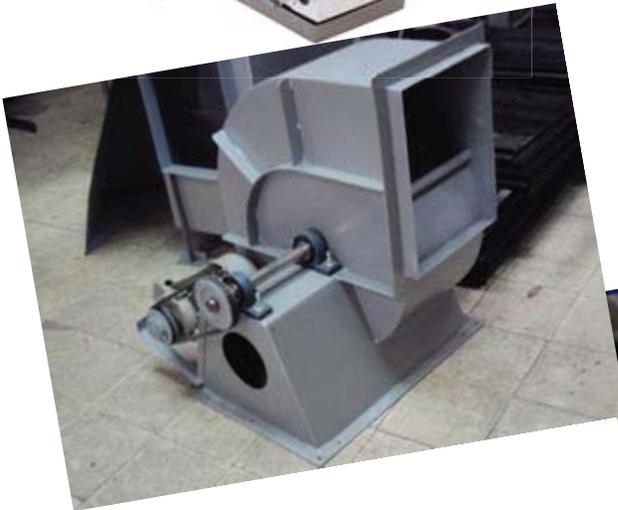




# Capítulo 3

## 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.

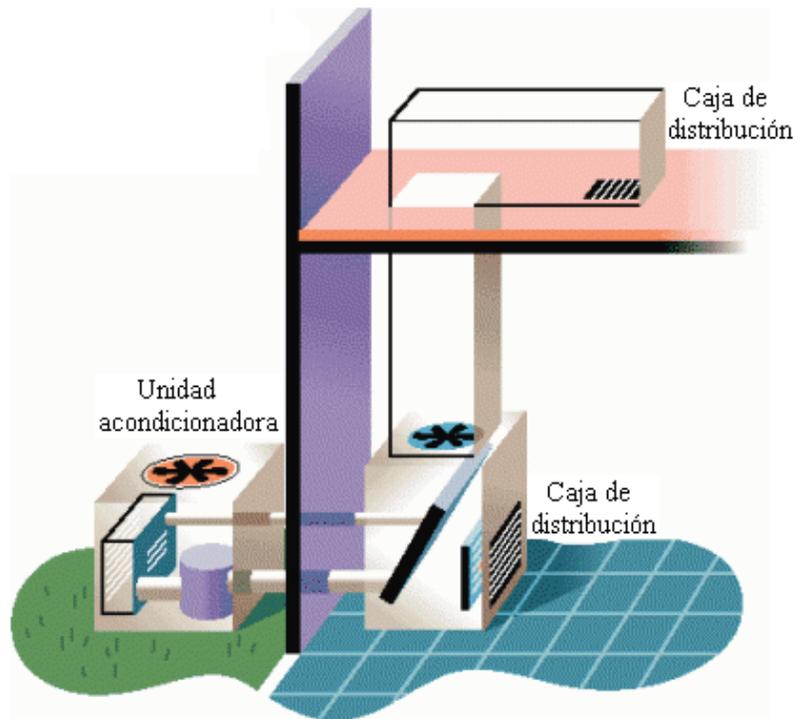


Figura 3.1. Sistema de ventilación de volumen de aire constante.

### 3.1.2 Volumen de Aire Variable (VAV)

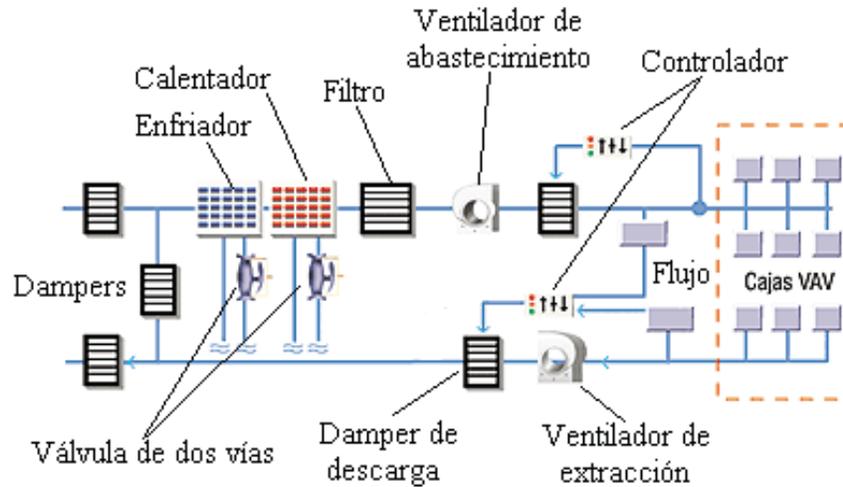


Figura 3.2. Sistema tradicional de volumen de aire variable.

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.

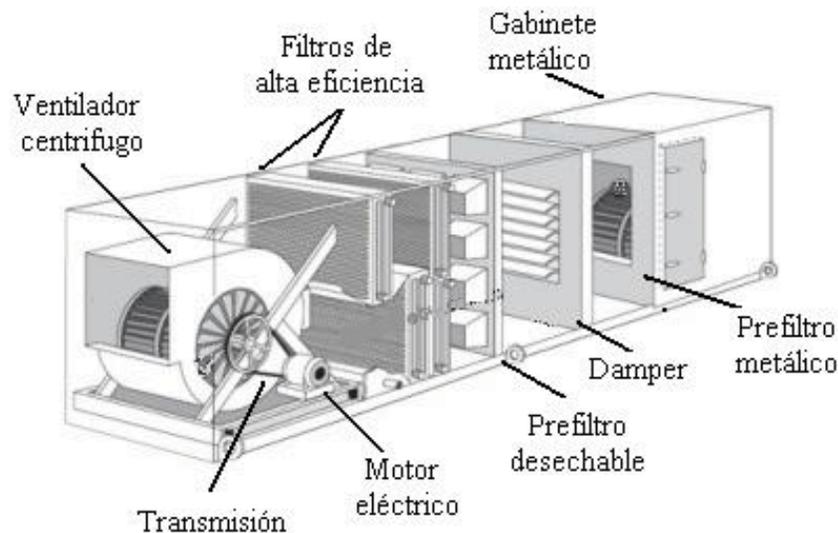


Figura 3.3. Manejadora de aire.

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.

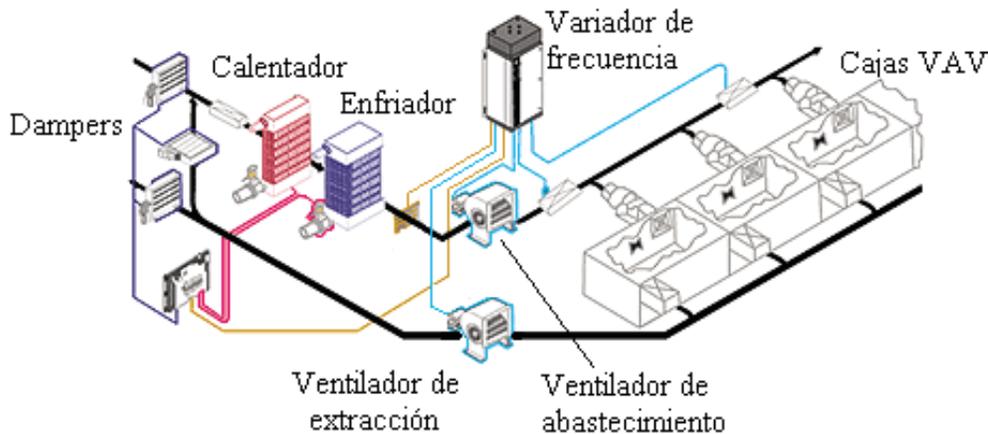


Figura 3.4. Aplicación VAV con variador de frecuencia.

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.

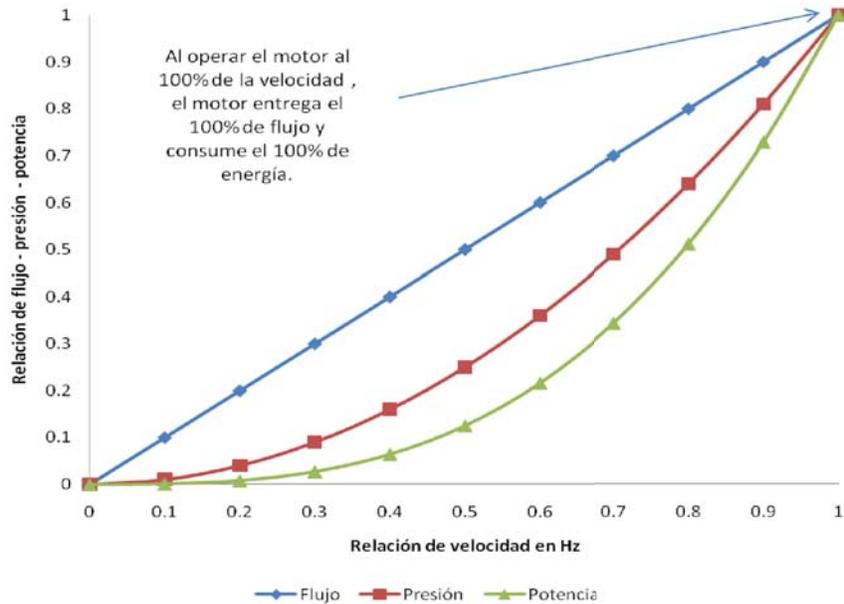


Figura 3.5. Operación y consumo de un motor eléctrico.

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.

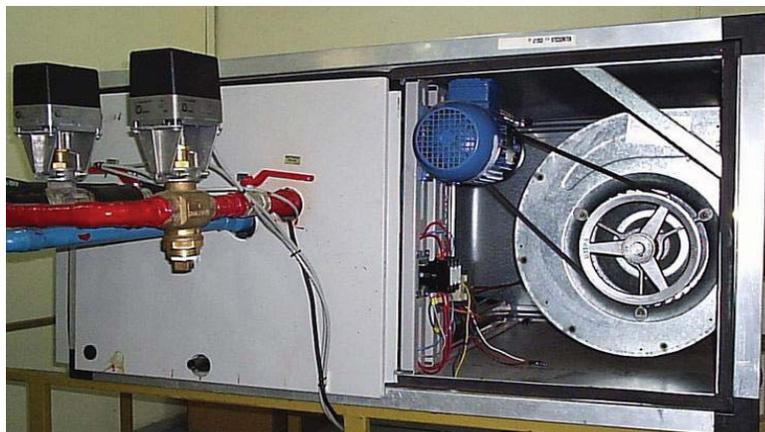
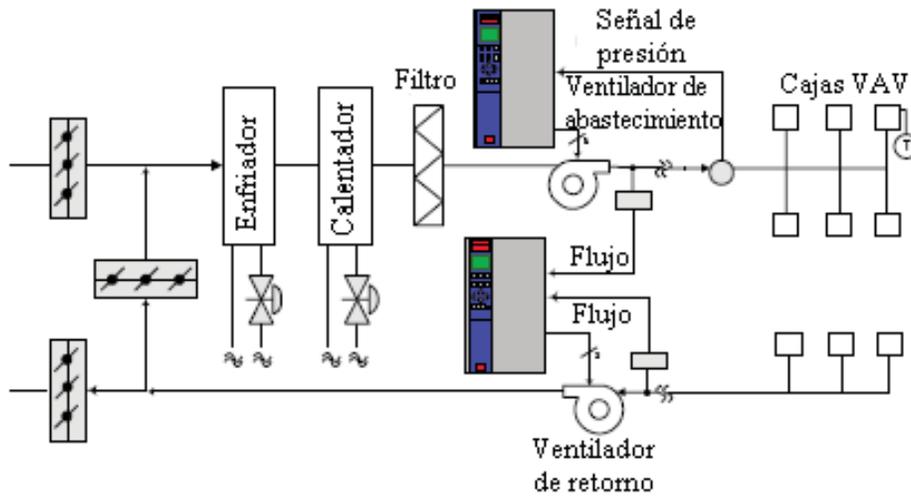


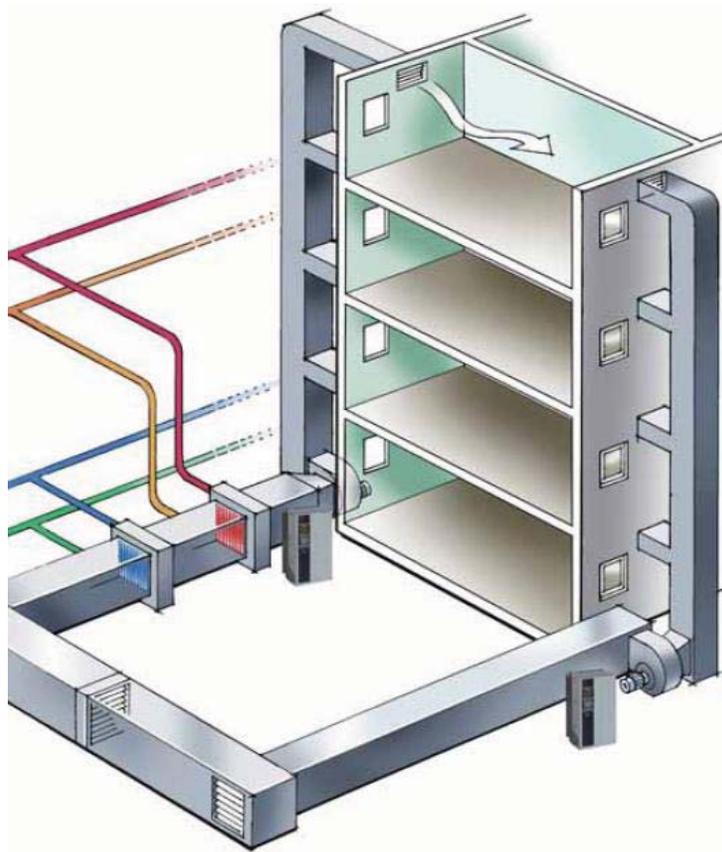
Figura 3.6. Unidad manejadora de aire.

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.

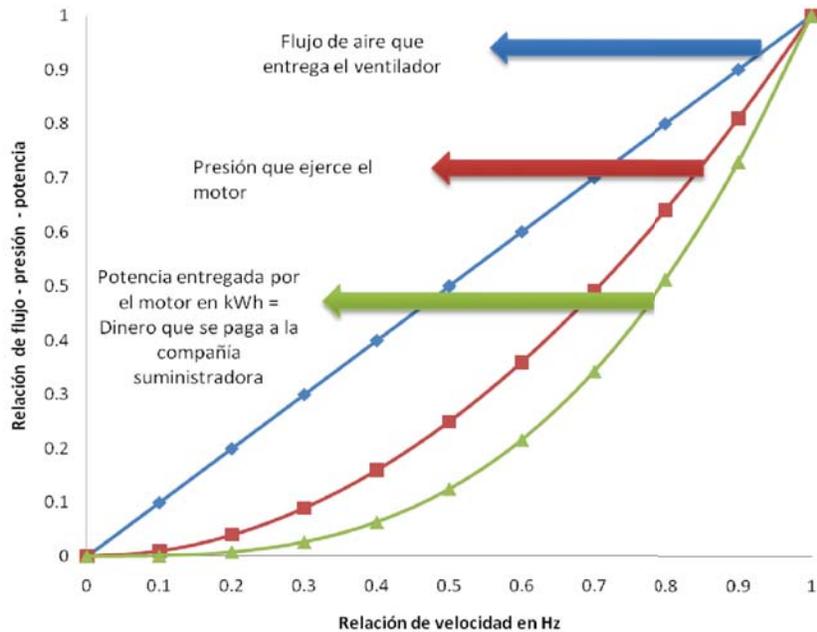


Figura 3.9. Leyes de afinidad centrífuga.

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.

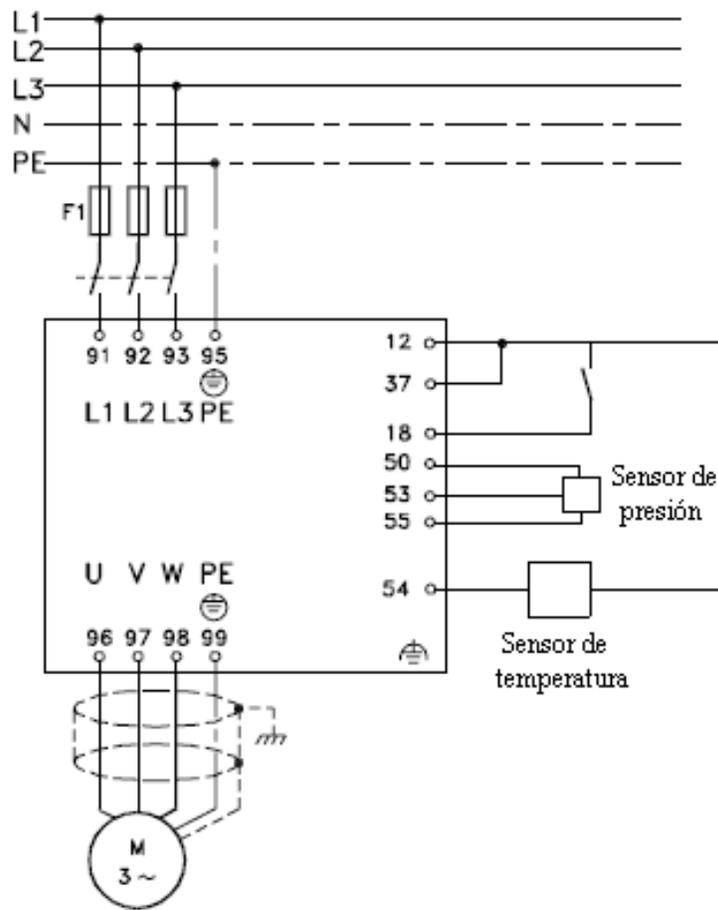


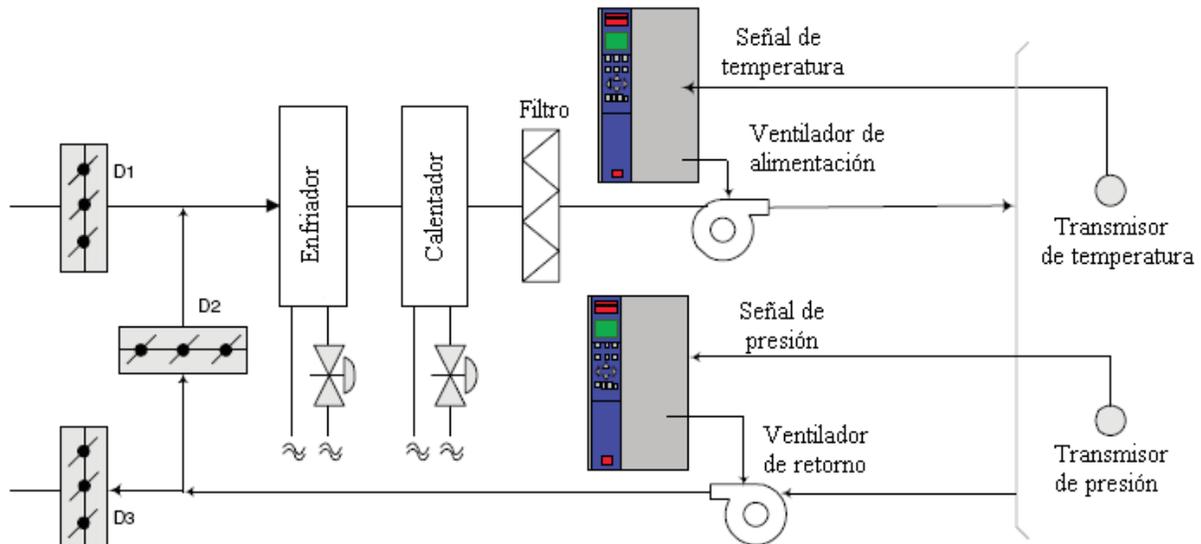
Figura 3.10. Sistema de ventilación.

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.

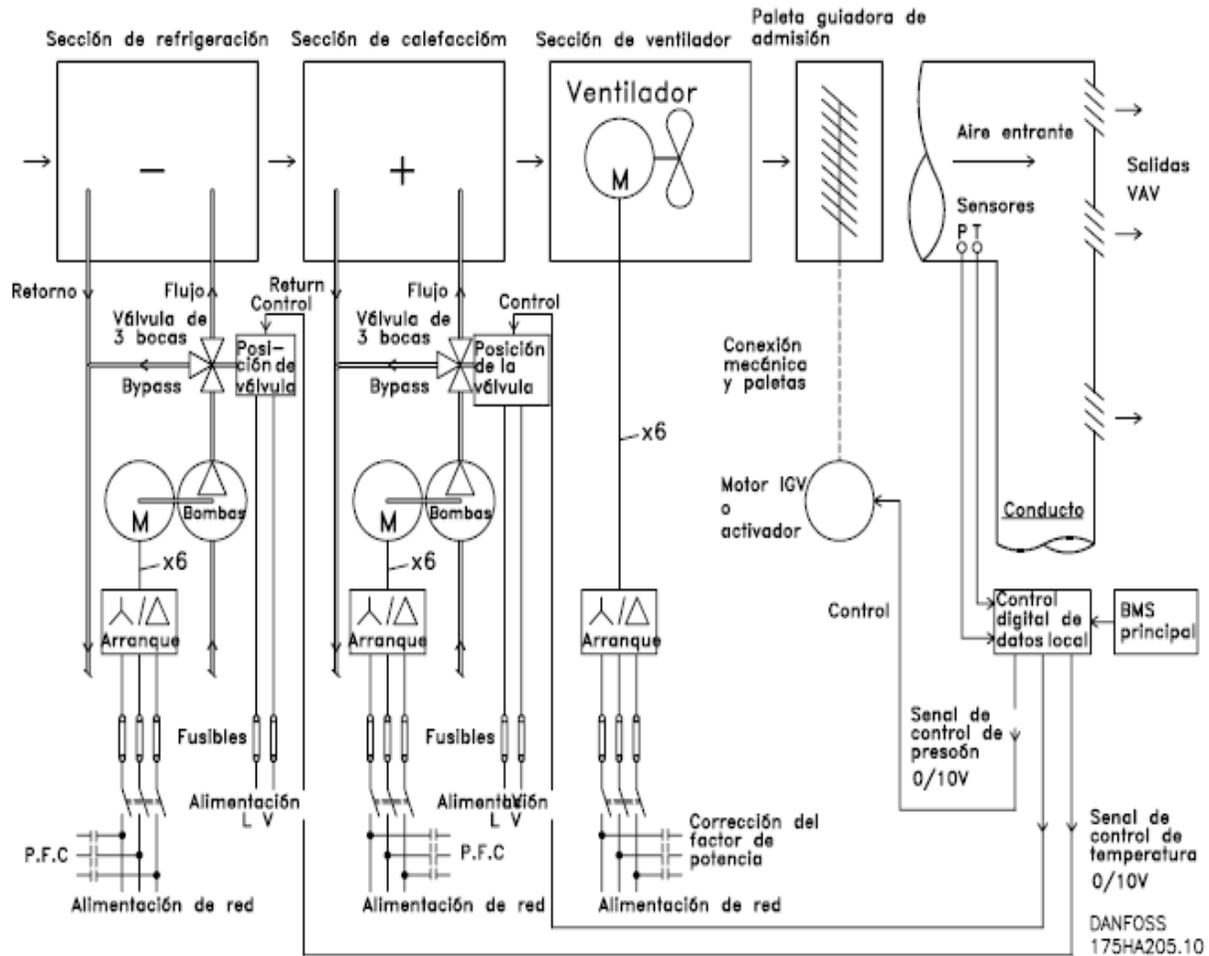
La opción tecnológica que se plantea se ajusta en la gran mayoría de los casos a las características físicas y económicas de los inmuebles, lo que la hace una solución altamente recomendable.

### 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:

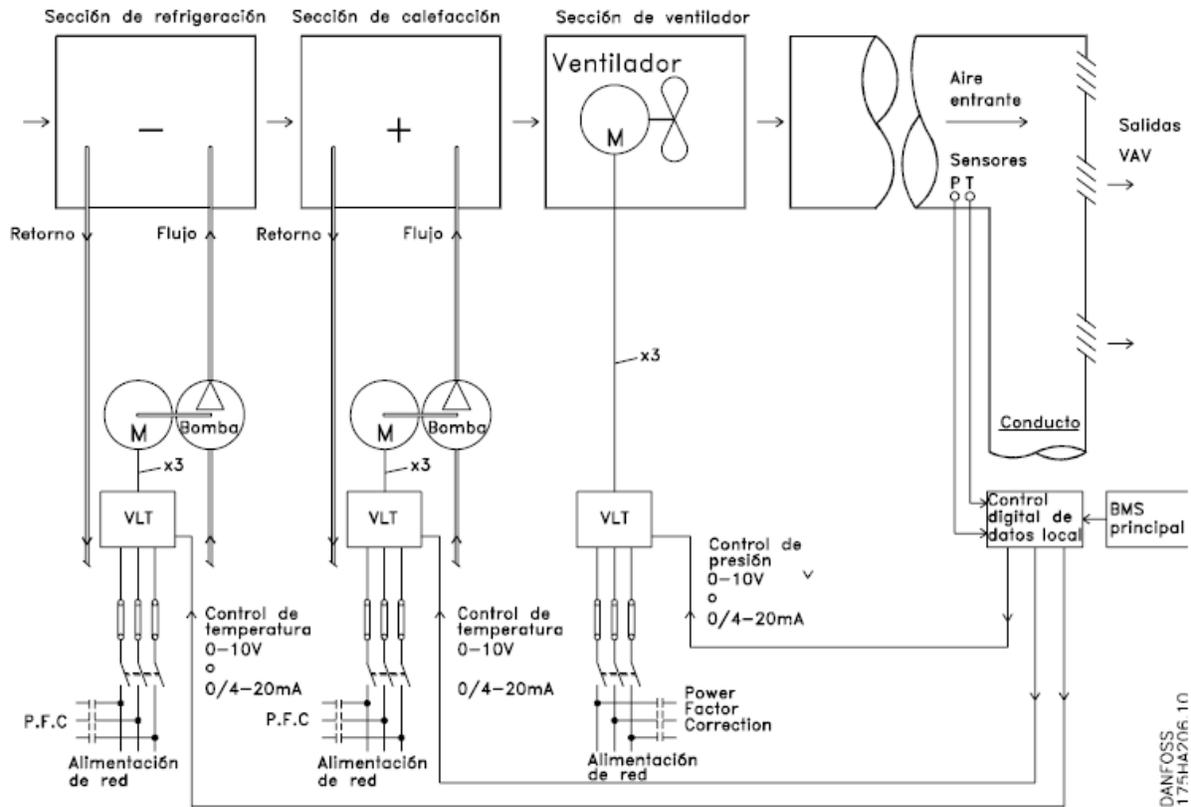
### 3.3.1 Costo

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.

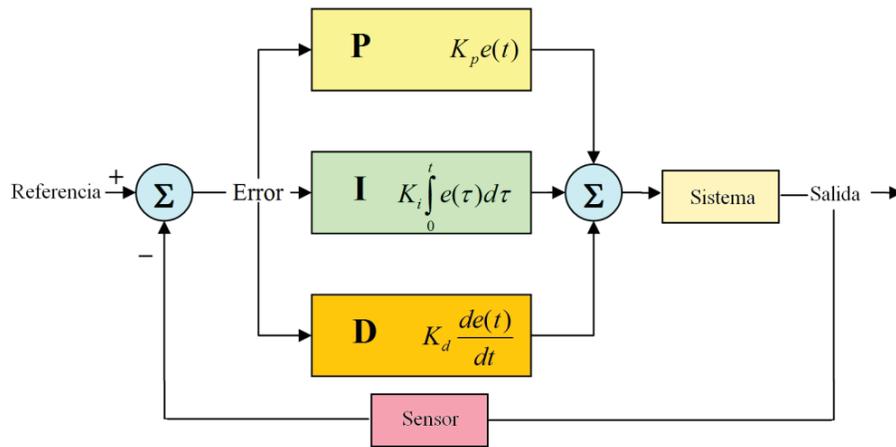


Figura 3.14. Diagrama de bloques de un controlador PID.

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.

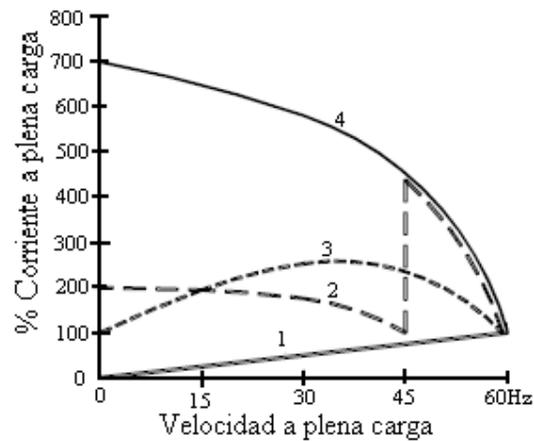


Figura 3.15. Formas típicas de arrancar un motor eléctrico.

- 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.

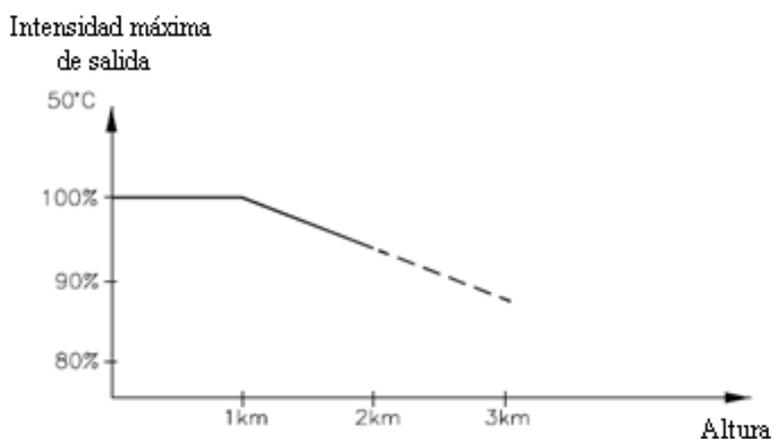


Figura 3.16. Reducción de la intensidad de salida en relación con la altitud a  $T_{AMB, MAX}$ .

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.

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

- 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:

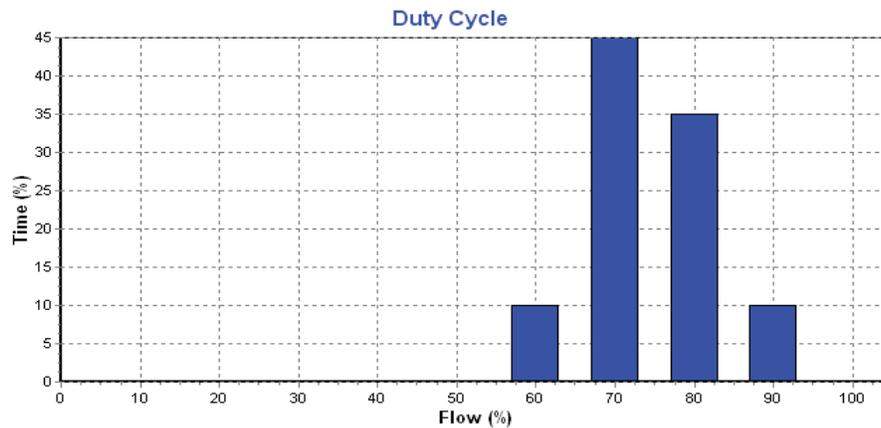


Figura 3.17. Ciclo de trabajo para una manejadora de aire de un sistema VAV.

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:

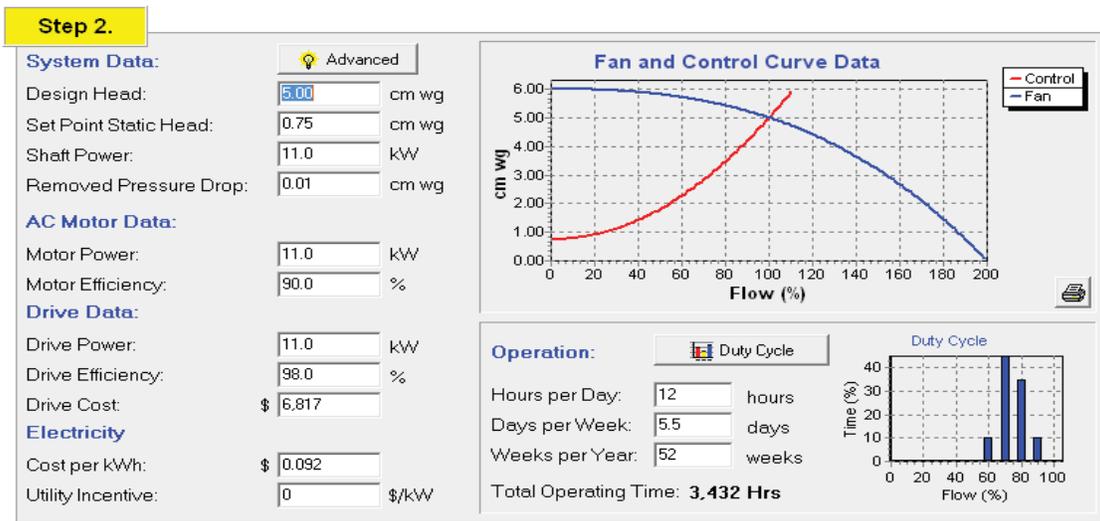


Figura 3.18. Pantalla principal del Energy box®.

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.

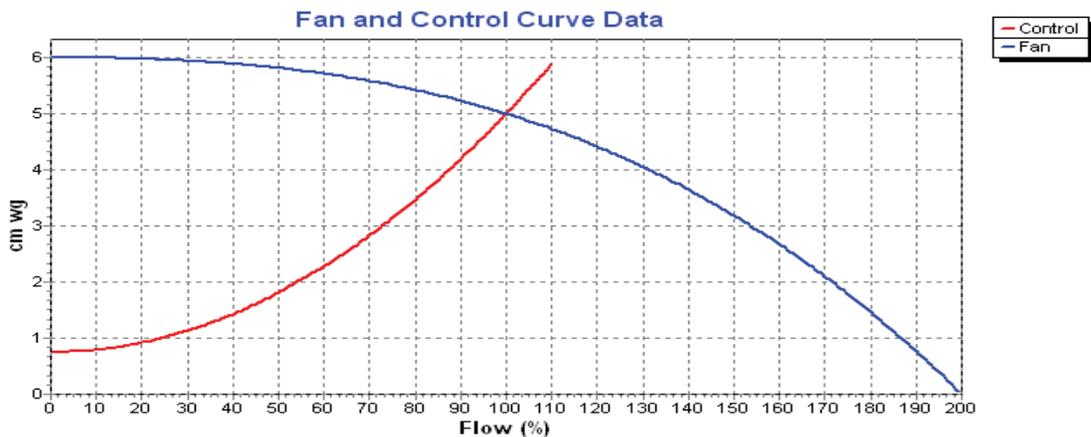


Figura 3.19. Punto de trabajo del ventilador centrifugo.

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.

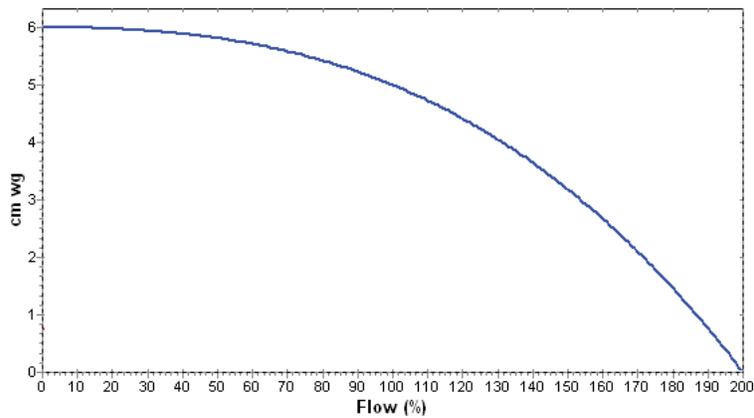


Figura 3.20. Curva característica del ventilador centrífugo.

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.

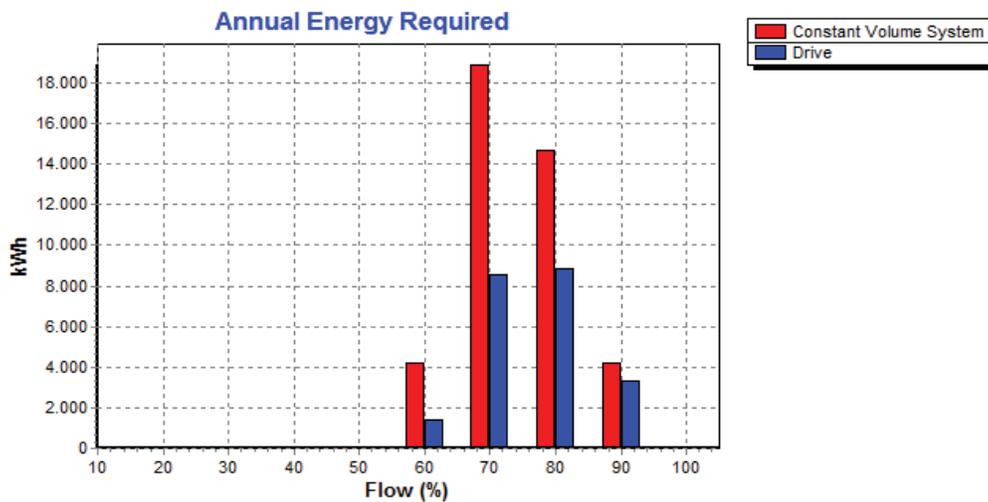


Figura 3.24. Energía consumida bajo un ciclo de trabajo propuesto.

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.

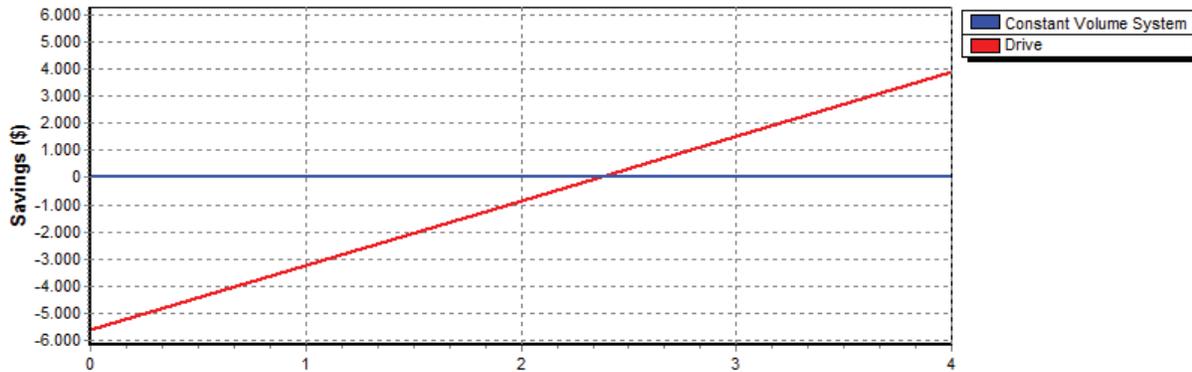


Figura 3.26. Tiempo de recuperación de la inversión.

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.