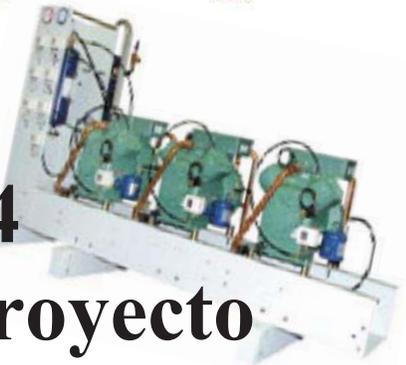




Capítulo 4

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.¹⁴

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 mecanismo¹⁵
 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

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

¹⁵ 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.

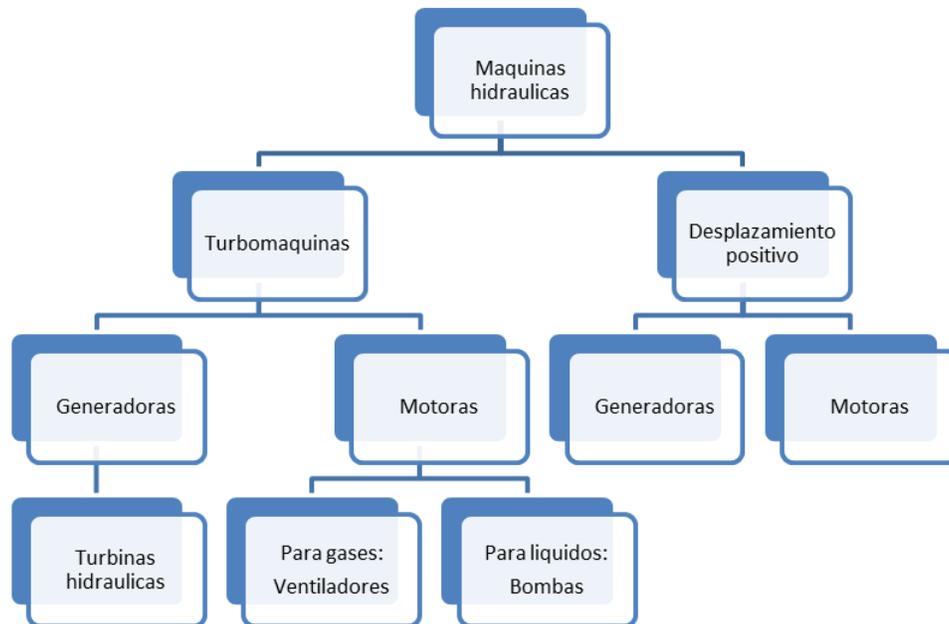


Figura 4.1 Clasificación de máquinas hidráulicas.

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.

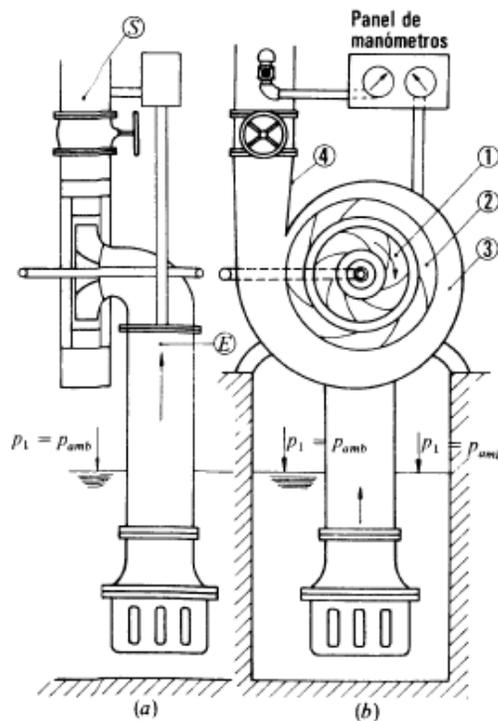
- Según la dirección del flujo: bombas de flujo radial, de flujo axial y de flujo radioaxial.
- Según la posición del eje: Bombas de eje horizontal, de eje vertical y de eje inclinado.
- Según la presión engendrada: Bombas de baja presión, de media presión y de alta presión.
- Según el número de flujos 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.

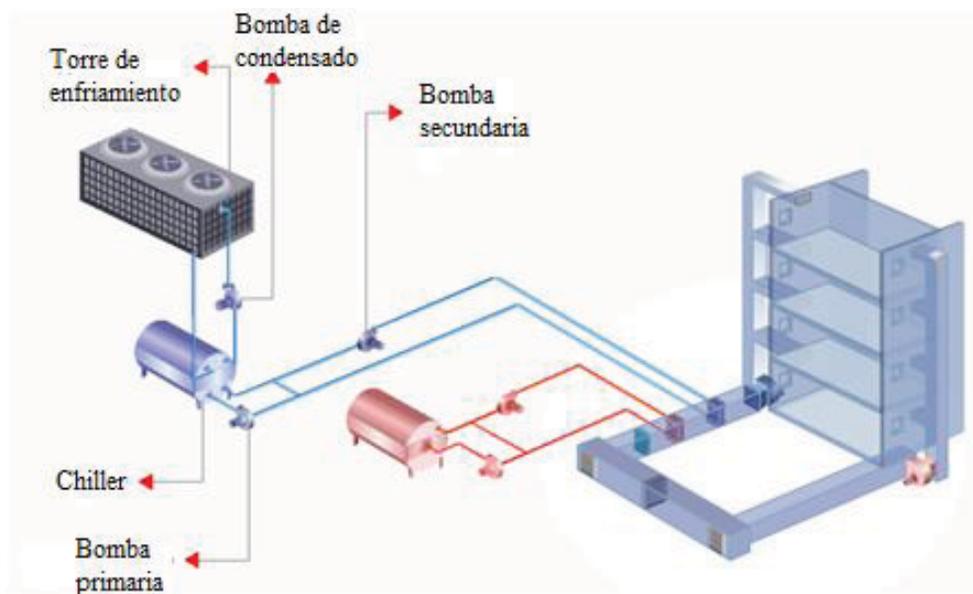
En los sistemas de aire acondicionado, como el mencionado en el capítulo anterior, el aire que es inyectado a los recintos a climatizar, se enfría mediante agua helada proporcionada por enfriadores (chillers), esta agua tiene que ser transportada por todo el sistema, hasta donde se encuentra la carga 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 serían 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.¹⁶



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.

¹⁶ 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.

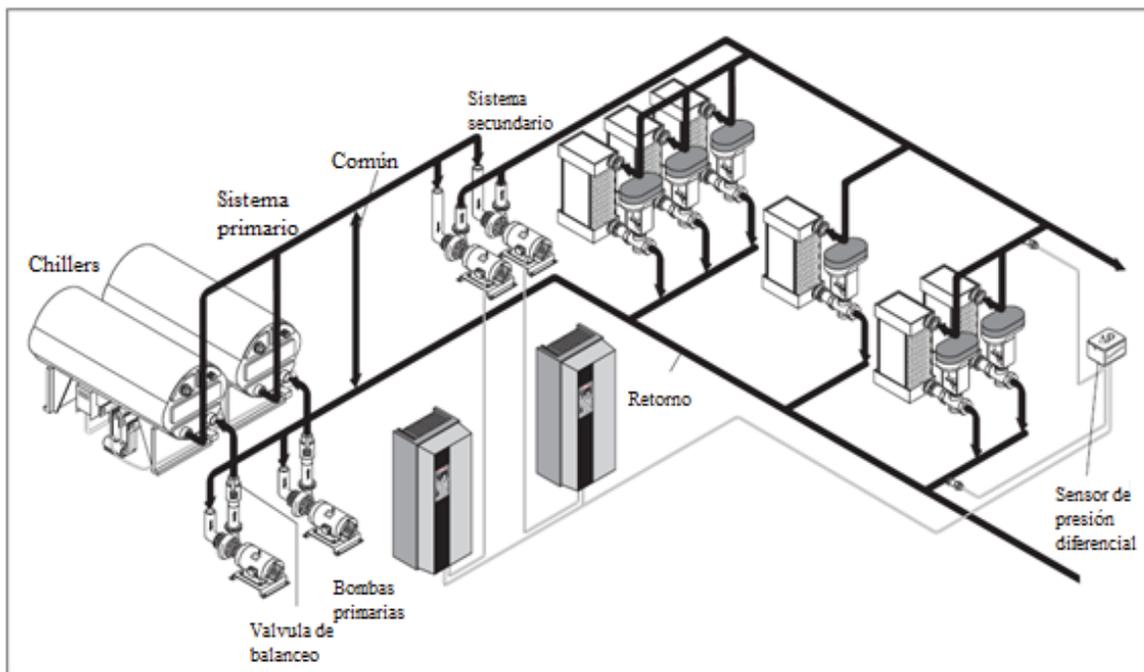
En estos sistemas, en ocasiones se divide el esfuerzo total en partes, esto quiere decir que en lugar de tener una sola bomba que se encargue del flujo, se pueden colocar dos o más dependiendo de las dimensiones del mismo, incluso si no es necesario, suele hacerse para tener un respaldo en caso de que 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 IP20¹⁷.

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.

¹⁷ 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.

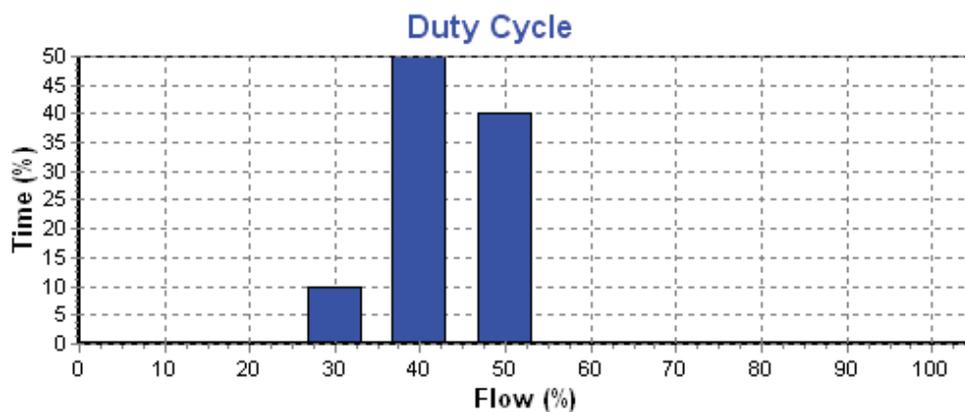


Figura 4.6 Ciclo de trabajo de bombas maestro-seguidor.

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®¹⁸, para empezar a generar los resultados de análisis de retorno de inversión, ver figura 4.7.

¹⁸ Para mayor información consultar el capítulo 3

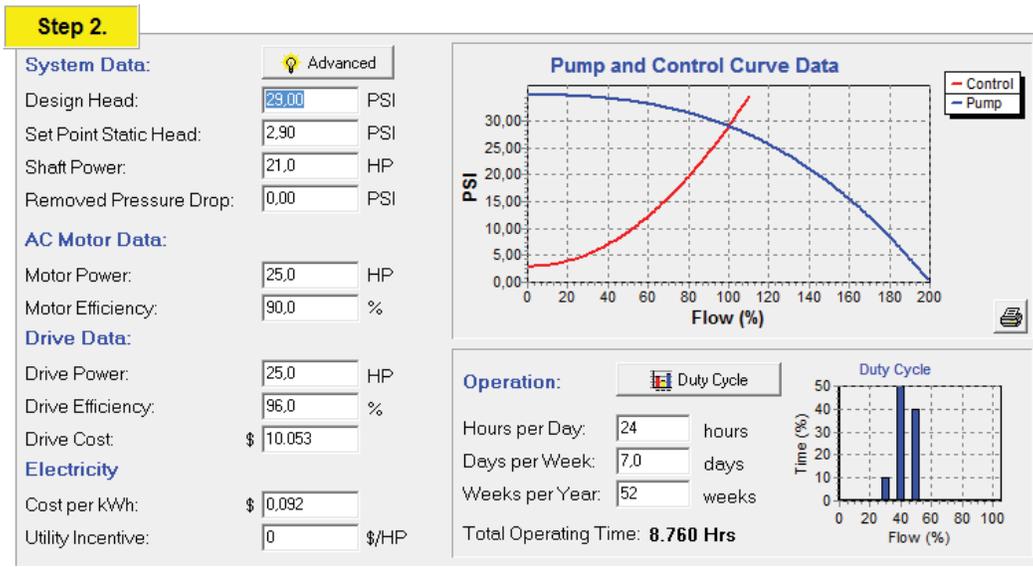


Figura 4.7 Pantalla del Energy box®.

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

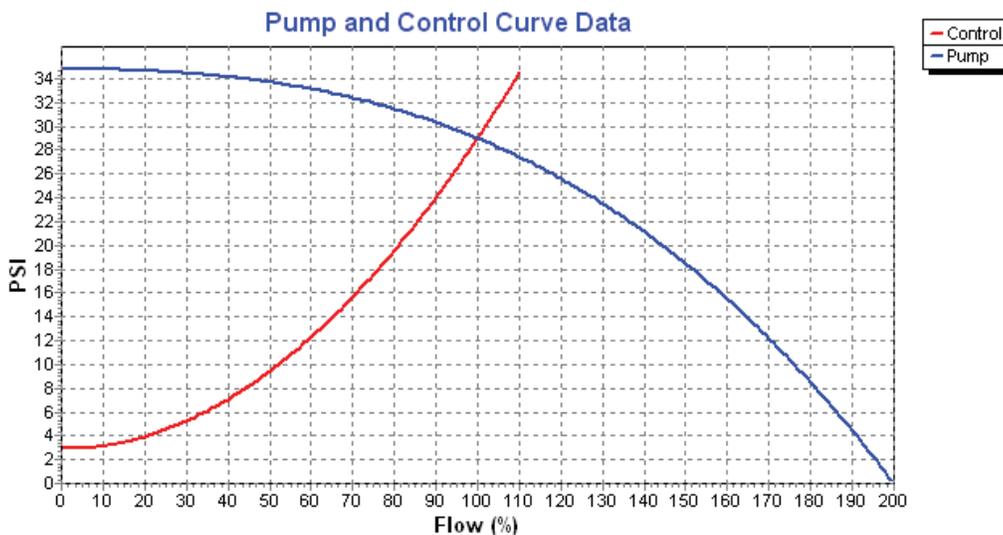


Figura 4.8 Curva de la bomba y punto de operación.

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
+		+	
\$ 800		\$ 1,100	
Annual Costs, Comparison System		Annual Costs, Drive System	
Maintenance	\$ 200	Maintenance	\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
	\$ 0		\$ 0
+		+	
\$ 200		\$ 0	

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 %	hrs	Power Required kW	Annual Energy Use kWh	Power Required kW	Annual Energy Use 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		
Total:		8,760	Total:		103,448	Total:		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
Total:	147.592

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.

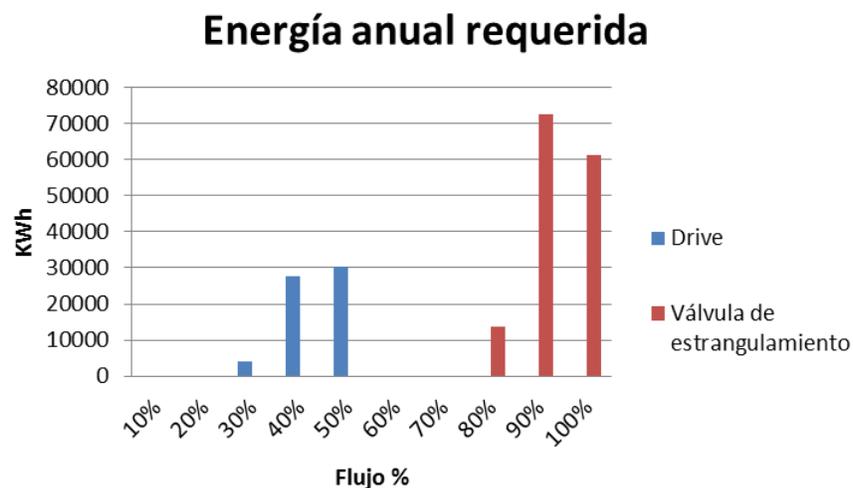


Figura 4.12 Energía consumida bajo el esquema planteado.

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.

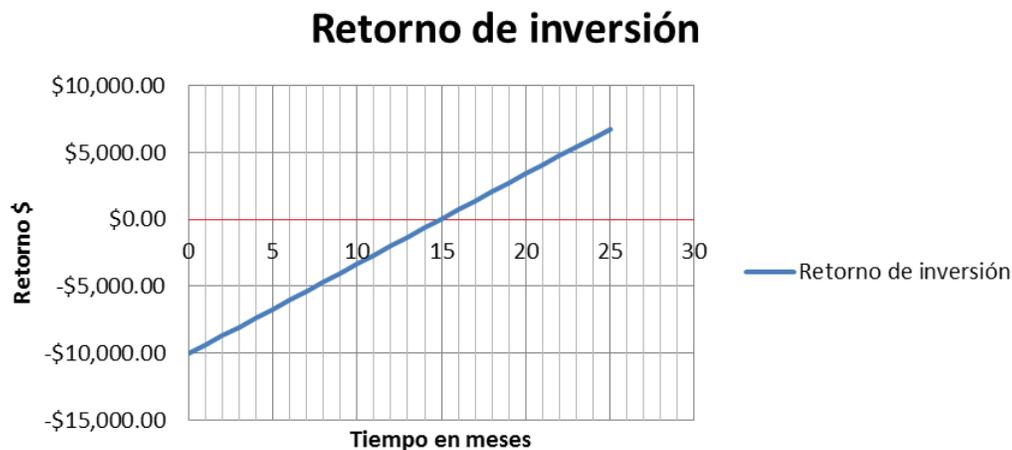


Figura 4.13 Tiempo de recuperación de la inversión.

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.