los combustibles fósiles) tienen su futuro como materia prima de la industria química, no como combustible. Hacer uso de las reservas de petróleo en la situación actual es como “derrochar dinero”. Cuando la producción mundial de petróleo alcance un máximo (“pico de producción”), habrá acabado el petróleo barato.
4. Las instituciones gubernamentales tienen el papel y la responsabilidad de fomentar y guiar el desarrollo de un plan energético nacional que incluya todos los aspectos relevantes anteriormente señalados, mediante la puesta en marcha de planes, normativas, asesorías y ayudas periódicamente revisadas.
5. En todo análisis de eficiencia energética se debe de tomar muy en cuenta el mal uso de la energía eléctrica, ya sea por falta de control, o por bajo factor de potencia. En las instalaciones donde esto ocurra se deberán tomar las medidas para las correcciones correspondientes.
6. Hoy en día existen diferentes formas de ahorrar energía, la automatización y el aprovechamiento de las cualidades de los sistemas, pueden llegar a tener grandes resultados en el ahorro si se utilizan de manera adecuada.
7. La electrónica ha alcanzado un desarrollo impresionante durante estos últimos años; entre los equipos electrónicos más interesantes está el variador de frecuencia, que aunque no es novedoso, es un sistema muy completo para el control de motores eléctricos. Cabe señalar que los variadores de frecuencia nacieron para el control, no para el ahorro de energía. Este tipo de controladores son confiables, y de bajo costo de mantenimiento al no tener piezas mecánicas.
8. Para hacer un sistema más eficiente y tener mayor acceso a datos que lo corroboren, los consumidores deberán de adoptar la opción de instalar instrumentos de medición y de control

en forma permanente, o bien realizar auditorías periódicas de los flujos de potencia con instrumentos portátiles.

Para una correcta instalación de aire acondicionado se debe comprender bien cómo funciona un sistema de Volumen de Aire Constante (VAC) y de cuáles son sus diferencias con el sistema de Volumen de Aire Variable (VAV). El primero envía un flujo constante de aire al espacio por acondicionar, para mantener la temperatura del espacio se varía la temperatura del aire a suministrar. El segundo envía el aire primario a una temperatura constante y varía el flujo o volumen de aire para mantener la temperatura del espacio requerida.

Las formas de controlar el sistema de aire acondicionado son muy variadas, pero en la forma de controlar es donde se define qué tan eficiente será el funcionamiento de nuestro sistema.

Podemos decir que una muy buena razón para usar los sistemas VAV es el potencial de ahorro de energía eléctrica al operar los sistemas parcialmente mediante la implementación de variadores de frecuencia, lo cual deriva en la reducción del volumen de aire mediante el variador de frecuencia y como consecuencia menor consumo de energía eléctrica del motor del ventilador de la manejadora de aire.

La elección del sistema de aire acondicionado debe efectuarse considerando las características funcionales y ocupacionales de la estancia a acondicionar, la cantidad de personas que laboran, la iluminación instalada, los equipos eléctricos con que cuenta y la cantidad de calor que penetra por las paredes y ventanas, o en su defecto, hacer una debida estimación de estas cargas térmicas. De lo anteriormente expuesto se explica la importancia que tiene la correcta selección del aire acondicionado en el logro del confort, eficiencia y plazo de vida útil de los equipos.

El sobredimensionamiento de los equipos de aire acondicionado es uno de los factores que más contribuyen al desperdicio de energía y se produce en los casos en que los valores proyectados para dichos equipos exceden la carga térmica de la estancia. Este problema surge por cualquier combinación de los siguientes factores:

- Se sobreestimó la carga térmica, y los sistemas de aire acondicionado se dimensionaron para una carga demasiado grande.
- La carga térmica irá aumentando con el tiempo, pero los sistemas de aire acondicionado están dimensionados para ofrecer respaldo a dicha carga prevista para el futuro.
- El diseño del sistema de aire acondicionado es deficiente, lo que requiere el sobredimensionamiento de los equipos para enfriar la carga térmica satisfactoriamente.
- Adicionalmente, los equipos están estandarizados, por lo que si en los cálculos resulta que necesitamos poner un aire de cierta capacidad y este no existe, normalmente se selecciona el inmediato superior, por lo que sobredimensionamiento incrementa.

Si bien es claro que instalar demasiados equipos de aire acondicionado implica un desperdicio desde el punto de vista de la inversión, no es evidente que tal sobredimensionamiento pueda disminuir drásticamente la eficiencia eléctrica del sistema general y causar un exceso permanente en el consumo de energía eléctrica.

Todos los sistemas de climatización consumen energía, ya sea renovable o no renovable, en mayor o menor medida, dependiendo de la eficiencia del sistema. Cuanta más energía se necesita para

alcanzar y mantener las condiciones de confort en un sistema, menos eficiente será el climatizador y mayor será su impacto ambiental.

Es necesario que los profesionales tomen conciencia que en el diseño de una instalación de aire acondicionado en los edificios modernos, no solo está en juego el confort o bienestar sino fundamentalmente la calidad del aire interior, la preservación de la salud y las condiciones de vida de las personas.

La climatización estará acorde a la necesidad en cada momento y situación. Hoy en día la tendencia debería ser utilizar la climatización natural o bioclimatización, puesto que energéticamente es más fiable y no usan gases que dañen la capa de ozono, ni contaminen el medio ambiente ya que este es un proceso que se da en la naturaleza de forma habitual y consiste en enfriar y/o calentar el aire obteniendo el frío o calor de fuentes naturales como el agua y la tierra.

Otra de las aplicaciones de los variadores de frecuencia es en bombas de agua. El bombeo de agua, en general, puede ser controlado bajo los mismos principios que en aire acondicionado, el retorno será tangible, si el proceso es variable, por lo que en casos como en casa habitación, donde solo se requiere llenar un tanque, la inversión no es viable.

El desperdicio de energía en este tipo de sistemas es elevado, considerando que en un sistema de aire acondicionado existen una gran cantidad de bombas, comparando con la cantidad de ventiladores, y que tienen que hacer circular agua por trayectorias largas, en el caso de no estar centralizado el aire acondicionado.

El retorno de la inversión en este tipo de sistemas, se estima que es mucho más rápido que en ventiladores, pero en alto grado depende del tiempo de funcionamiento en horas por día y del flujo requerido.

Es posible controlar más de una bomba con un solo variador de frecuencia<sup>19</sup>, agregando algunos elementos, de tal forma que se disminuye la inversión inicial, pero lo ideal es tener un variador de frecuencia por motor.

En este estudio se concluyó, entre otros aspectos que el uso del análisis costo - beneficio es una herramienta poderosa para descubrir, dimensionar y comparar las ventajas económicas y sociales de implementar un proyecto

Hacer las cosas bien desde un principio, significa e implica ahorrar energía eléctrica sin reducir el nivel de bienestar o grado de satisfacción de las diferentes necesidades, además de dar lugar a un cambio en los comportamientos que conduzcan a un uso racional de la misma; y en el caso de las empresas, producir los bienes y servicios con el menor número de fallas o defectos al menor coste posible, generando de tal forma una clara ventaja sobre los competidores. Es por esto que los usuarios nos debemos de poner como objetivo el uso racional y efectivo de la energía para minimizar costos y ayudar a disminuir el deterioro ambiental.

---

<sup>19</sup> Con variadores de frecuencia Danfoss, con otras marcas se deberá consultar el manual de usuario.

# **Apéndice A**

## **Electrónica del variador de frecuencia.**

Los variadores de frecuencia, como se vio en el capítulo 2, son la combinación de distintos circuitos, en los cuales, destacan tres etapas: El rectificador, el circuito intermedio y el inversor. A continuación describiremos brevemente cada uno de estos elementos.

### 1. El rectificador

La tensión de alimentación, es una tensión trifásica de corriente alterna o monofásica de corriente alterna de frecuencia fija (por ejemplo, 220 V/ 60 Hz ó 127 V/60 Hz).

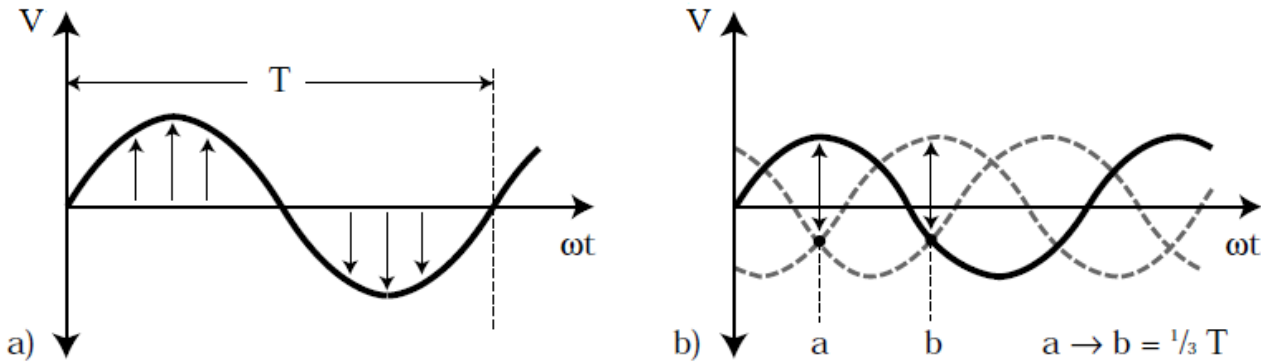


Figura A.01 Tensión de alimentación a) monofásica b) trifásica.

En la figura A.01 b) las tres fases se encuentran desplazadas en el tiempo, la tensión de fase cambia constantemente de dirección, y la frecuencia indica el número de períodos por segundo. Una frecuencia de 60 Hz significa que hay 60 períodos por segundo ( $60 \times T$ ), es decir, un período de tiene una duración de 16.6 milisegundos.

El rectificador de un variador de frecuencia consiste en diodos, tiristores o una combinación de ambos. Un rectificador que consiste en diodos no está controlado y el que consiste en tiristores es controlado. Si ambos, diodos y tiristores se utilizan, el rectificador está semicontrolado.

#### I. Rectificadores no controlados

Los diodos permiten que la corriente fluya en una sola dirección: desde el ánodo (A) al cátodo (K). No es posible - como es el caso con otros semiconductores - controlar la magnitud de la corriente. Una tensión de CA en un diodo se convierte en una tensión pulsante de CD. Si una tensión de CA trifásica se suministra a un rectificador no controlado de tres fases, la tensión de CD seguirá pulsando.

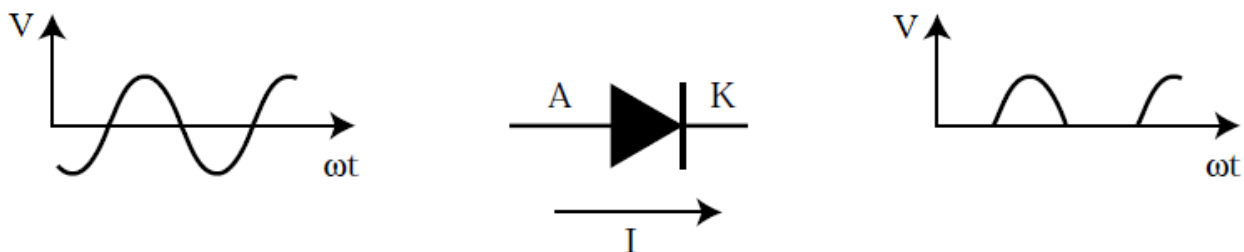


Figura A.02 Operación del diodo.

La figura A.03 muestra un rectificador no controlado en tres fases, que consiste de dos grupos de diodos. Un grupo consta de los diodos  $D_1, D_3$  y  $D_5$ . El otro grupo está formado por diodos  $D_2, D_4$  y

$D_6$ . Cada diodo conduce 1/3 del tiempo del periodo (120°). En ambos grupos, los diodos conducen en secuencia.

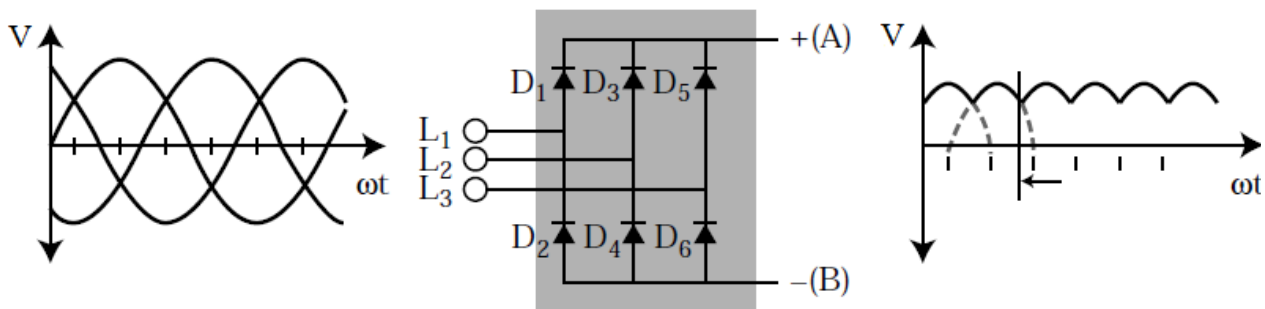


Figura A.03 Rectificador trifásico no controlado.

Los diodos  $D_{1,2,3}$  conducen cuando una tensión positiva es aplicada. Si la tensión de fase L1 alcanza el valor pico positivo, la terminal A asume el valor de la fase L1. Por encima de los otros dos diodos que están polarizados en inversa.

Esto también se aplica al grupo de diodos  $D_{2,4,6}$ . Aquí terminal B recibe la fase negativa de la tensión. Si en un momento dado L3 llega al umbral de tensión negativa, el diodo  $D_6$  conduce, los otros dos diodos se polarizan en inversa y no conducen.

La tensión de salida del rectificador no controlado es la diferencia del valor de las tensiones de los dos grupos de diodos. El valor medio de la tensión continua es de 1,35 la tensión de la red.

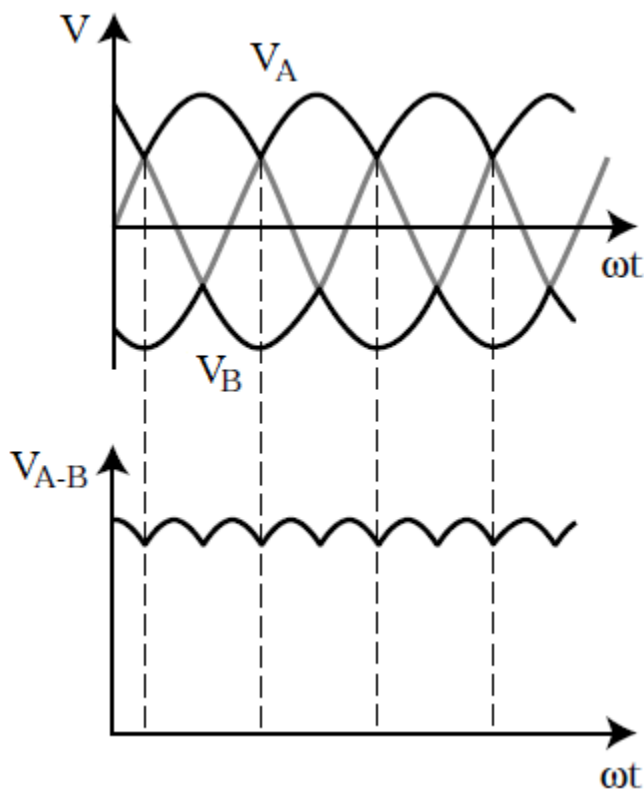


Figura A.04 Salida de tensión de un rectificador no controlado.

## II. Rectificadores controlados

En los rectificadores controlados, los diodos se sustituyen por tiristores. Al igual que el diodo, el tiristor sólo permite que la corriente fluya del ánodo (A) al cátodo (K). Sin embargo, la diferencia entre los dos dispositivos es que el tiristor tiene una tercera terminal la puerta o "gate" (G). Este gate debe recibir una señal para que el tiristor conduzca. Cuando una corriente fluye a través del tiristor, el tiristor conducirá la corriente hasta que se convierte en cero.

La corriente no puede ser interrumpida por una señal en la puerta. Los tiristores se utilizan en rectificadores, así como en los inversores.

La señal del gate es la señal de control que determina a  $\alpha$  al cual el tiristor comienza a conducir, que es un intervalo de tiempo, expresado en grados. El valor indica, en grados, el retraso entre la tensión de cruce por cero y el tiempo cuando el tiristor empieza a conducir.

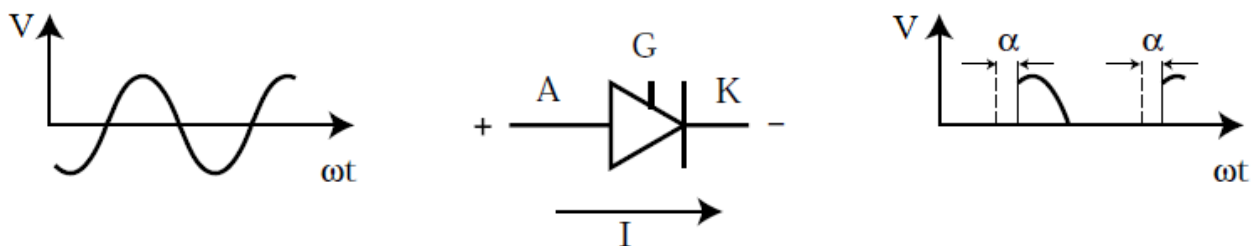


Figura A.05 Operación del tiristor.

Si  $\alpha$  se encuentra entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , el acoplamiento de tiristores se usa como rectificador, cuando está entre  $90^\circ$  y  $300^\circ$  el tiristor es utilizado como un inversor.

El rectificador controlado es básicamente lo mismo que uno no controlado con la excepción de que el tiristor está controlado por una  $\alpha$  y comienza a conducir desde este ángulo hasta el punto en que un diodo normal deja de conducir, al cruce por cero de tensión.

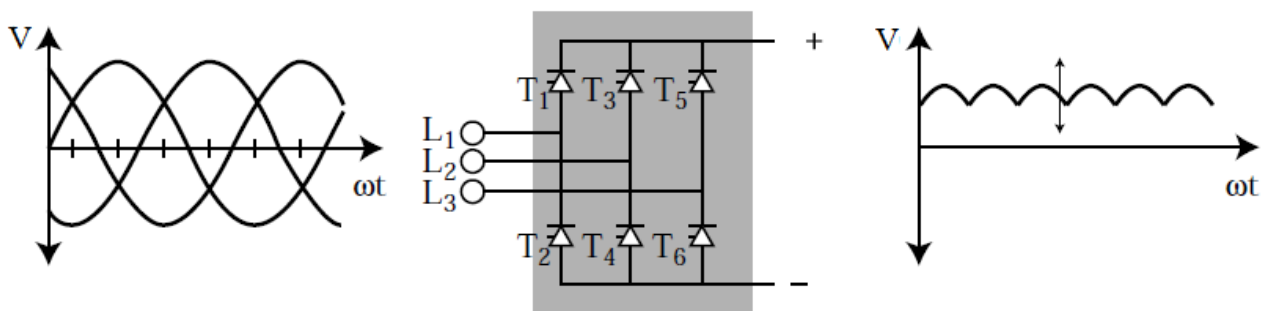


Figura A.06 Rectificador controlado de tres fases.

Regulando  $\alpha$  nos permite variar el valor de la tensión rectificada. Los rectificadores controlados nos suministran una tensión de CD con un valor medio de  $1.35 \times \cos \alpha \times$  tensión de alimentación.

En comparación con el rectificador no controlado, el rectificador controlado causa grandes pérdidas y trastornos en la alimentación de la red, debido a que el rectificador origina una corriente reactiva más alta si el tiristor conduce un periodo corto de tiempo.



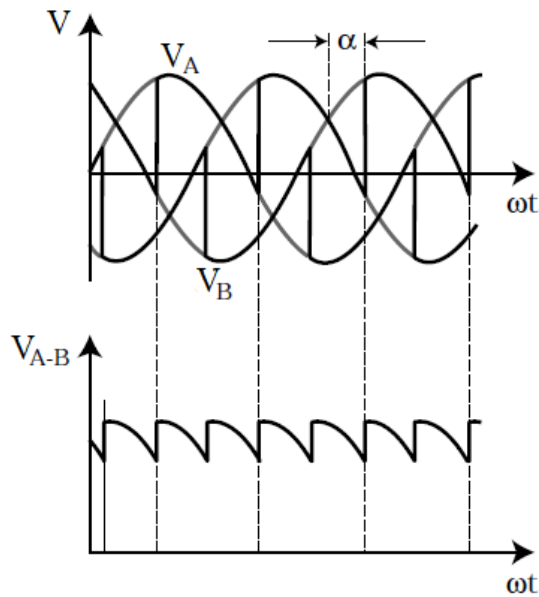


Figura A.07 Salida de tensión de un rectificador controlado.

## 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 e inversor.

### I. Fuente de corriente

En inversores de fuente de corriente el circuito intermedio se compone de una gran bobina y sólo se combina con el rectificador controlado. La bobina transforma la tensión variable del rectificador de corriente continua en una variable. La carga determina el tamaño de la tensión del motor.



Figura A.08 Circuito intermedio de CD variable.

### II. Fuente de voltaje

En inversor de fuente de tensión el circuito intermedio consiste en un filtro que contiene condensadores y se puede combinar con los dos tipos de rectificador. El filtro suaviza la tensión continua pulsante ( $V_{z2}$ ) del rectificador.

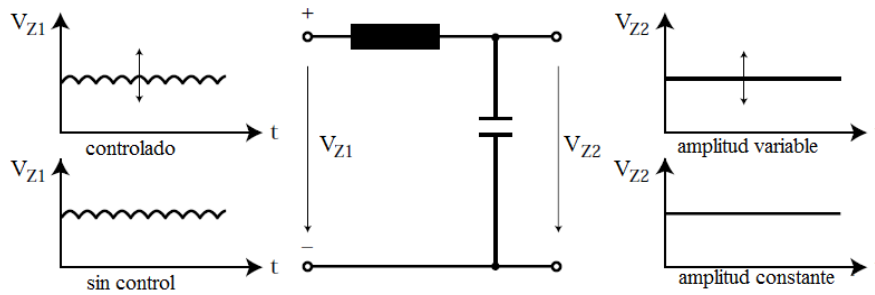


Figura A.09 Circuitos intermedios de tensión.

En un rectificador controlado, la tensión es constante a una frecuencia dada, y se facilitan al inversor como pura tensión de corriente directa ( $V_{Z2}$ ) con una amplitud variable.

En los rectificadores no controlados, la tensión en la entrada del inversor es una tensión continua con una amplitud constante.

### III. Circuito intermedio de tensión variable de CD

Por último, en el circuito intermedio de tensión variable de CD se puede insertar un chopper en frente del filtro, como se muestra en la figura A.10.

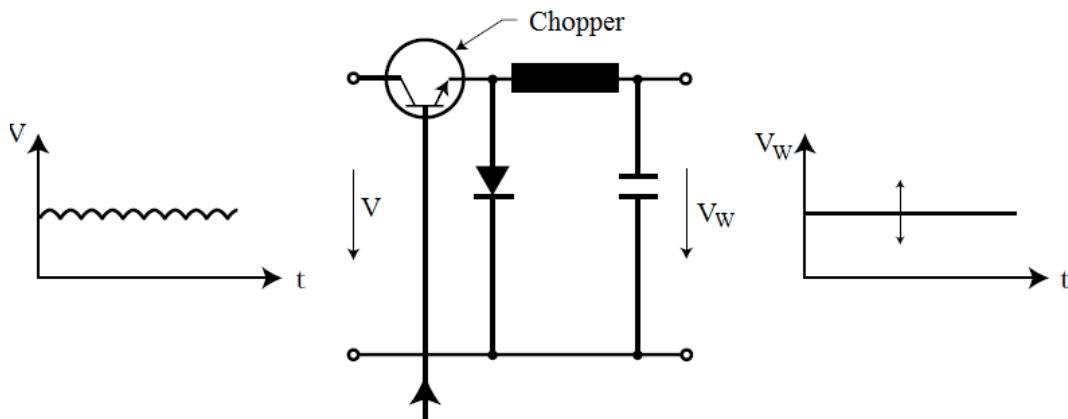


Figura A.10 Circuito intermedio de tensión variable.

El chopper tiene un transistor, que funciona como un interruptor para conmutar la tensión rectificadora. El circuito de control regula al chopper, comparando la tensión variable después del filtro ( $V_W$ ) con la señal de entrada. Si hay una diferencia, la relación está regulada por el tiempo durante el cual el transistor está conduciendo y el tiempo en que deja de hacerlo.

Cuando el transistor del chopper interrumpe la corriente, la bobina de filtro hace la tensión en el transistor infinitamente elevada. Para evitar esto, el chopper está protegido por un diodo volante.

El filtro del circuito intermedio suaviza la tensión de onda cuadrada después del chopper. El capacitor y la bobina mantienen la tensión constante a una frecuencia dada.

### 3. Inversor

El inversor es el último eslabón en el convertidor de frecuencia antes del motor y el punto donde se produce la adaptación final de la salida de tensión. 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 circuito intermedio, el inversor recibe

- una corriente directa variable,
- una tensión de CD variable, o
- una tensión de CD constante.

En todos los casos, el inversor se asegura de que la alimentación del motor se convierte en una cantidad variable. En otras palabras, la frecuencia de la tensión siempre se genera en el inversor. Si la corriente o la tensión son variables, el inversor sólo genera la frecuencia. Si la tensión es constante, el inversor genera la frecuencia del motor, así como la tensión.

Incluso si los inversores trabajan de formas diferentes, su estructura básica es siempre la misma. Sus principales componentes son semiconductores controlados, colocados en tres parejas de ramas. Los tiristores han sido ampliamente reemplazados por transistores de alta frecuencia que se pueden activar y desactivar rápidamente.

Los semiconductores en el inversor se encienden y se apagan por las señales generadas por el circuito de control. Las señales pueden ser controladas de maneras diferentes.

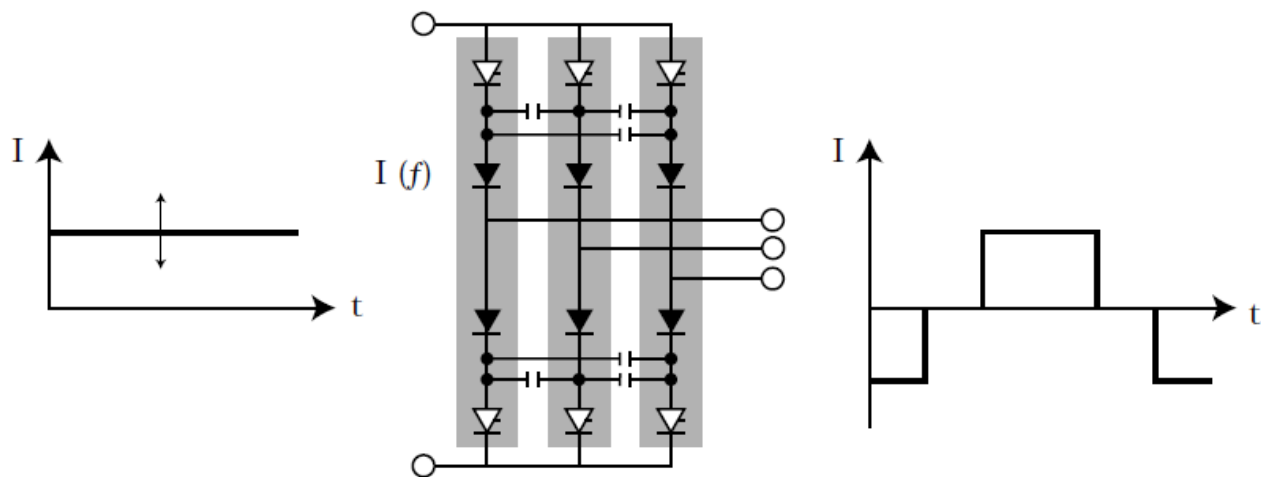


Figura A.11 Circuito de un inversor tradicional.

Los inversores tradicionales están compuestos por seis diodos, seis tiristores y seis capacitores. Los capacitores permiten a los tiristores encender y apagar, de modo que la corriente se desplaza 120 grados en los devanados de fase y debe adaptarse al tamaño del motor. Un campo rotacional intermitente de giro con la frecuencia requerida se produce cuando las terminales del motor son periódicamente alimentados con corriente por turnos U-V, V-W, W-U, U-V ..... esto hace que la corriente del motor sea casi cuadrada, la tensión del motor es casi sinusoidal. Sin embargo, siempre hay picos de tensión cuando la corriente está conmutando. Los diodos separan los condensadores de la corriente de carga del motor.

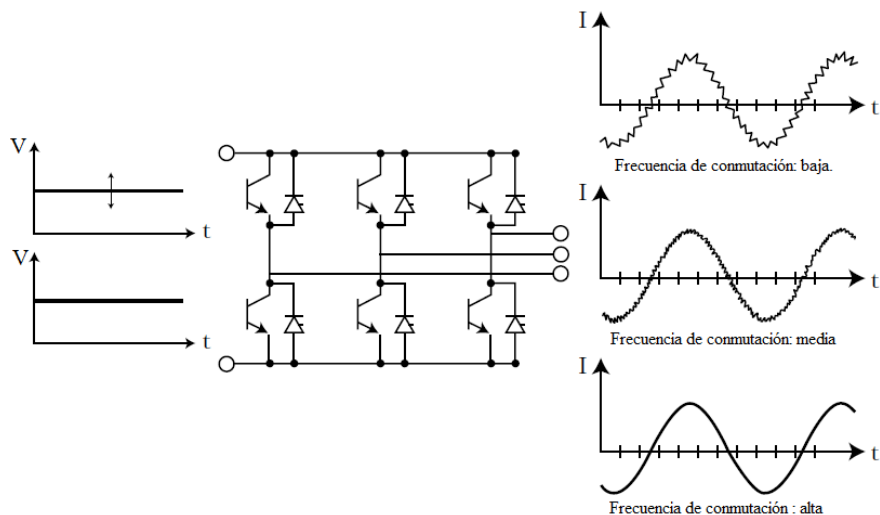


Figura A.12 Inversor para un circuito intermedio de tensión fija o variable. La calidad de la salida depende de la frecuencia de conmutación del inversor.

En el circuito inversor de tensión hay seis componentes de conmutación y sin importar el tipo de semiconductores utilizados, la función es básicamente la misma.

El circuito de control conmuta los semiconductores mediante un número de diferentes técnicas de modulación, cambiando así la frecuencia de salida del convertidor de frecuencia. La primera técnica se ocupa de tensión variable o corriente en el circuito intermedio.

Los intervalos en los cuales los semiconductores individualmente están conduciendo son situados en una secuencia que se utiliza para obtener la frecuencia de salida requerida.

Esta secuencia de conmutación se controla por la magnitud de la tensión en el circuito intermedio, o por corriente. Usando oscilador controlado por tensión, la frecuencia sigue la amplitud de la tensión. Este tipo de control del inversor se hace por modulación de amplitud de pulso (PAM).

La otra técnica utiliza una tensión fija del circuito intermedio.

La tensión del motor se convierte en variable mediante la aplicación de la tensión del circuito intermedio a las bobinas del motor durante períodos más largos o más cortos de tiempo.

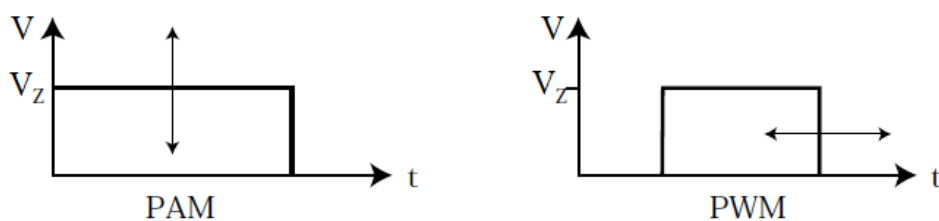


Figura A.13 Modulación por amplitud y ancho de pulso.

La frecuencia se cambia al variar los pulsos de tensión a lo largo del tiempo - de manera positiva para la mitad del período y negativamente para la otra. Esta técnica que cambia el ancho de los pulsos de tensión, es llamada Modulación por Ancho de Pulso o PWM (Pulse Width Modulation). La PWM es la técnica más común de control del inversor.

#### 4. Circuito de control

El circuito de control, o tarjeta de control, es el cuarto componente principal del convertidor de frecuencia y tiene cuatro tareas esenciales:

- El control de los semiconductores del convertidor de frecuencia
- Intercambio de datos entre el convertidor de frecuencia y periféricos
- Recopilación y reporte de mensajes de error
- Protección del convertidor de frecuencia y del motor.

Los microprocesadores han aumentado la velocidad del circuito de control, aumentando significativamente el número de aplicaciones adecuadas para las unidades y reduciendo el número de cálculos necesarios. Con los microprocesadores el procesador está integrado en el convertidor de frecuencia y siempre es capaz de determinar el patrón de pulsos óptimo para cada estado de funcionamiento.

La figura A.14 muestra un convertidor de frecuencia controlado por modulación de amplitud de pulso, o PAM, con interruptor de circuito intermedio. El circuito de control controla al chopper (2) y al inversor (3).

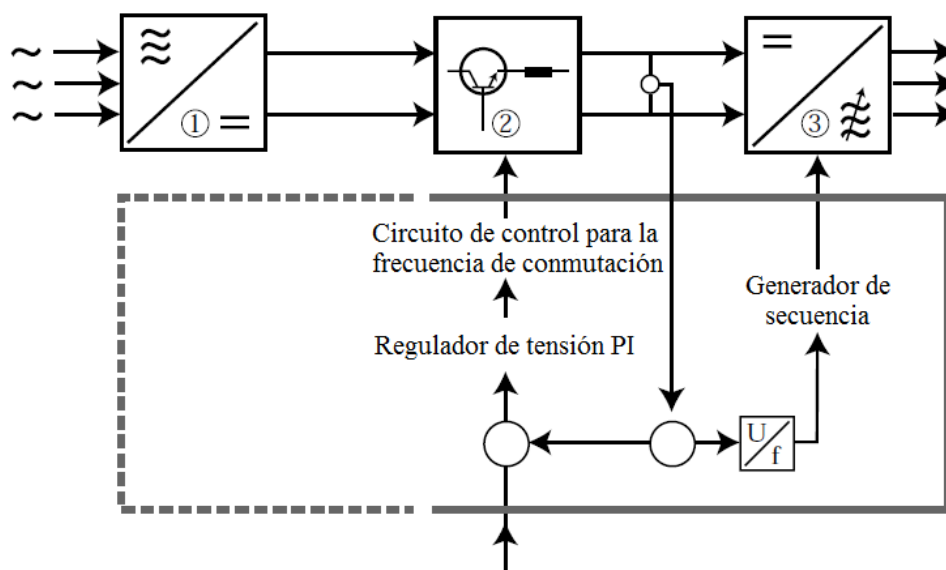


Figura A.14 Principio de un circuito de control.

Esto se hace de acuerdo con el valor instantáneo de la tensión del circuito intermedio.

La tensión del circuito intermedio controla un circuito que funciona como un contador de direcciones en el almacenamiento de datos. El almacenamiento de las secuencias de salida para el modelo de pulso del inversor. Cuando aumenta la tensión del circuito intermedio, la cuenta es más rápida, la secuencia se completa más rápido y aumenta la frecuencia de salida.

En lo que respecta al control del chopper, la tensión del circuito intermedio primero es comparada con el valor de la señal de referencia. Esta señal de tensión espera que dé una tensión de salida y frecuencia correctas. Si la referencia y las señales del circuito intermedio varían, un regulador PI informa a un circuito que el tiempo de ciclo debe ser cambiado. Esto lleva a un ajuste de la tensión del circuito intermedio de la señal de referencia.

# **Apéndice B**

## **Leyes de Afinidad.**

Cabe aclarar que la base del ahorro de energía, aplicando variadores de frecuencia, está en las leyes de afinidad, estas nacen de las leyes de la semejanza de las máquinas hidráulicas y ventiladores, por lo que en este apartado se habla de dos casos específicos, aunque se puede aplicar a otras máquinas.

En los ensayos de máquinas hidráulicas se hace la hipótesis que la semejanza geométrica implica la semejanza mecánica.

Esto equivale a suponer que algunas variables no entran en juego, y que por tanto el rendimiento del modelo y del prototipo es el mismo. Aunque en la realidad no sucede así, la hipótesis anterior ha conducido a excelentes resultados, excepto en lo que respecta a predicción de eficiencias.

En el ensayo de bombas se ha utilizado la siguiente fórmula con buenos resultados:

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{\frac{1}{10}} \quad \text{A.01}$$

la cual relaciona los rendimientos de una misma bomba (por tanto escala 1/1), funcionando a velocidades diferentes.

Como las leyes que rigen la experimentación con modelos están basadas en la semejanza geométrica, se llaman *leyes de semejanza*.

Las leyes de semejanza sirven

- Para predecir el comportamiento de una máquina de distinto tamaño; pero geoméricamente semejante a otra cuyo comportamiento (caudal, potencia, etc.) se conoce, trabajando en las mismas condiciones.
- Para predecir el comportamiento de una misma máquina (la igualdad es un caso particular de la semejanza), cuando varía alguna de sus características, por ejemplo en una bomba para predecir como varía la altura efectiva cuando varía el número de revoluciones.

Las seis leyes de semejanza de las bombas hidráulicas.

Las tres primeras leyes se refieren a la misma bomba ( $D'/D'' = 1$ : designamos con ' y '' las dos bombas que en este caso son una misma, pero funcionando en condiciones distintas) y expresan

*La variación de las características de una misma bomba o de bombas iguales cuando varía el número de revoluciones*

- Primera ley: Los caudales son directamente proporcionales a las velocidades angulares:

$$\frac{Q'}{Q''} = \frac{n'}{n''} \quad \text{A.02}$$

- Segunda ley: Las alturas útiles son directamente proporcionales a los cuadrados de las velocidades angulares:

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \quad \text{A.03}$$

- Tercera ley: Las potencias útiles son directamente proporcionales a los cubos de las velocidades angulares:

$$\frac{P'}{P''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 \quad \text{A.04}$$

Las siguientes tres leyes se refieren a dos bombas geoméricamente semejantes, pero de diámetro distinto y expresan la variación de características de dos bombas geoméricamente semejantes con el tamaño, si se mantiene constante el número de revoluciones.

En realidad estas leyes no son necesarias para nuestro estudio, de tal forma que solo serán mencionadas.

- Cuarta ley: Los caudales son directamente proporcionales al cubo de la relación de diámetros.
- Quinta ley: Las alturas útiles son directamente proporcionales al cuadrado de la relación de los diámetros.
- Sexta ley: Las potencias útiles son directamente proporcionales a la quinta potencia de la relación de los diámetros.

Las once leyes de semejanza de los ventiladores

El ventilador básicamente es una bomba para gases. Por tanto, las seis leyes de semejanza de las bombas son aplicables a los ventiladores; pero en estos se suele utilizar presiones en lugar de alturas. Por otra parte, en los ventiladores es interesante también estudiar su comportamiento cuando varía la densidad del gas (no dentro de la maquina, en la cual es prácticamente constante, si no de un lugar geográfico a otro o de un día a otro).

Dada la similitud con las leyes para bombas solo serán mencionadas las leyes de los ventiladores.

En un mismo ventilador:

- Primera ley: Los caudales son directamente proporcionales a las velocidades angulares.
- Segunda ley: Las presiones totales engendradas son directamente proporcionales al cuadrado de las velocidades angulares.
- Tercera ley: Las potencias son directamente proporcionales al cubo de las velocidades angulares.

En ventiladores geoméricamente semejantes:

- Cuarta ley: Los caudales son directamente proporcionales al cubo de los diámetros.
- Quinta ley: Las presiones totales engendradas son directamente proporcionales al cuadrado de los diámetros.



- Sexta ley: Las potencias son directamente proporcionales a la quinta potencia de los diámetros.
- Séptima ley: Los caudales no varían con la densidad del aire.
- Octava ley: Las presiones estáticas producidas varían en relación directa con la densidad.
- Novena Ley: Las potencias absorbidas varían directamente con la densidad.
- Décima ley: Las presiones estáticas producidas son directamente proporcionales a la presión barométrica e inversamente proporcionales a la temperatura absoluta.
- Undécima ley: Las potencias son directamente proporcionales a la presión barométrica e inversamente proporcionales a la temperatura absoluta.

Como podemos observar, las tres primeras leyes de semejanza son parecidas en ambos casos, y aplican para otras maquinas también, por lo que a ese conjunto se les denomina Leyes de la Afinidad, tomando en cuenta que pueden cambiar de variables pero en concepto trabajan igual.

**Apéndice C**  
**Hoja de datos técnicos del**  
**variador de frecuencia.**

## Mains Supply (L1, L2, L3):

---

Supply voltage.....	200 – 240 V $\pm$ 10%
	380 – 480 V $\pm$ 10%
	525 – 600 V $\pm$ 10%
Supply frequency.....	50/60 Hz
Max. imbalance temporary between mains phases..	3.0% of rated supply voltage
True Power Factor ( $\lambda$ ).....	$\geq$ 0.9 nominal at rated load
Displacement Power Factor (cos $\phi$ )..	near unity ( $>$ 0.98)
Switching on input supply	
L1, L2, L3 (power-ups) $\leq$ 10 HP...max.	2 times/min.
L1, L2, L3 (power-ups) $\geq$ 15 HP.....	maximum 1 time/min.
Environment according to	
EN60664-1...overvoltage category III/pollution degree 2.	

---

*The unit is suitable for use on a circuit capable of delivering not more than 100.000 RMS symmetrical Amperes, 240/480/600 V.*

---

## Motor Output (U, V, W):

---

Output voltage.....	0 – 100% of supply voltage
Output frequency.....	0 – 120 Hz
Switching on output.....	Unlimited
Ramp times.....	1 – 3600 sec.

---

## Torque Characteristics:

---

Starting torque	
(Constant torque).....	maximum 110% for 60 sec.*
Starting torque.....	maximum 135% up to 0.5 sec.*
Overload torque	
(Constant torque).....	maximum 110% for 60 sec.*

*\*Percentage relates to the nominal torque.*

---

## Cable Lengths and Cross Sections:

---

Max. motor cable length, shielded.....	165 ft (50 m)
Max. motor cable length, unshielded.....	1000 ft (300 m)
Maximum cross section	
To motor, mains, load sharing and brake*	
To control terminals,	
Rigid wire:.....	16 AWG /1.5 mm <sup>2</sup> (2 x 0.75 mm <sup>2</sup> )
Flexible cable.....	18 AWG/1 mm <sup>2</sup>
Cable with enclosed core.....	20 AWG/0.5 mm <sup>2</sup>
Minimum cross section	
To control terminals.....	24 AWG/0.25 mm <sup>2</sup>

---

*\*See Mains Supply table for more information)*

## Protection and Features:

- 
- Electronic thermal motor protection against overload.
  - Temperature monitoring of the heatsink ensures that the drive trips if the temperature reaches a predefined level. An overload temperature cannot be reset until the temperature of the heatsink is below the values stated in the tables on the following pages (Guideline - these temperatures may vary for different power sizes, enclosures, etc.).
  - The drive is protected against short-circuits on motor terminals U, V, W.
  - If a mains phase is missing, the drive trips or issues a warning (depending on the load).
  - Monitoring of the intermediate circuit voltage ensures that the drive trips if the intermediate circuit voltage is too low or too high.
  - The drive constantly checks for critical levels of internal temperature, load current, high voltage on the intermediate circuit and low motor speeds. As a response to a critical level, the drive can adjust the switching frequency and/ or change the switching pattern in order to ensure the performance of the drive.
- 

## Digital Inputs:

---

Programmable digital inputs.....	4 (6)
Terminal number.....	18, 19, 27 <sup>1)</sup> , 29, 32, 33,
Logic.....	PNP or NPN
Voltage level.....	0 – 24 VDC
Voltage level, logic '0' PNP.....	$<$ 5 VDC
Voltage level, logic '1' PNP.....	$>$ 10 VDC
Voltage level, logic '0' NPN <sup>2)</sup> .....	$>$ 19 VDC
Voltage level, logic '1' NPN <sup>2)</sup> .....	$<$ 14 VDC
Maximum voltage on input.....	28 VDC
Input resistance.....	approx. 4 k $\Omega$

---

*All digital inputs are galvanically isolated from the supply voltage (PELV) and other high-voltage terminals.*

*1) Terminals 27 and 29 can also be programmed as output.*

## Analog Inputs:

---

Number of analog inputs.....	2
Terminal number.....	53, 54
Modes.....	Voltage or current
Mode select.....	Switch S201 and switch S202
Voltage mode.....	Switch S201/switch S202 = OFF (U)
Voltage level.....	0 to +10 (scaleable)
Input resistance.....	approx. 10 k
Max. voltage.....	± 20 V
Current mode.....	Switch S201/switch S202 = ON (I)
Current level.....	0/4 to 20 mA (scaleable)
Input resistance.....	approx. 200 Ω
Max. current.....	30 mA
Resolution for analog inputs.....	10 bit (+ sign)
Accuracy of analog inputs....	Max. error 0.5% full scale
Bandwidth.....	200 Hz

---

*The analog inputs are galvanically isolated from the supply voltage (PELV) and other high-voltage terminals.*

## Pulse Inputs:

---

Programmable pulse inputs.....	2
Terminal number pulse/encoder.....	29, 33
Max. frequency at terminal 29, 33.....	110 kHz (Push-pull driven) 5 kHz (open collector)
Min. frequency at terminal 29, 33.....	4 Hz
Voltage level.....	see section on Digital input
Maximum voltage on input.....	28 VDC
Input resistance.....	approx. 4 kΩ
Pulse input accuracy (0.1 - 1 kHz).....	Max. error: 0.1% of full scale

---

*The pulse and encoder inputs (terminals 29, 32, 33) are galvanically isolated from the supply voltage (PELV) and other high-voltage terminals.*

## Analog Output:

---

Number of programmable analog outputs.....	1
Terminal number.....	42
Current range at analog output.....	0/4 – 20 mA
Max. load to common at analog output.....	500 Ω
Accuracy on analog output....	Max. error: 0.5 % of full scale
Resolution on analog output.....	8 bit

---

*The analog output is galvanically isolated from the supply voltage (PELV) and other high voltage terminals.*

### Control Card, RS 485 Serial Communication:

---

Terminal number.....	68 (P,TX+, RX+), 69 (N,TX-, RX-)
Terminal number.....	61 Common for terminals 68 and 69

---

*The RS 485 serial communication circuit is functionally separated from other central circuits and galvanically isolated from the supply voltage (PELV).*

### Digital Output:

---

Programmable digital/pulse outputs.....	2
Terminal number.....	27, 29 <sup>1)</sup>

Voltage level at digital/frequency output.....	0 – 24 V
Max. output current (sink or source).....	40 mA
Max. load at frequency output.....	1 kΩ
Max. capacitive load at frequency output.....	10 nF
Minimum output frequency at frequency output.....	0 Hz
Maximum output frequency at frequency output.....	32 kHz
Accuracy of frequency output..	Max. error: 0.1 % of full scale
Resolution of frequency outputs.....	12 bit

---

*1) Terminal 27 and 29 can also be programmed as input.*

*The digital output is galvanically isolated from the supply voltage (PELV) and other high-voltage terminals.*

### Control Card, 24 V DC Output:

---

Terminal number.....	12, 13
Max. load.....	200 mA

---

*The 24 VDC supply is galvanically isolated from the supply voltage (PELV), but has the same potential as the analog and digital inputs and outputs.*

## Relay Outputs:

---

Programmable relay outputs.....	2
Relay 01 Terminal number.....	1-3 (break), 1-2 (make)
Max. terminal load (AC-1) <sup>1)</sup>	
on 1-3 (NC), 1-2 (NO) (Resistive load).....	240 VAC, 2 A
Max. terminal load (AC-15) <sup>1)</sup>	
(Inductive load @ cosφ 0.4).....	240 VAC, 0.2 A
Max. terminal load (DC-1) <sup>1)</sup>	
on 1-2 (NO), 1-3 (NC) (Resistive load).....	60 VDC, 1A
Max. terminal load (DC-13) <sup>1)</sup>	
(Inductive load).....	24 VDC, 0.1A
Relay 02 Terminal number.....	4-6 (break), 4-5 (make)
Max. terminal load (AC-1) <sup>1)</sup> on 4-5 (NO)	
(Resistive load).....	400 VAC, 2 A
Max. terminal load (AC-15) <sup>1)</sup> on 4-5 (NO)	
(Inductive load @ cosφ 0.4).....	240 VAC, 0.2 A
Max. terminal load (DC-1) <sup>1)</sup> on 4-5 (NO)	
(Resistive load).....	80 VDC, 2 A
Max. terminal load (DC-13) <sup>1)</sup> on 4-5 (NO)	
(Inductive load).....	24 VDC, 0.1A
Max. terminal load (AC-1) <sup>1)</sup> on 4-6 (NC)	
(Resistive load).....	240 VAC, 2 A
Max. terminal load (AC-15) <sup>1)</sup> on 4-6 (NC)	
(Inductive load @ cosφ 0.4).....	240 VAC, 0.2A
Max. terminal load (DC-1) <sup>1)</sup> on 4-6 (NC)	
(Resistive load).....	50 VDC, 2 A
Max. terminal load (DC-13) <sup>1)</sup> on 4-6 (NC)	
(Inductive load).....	24 VDC, 0.1 A
Min. terminal load on 1-3 (NC), 1-2 (NO),	
4-6 (NC), 4-5 (NO).....	24 VDC 10 mA, 24 VAC 20 mA
Environment according	
to EN 60664-1.....	overvoltage category III/pollution degree 2

---

1) IEC 60947 part 4 and 5

*The relay contacts are galvanically isolated from the rest of the circuit by reinforced isolation (PELV).*

## Control Card, 10 V DC Output:

---

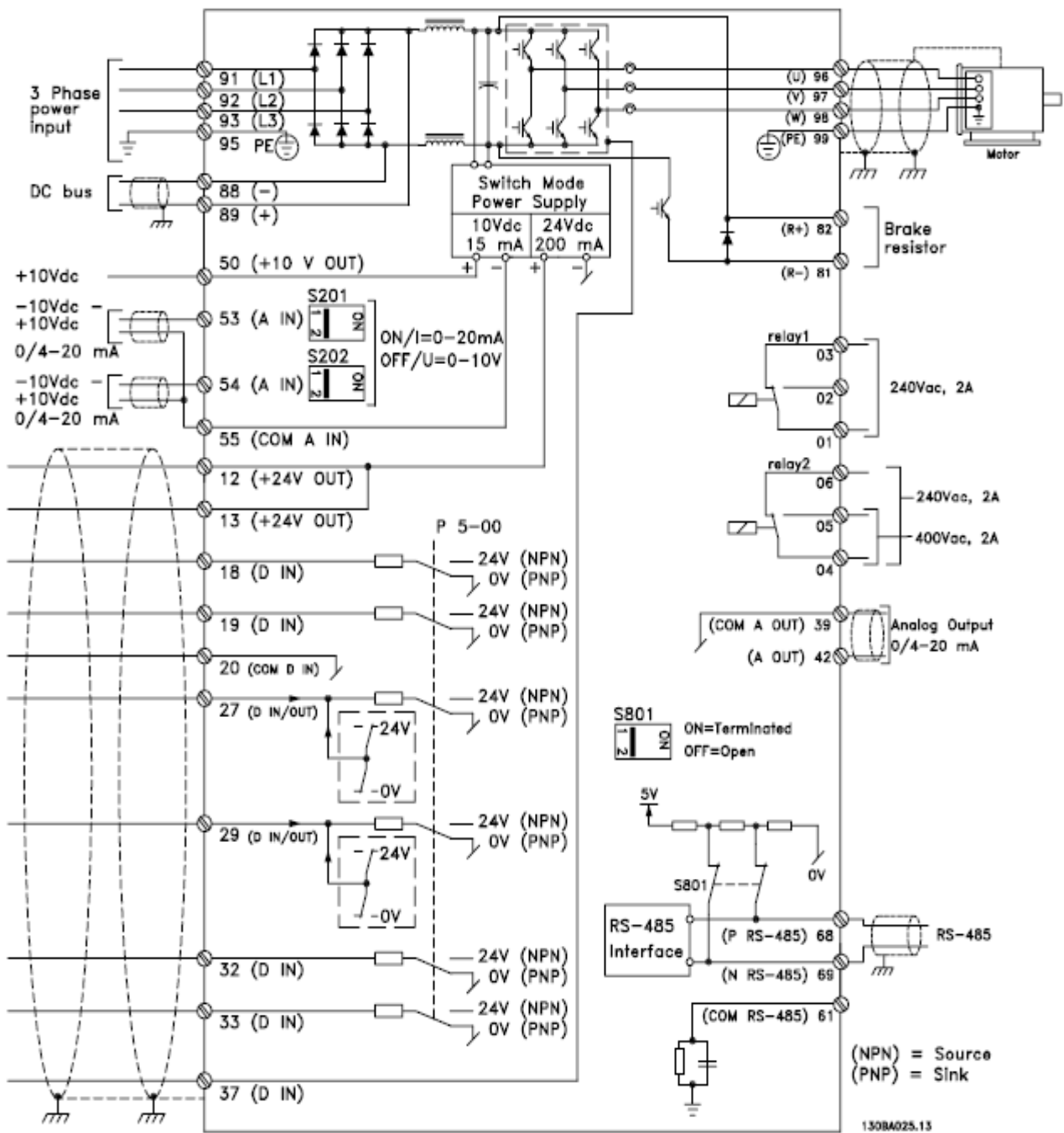
Terminal number.....	50
Output voltage.....	10.5 V ±0.5 V
Max. load.....	15 mA

---

*The 10 V DC supply is galvanically isolated from the supply voltage (PELV) and other high-voltage terminals.*

### Connection example

This diagram shows a typical installation of the VLT HVAC Drive. The numbers represent the terminals on the drive.



# Referencias

## Capítulo 1.

- ENDESA, Subdirección de selección y formación. “Curso de energía eólica”, Septiembre 2007
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. “Generación de electricidad”,  
URL <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/publicaciones/genElectricidad/Paginas/Generaciondeelectricidad.aspx>
- BBC Mundo SHUKMAN, DAVID. “Nuevo récord de CO<sub>2</sub> en la atmósfera”, Marzo 2006,  
URL <http://terranoticias.terra.es/articulo/html/av2781825.htm>
- RODRIGUEZ, Bárbara Angélica. “Fuentes renovables de energía”, Octubre 2009  
URL [http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_24\\_energias\\_renovables](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_24_energias_renovables)
- BIBLIOTECA UNED. “Impacto de la energía”, Edición de internet, Noviembre 2009,  
URL <http://www.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/impacto.htm>
- COMISIÓN NACIONAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA. “Control de la demanda eléctrica”,  
URL <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/WWW/www.conae.gob.mx/programas/control/control01.html#alcances>
- FIDE, XIX CONGRESO INTERNACIONAL DE AHORRO DE ENERGÍA. “Calentamiento global, solución: energías limpias”, Guadalajara Jalisco, Agosto 2008
- ESCOBAR DELGADILLO, Jéssica Lorena y JIMÉNEZ RIVERA, Jesús Salvador. “Crisis económica, crisis energética y libre mercado”, Revista digital universitaria, Vol. 10, No.5, UNAM, Mayo de 2009
- GUTIERREZ CHAMORRO, Javier. “Generación eléctrica en plantas diesel”, Revista de la asociación de ingenieros del ICAI, Volumen LXXVII. Fascículo IV. Julio-Agosto 2000
- GRANADOS GARCIA, Ricardo. “Generación de electricidad y medio ambiente: el reto de la sostenibilidad”, Revista de la asociación de ingenieros del ICAI, Volumen LXXXII, Fascículo VI, Noviembre-Diciembre 2005.
- KARVALA, David. “Cambiar el mundo para salvar el planeta”, octubre 2009

## Capítulo 2.

- MATAIX, Claudio, Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas, Editoriales Castillo 1982.
- CHAPMAN J., Stephen, Máquinas eléctricas, Mc Graw Hill.
- DANFOSS INDUSTRIES, Facts Worth Know.
- DANFOSS INDUSTRIES, Guía de diseño VLT HVAC FC100.

## Capítulo 3.

- UNIDAD RESPONSABLE DE LA EVALUACIÓN DG POLÍTICA REGIONAL COMISIÓN EUROPEA. “Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión”, 2003.
- PROCOBRE. “Uso eficiente de la energía eléctrica”,  
URL [http://www.procobre.org/archivos/peru/uso\\_eficiente\\_energia\\_electrica.pdf](http://www.procobre.org/archivos/peru/uso_eficiente_energia_electrica.pdf)
- RODRÍGUEZ, René. “Ahorro de energía con variadores de frecuencia”, Revista Electroindustria, edición de internet, Agosto 2008,  
URL <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=1005&tip=7>

- PÉREZ LUDUEÑA, Jesús. “Ahorrando energía en aplicaciones de bombeo”, Revista Electroindustria, edición de internet, Mayo 2007,  
URL <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=693&rank=1>
- CONDENSADORAS UNICOM S.A de C.V. “Variadores de frecuencia – Ahorro de energía”,  
URL <http://www.condensadorasunicom.com/productos/index1.php>
- DANFOSS, S.A. “Convertidores de frecuencia VLT®”
- DANFOSS, S.A. “VLT® HVAC Drive”
- DANFOSS, S.A. “Guía de diseño del convertidor de frecuencia Danfoss VLT® HVAC”

#### **Capítulo 4.**

- Mataix, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Segunda edición. Ed. Alfa Omega
- R. Sherwood, David & J. Whistance, Dennis. The pipin guide. Segunda edición. Ed. Construction Trades Press, LLC.
- Waukesha Cherry-Burrell. Engineering manual. Primera edición.
- DANFOSS, S.A. “VLT® HVAC Drive applications”
- Danfoss. HVAC Application training.

#### **Apéndice A**

- DANFOSS INDUSTRIES, Facts Worth Know.

#### **Apéndice B**

- MATAIX, Claudio, Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas, Editoriales Castillo 1982.

#### **Apéndice C**

- DANFOSS INDUSTRIES, Facts Worth Know.