

Diagnóstico energético del sistema de circulación de agua fría en buques tipo nodriza fluvial

Karol B. León Pérez^a
Juan C. Cruz Rodríguez^a
Bienvenido Sarría López^a
Juan Fajardo Cuadro^a
Ricardo Lugo Villalba^b

Resumen

El sistema de aire acondicionado de un buque tipo Nodriza Fluvial construido por Cotecmar está constituido por un circuito de circulación de agua fría a través del cual una bomba centrífuga abastece a 21 *fan coils*, mediante los cuales se garantizan los parámetros de confort humano. En este artículo se presenta el diagnóstico energético del sistema con el objetivo de establecer las posibles oportunidades de ahorro en el buque, calculando las pérdidas en el sistema y determinándose la ecuación y la curva equivalente con las cuales se encontró el punto de operación del conjunto “bomba-sistema”. El resultado del diagnóstico arroja que las mayores pérdidas son debidas a tuberías, accesorios y *fan coils*, por lo que se propone un grupo de medidas encaminadas a la reducción del consumo energético que se vean reflejadas en una mejor operación y aprovechamiento de los recursos con que se cuenta.

Palabras clave: Consumo energético, bomba centrífuga, tuberías, aire acondicionado, pérdidas, embarcaciones.

Abstract

The air conditioning system of a riverine patrol and supply type ship constructed by Cotecmar is constituted by a cold water circulation circuit through which centrifugal pump supplies 21 fan coils, by means of which the parameters of human comfort are guaranteed. In this article, the Power Diagnosis of the system is presented with the aim of establishing the possible opportunities for saving on the ships, calculating the losses in the system and determining the equation and the equivalent curve with which the “pump-system” set’s point of operation was found. The result of the diagnosis shows that most of the losses that take place are due to pipes, accessories and fan coils, reason why a group of measures oriented towards the reduction of power consumption are proposed and that are reflected in a better operation and in the advantage taken of the resources with which one counts upon.

Key words: Power consumption, centrifugal pump, pipes, air conditioner, losses, ships.

Fecha de recepción: 12 de octubre de 2007

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2007

^a Universidad Tecnológica de Bolívar. Departamento de Ingeniería Mecánica.

^b Cotecmar. Departamento de Maquinaria y Propulsión.

Autor corresponsal: karolito817@yahoo.es

Introducción

Un diagnóstico o auditoría energética constituye una etapa básica, de máxima importancia dentro de todas las actividades incluidas en la organización, seguimiento y evaluación de un programa de ahorro y uso eficiente de la energía. Esta auditoría es pieza fundamental en un sistema de gestión energética, pues permite saber cuánto, cómo, dónde y por qué se consume energía dentro de la empresa, y por ende establecer el grado de eficiencia en su utilización, con el fin de identificar los principales potenciales de ahorro energético y económico y definir los posibles proyectos de mejora de la eficiencia energética (Borroto, 2001).

En el diagnóstico energético se emplean distintas técnicas para evaluar el grado de eficiencia con que se produce, transforma y usa la energía. Con el fin de estimar mejor la eficiencia energética, al realizar el estudio del acondicionamiento de aire, se considera importante analizar las posibles modificaciones del sistema de agua fría para minimizar las pérdidas de energía y mantener el control del sistema (Ambríz y Paredes, 2002).

Por otro lado, en un análisis completo es clave enfatizar en los equipos de bombeo del sistema, puesto que las máquinas de flujo basan su funcionamiento en las transformaciones energéticas que sufre el fluido al circular por su interior y por lo tanto consumen energía para entregársela a la sustancia de trabajo. Casi en el 100% de las aplicaciones en empresas y servicios se requiere transportar alguna sustancia, en consecuencia, para ahorrar energía resulta indispensable tener conocimientos profundos sobre los aspectos técnicos de este tipo de máquinas (Sarría y Monteagudo, 2002).

Formulación del problema

En la mayoría de las plantas de potencia y empresas industriales, se presentan problemas como elevados costos energéticos y ambientales y degradación de la calidad de la energía. Idéntica problemática se encuentra en los procesos de conversión y uso de la energía de los buques tipo Nodriza Fluvial diseñados y construidos en el astillero de Cotecmar en

Cartagena de Indias, y utilizadas principalmente por la Armada Nacional de Colombia para la vigilancia y control del orden público a lo largo y ancho de los ríos del país (Sarría, Fajardo y Lugo, 2006).

A partir de estudios previos se obtuvieron datos sobre el consumo de los diferentes sistemas energéticos de este tipo de embarcaciones y se determinó que los de mayor incidencia son los de aire acondicionado, refrigeración, ventilación, iluminación y cocina, por lo que es necesario orientar estudios hacia la búsqueda y evaluación de oportunidades de ahorro en ellos sin afectar la operación y el confort del buque.

En el diseño y selección de las máquinas y equipos térmicos y de flujo que integran todo el sistema energético del buque, Cotecmar ejecuta cálculos sobre la base de métodos tradicionales, con altos factores de seguridad y que no tienen en cuenta los elevados costos de los combustibles y las fuertes limitaciones ambientales que hoy se exigen internacionalmente para el uso racional y eficiente de los combustibles fósiles. Surge entonces, la necesidad de encontrar medidas de ahorro que aporten beneficios sustanciales en el diseño y operación de la embarcación; para ello es importante analizar los puntos claves de los sistemas más críticos y evaluar su funcionamiento con el fin de generar cambios importantes en toda la Nodriza.

Durante el desarrollo del presente estudio se parte de la operación del conjunto bomba-sistema actualmente instalado en el buque Nodriza, debido a que para un mayor aprovechamiento de la energía es necesario trabajar en un punto óptimo, de esta manera las bombas centrífugas se diseñan para operar eficientemente a una carga, un gasto y una velocidad específica. A este aspecto de la operación, se le conoce como “el punto de mejor eficiencia” (Sarría, Fajardo y Lugo, 2006).

Es válido considerar que los equipos a menudo no funcionan en condiciones óptimas, debido a cambios en la operación del sistema y a la dificultad de igualar las circunstancias de operación con el punto de mejor eficiencia de la bomba. Operar el equipo fuera de este punto, es inducir un esfuerzo

adicional a algunas partes de la bomba y exponerla a posibles daños (Sarría, Fajardo y Lugo, 2006), ejemplo de ello es el mayor par de torsión, flexión o desviación de la flecha. A su vez, la carga neta positiva de succión requerida puede ser mucho mayor que la disponible, eso ocasiona erosión, ruido y vibración debido a la alta velocidad del líquido (Sarría, Fajardo y Lugo, 2006). Por lo anterior las características con las cuales la bomba debe operar, siempre deberán ser discutidas y acordadas con el fabricante para un mejor desempeño del sistema.

Lo anterior exige hacer paso a paso un seguimiento para obtener el diagnóstico energético del sistema de circulación de agua fría del buque. A continuación se describe claramente el sistema para conocer más a fondo todos los detalles del circuito en estudio.

Descripción del sistema

Este trabajo corresponde a investigaciones previas realizadas en el proyecto de desarrollo tecnológico e innovación “Optimización energética en buques tipo Nodriza Fluvial”, código 1244-327-19801, financiado por la entidad estatal colombiana Colciencias. En particular se estudia el lazo cerrado del sistema de circulación de agua fría de la Nodriza Fluvial VI, que se distribuye a lo largo de la embarcación, para garantizar el acondicionamiento del aire en los cinco módulos o bloques que constituyen el buque. El lazo de la Nodriza esta constituido por 21 trayectorias correspondientes a los 21 *fan coils* techo-pared, marca Multiaqua referencia CFFZA de 2,4 gpm y 3,6 gpm, respectivamente. La unidad de enfriamiento –chiller marino– (Gráfico 1), la bomba y demás componentes del sistema de circulación de agua fría para aire acondicionado, se encuentran en el cuarto de máquinas auxiliares de proa.

La bomba utilizada en el montaje es una IHM modelo 3x18 de 2 HP con eje libre y diámetro de impulsor de 180 mm (Gráfico 2).

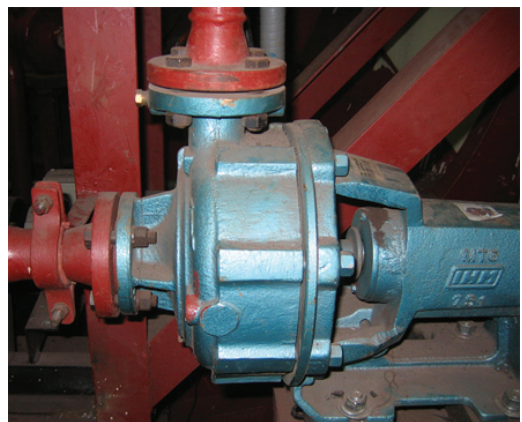
El problema tratado en este estudio se refiere a la operación fuera del punto de máxima eficiencia de la bomba de agua helada de una embarcación, y no

Gráfico 1. Chiller marino del sistema de aire acondicionado



Fuente: León y Cruz, 2007

Gráfico 2. Bomba centrífuga IHM modelo 3x18



Fuente: León y Cruz, 2007

se conoce la distribución de las pérdidas de carga en las diferentes partes del sistema de circulación de agua fría, que constituye la información básica para poder aplicar un grupo de medidas que disminuyan el consumo energético (Lugo, Sierra y De Armas, 2005).

Metodología

Ecuación general de la energía

Una de las leyes fundamentales de la naturaleza es la primera ley de la termodinámica, también conocida como principio de conservación de la energía, la cual proporciona una base sólida para el estu-

dio de las relaciones entre las diversas formas de la energía y de sus interacciones. Esta ley expresa que la energía no se puede crear ni destruir en el transcurso de un proceso; solo cambia de forma. Por lo tanto, en un proceso debe considerarse toda pequeña parte de energía (Cengel y Cimbala, 2006).

El contenido de energía de una cantidad fija de masa se puede cambiar por medio de dos mecanismos: la transferencia de calor (Q) y la transferencia de trabajo (W).

Una interacción de energía es trabajo si está asociado con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia: los motores de automóvil y las turbinas hidráulicas, de vapor y de gas, producen trabajo; los compresores, las bombas, los ventiladores y las mezcladoras consumen trabajo, los dispositivos que consumen trabajo transfieren energía al fluido y, por tanto, aumentan la energía de ese fluido.

La forma general de la ecuación de la energía que se aplica a volúmenes de control fijos, en movimiento o en deformación queda:

$$\dot{Q}_{ent\ neta} + \dot{W}_{flecha,\ ent\ neta} + \dot{W}_{presión,\ ent\ neta} = \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} epdv + \int_{sc} ep + (\vec{V}_r \cdot \vec{n})dA$$

Lo cual puede expresarse como:

$$\left(\begin{array}{l} \text{La razón neta de} \\ \text{transferencia de} \\ \text{energía hacia un} \\ \text{VC por transfe-} \\ \text{rencia de calor o} \\ \text{de trabajo} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{La razón neta de} \\ \text{cambio respecto} \\ \text{al tiempo del} \\ \text{contenido de} \\ \text{energía del VC} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{El gasto neto de} \\ \text{energía hacia} \\ \text{afuera de la} \\ \text{superficie de} \\ \text{control de flujo} \\ \text{de masa} \end{array} \right)$$

Deducción de la ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli fue enunciada por primera vez por el matemático suizo Daniel Bernoulli (1700-1782), deducida en forma de ecuación por su asociado Leonhard Euler, en 1775 (Cengel y Cimbala, 2006). Se reconoce $V^2/2$ como la energía cinética, gz como la energía potencial y P/ρ como la energía de flujo, todo por unidad de masa. Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli puede concebirse

como una expresión de balance de energía mecánica y se puede enunciar del modo siguiente:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = C \quad (2)$$

Cengel y Cimbala consideran que “La suma de la energía cinética, la potencial y de flujo de una partícula de fluido es constante a lo largo de una línea de corriente en el transcurso de flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables” (2006).

Análisis del sistema

En la selección de una bomba para un sistema de tuberías en el cual hay múltiples trayectorias del fluido, se sigue un procedimiento empírico que consiste en estudiar cada tramo del sistema por separado, y con el que presenta la mayor resistencia al flujo, consistente en la suma de las pérdidas totales y la elevación que se deba vencer, se efectúa la selección de la bomba (León y Cruz, 2007).

Por ser el sistema de la Nodriza VI un circuito cerrado las pérdidas por altura de succión y descarga se consideran cero, por lo tanto solo se tienen en cuenta aquellas que se presentan por longitud y accesorios.

Después del análisis anterior se procede a aplicar las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos. De acuerdo con el arreglo de tuberías del sistema, las ecuaciones de nodo y los valores de las fracciones de flujo correspondientes a cada sección, se calculan los valores de flujo Q , las velocidades V , los números de Reynolds R_e , las fracciones del flujo total para cada tramo y los factores de fricción f ; para de esta manera reemplazar en las ecuaciones correspondientes a las pérdidas de carga total H y obtener los valores respectivos para cada trayectoria.

Se utiliza la siguiente ecuación para las pérdidas en tuberías (Potter y Wiggert, 2002).

$$H = \frac{8}{g\pi^2} \left(\sum f \frac{LQ^2}{D^5} + \sum K \frac{Q^2}{D^4} \right) \quad (3)$$

Donde: Q está en m^3/seg , L en m , f es adimensional, K en m . y D en m .

Para cada trayectoria se tiene una línea de suministro y una de retorno, siendo el valor de la pérdida total correspondiente a la suma de las pérdidas por longitud y las pérdidas por accesorios que a su vez incluye las pérdidas por equipos varios como las válvulas de ajuste de flujo, los filtros tipo “Y”, los *fan coils* y el chiller, entre otros. Para aplicar las ecuaciones de las pérdidas, los valores de K o H de los equipos varios que no se encuentran directamente en tablas, se toman de catálogos y recomendaciones de cálculo particulares.

Las ecuaciones de pérdidas, son de la forma

$$H = RQ^2 \quad (4)$$

Para los equipos y accesorios varios quedan de la manera mostrada en el Cuadro 1.

Ecuaciones por trayectorias

Todas las trayectorias inician en el chiller marino, es decir en el módulo 103 en la unidad marina (ubicada en el cuarto de maquinas auxiliares de proa), y hacen un recorrido que es común a los 21 tramos del sistema. A partir de ahí se bifurcan los 21 recorridos analizados por medio de las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos, procedimiento que se realizó con ayuda de herramientas computacionales como Microsoft Excel y otro software secundario propio para este tipo de aplicaciones (*Flow of Fluids-Crane*), que permitieron el estudio de los 21 recorridos de manera precisa para determinar la trayectoria crítica del sistema.

Resultados y discusión

Los resultados del estudio energético de las 21 trayectorias en que se dividen el lazo de circulación de agua fría (León y Cruz, 2007) se resume en el Cuadro 2. Como se muestra en el cuadro y según los datos obtenidos mediante los cálculos y la susti-

tución de valores en Microsoft Excel, se determina que la trayectoria con mayor pérdida es la 16 (7-1) correspondiente al tramo que va desde el módulo 103 hasta el *fan coil* ubicado en el pasillo 1-24-O-L del módulo 501 (escaleras de acceso a la cubierta 2). Por tanto, de los resultados obtenidos anteriormente tenemos la ecuación de pérdida de carga total de la forma planteada en la ecuación 4 para el sistema, que sería igual a:

$$H = 2041477,846 Q^2 \quad (5)$$

Cuadro 1. Pérdidas para equipos y accesorios varios

| Equipos/accesorios varios | Pérdida |
|--|--|
| Pérdida del chiller | $H = 173326,8043 Q_1^2$ |
| Pérdida en el filtro | $H = 17213,8942 Q_1^2$ |
| Pérdida en válvula de bola de 3/4" (3,6 gpm) | $H = 531518,1755 Q_n^2$ $H = 2165,53353 Q_1^2$ |
| Pérdida en válvula de ajuste de 3/4" (3,6 gpm) | $H = 10270862,97 Q_n^2$ $H = 41845,9786 Q_1^2$ |
| Pérdida en <i>fan coil</i> (3.6 pm) | $H = 100446572,9 Q_n^2$ $H = 409243,6198 Q_1^2$ |
| Pérdida en válvula de bola de 3/4" (2,4 gpm) | $H = 531518,1755 Q_n^2$ $H = 962,45935 Q_1^2$ |
| Pérdida en válvula de ajuste de 3/4" (2,4 gpm) | $H = 10270854,11 Q_n^2$ $H = 18598,1966 Q_1^2$ |
| Pérdida en <i>fan coil</i> (2,4 p.m.) | $H = 66471996,77 Q_n^2$ $H = 120365,7705 Q_1^2$ |

Fuente: Resultados de la investigación.

Para obtener los puntos necesarios para trazar la curva del sistema se seleccionaron diez valores del flujo que corresponden desde 0% hasta el 115%, con relación al flujo nominal de operación del sistema. Los resultados de este cálculo se muestran en el Cuadro 3 y la curva del sistema se representa en el Gráfico 3.

Los valores característicos del punto de operación (Gráfico 4) son:

Caudal = $Q = 43,15 \text{ gpm}$.
 Pérdida = $H = 15,13 \text{ m}$.
 Eficiencia = 62%
 NPSH = $1,33 \text{ m}$.
 Potencia = $0,874 \text{ HP}$.

Cuadro 2. Ecuaciones de las pérdidas de carga y por trayectoria

| Trayectoria | Flujo de fan coil | Pérdida | Pérdidas en (m) |
|-------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| (1) 1-1 | 3,6 | $H = 1646354,72Q_1^2$ | 20,85 |
| (2) 1-2 | 3,6 | $H = 1644140,14Q_1^2$ | 20,82 |
| (3) 2-1 | 2,4 | $H = 1294180,66Q_1^2$ | 16,88 |
| (4) 2-2 | 3,6 | $H = 1587027,33Q_1^2$ | 20,14 |
| (5) 3-1 | 2,4 | $H = 1545514,17Q_1^2$ | 17,04 |
| (6) 3-2 | 2,4 | $H = 1501585,73Q_1^2$ | 19,01 |
| (7) 3-3 | 3,6 | $H = 1803025,73Q_1^2$ | 22,83 |
| (8) 4-1 | 2,4 | $H = 1438431,47Q_1^2$ | 18,21 |
| (9) 4-2 | 2,4 | $H = 1465236,33Q_1^2$ | 18,55 |
| (10) 4-3 | 2,4 | $H = 1518463,05Q_1^2$ | 19,23 |
| (11) 4-4 | 2,4 | $H = 1502054,46Q_1^2$ | 18,95 |
| (12) 5-1 | 2,4 | $H = 1495532,05Q_1^2$ | 18,93 |
| (13) 5-2 | 2,4 | $H = 1512660,42Q_1^2$ | 19,15 |
| (14) 5-3 | 2,4 | $H = 1501182,26Q_1^2$ | 19,01 |
| (15) 6-1 | 2,4 | $H = 1666857,18Q_1^2$ | 21,10 |
| (16) 7-1 | 3,6 | $H = 2041477,46Q_1^2$ | 25,85 |
| (17) 8-1 | 2,4 | $H = 1738377,13Q_1^2$ | 22,01 |
| (18) 9-1 | 2,4 | $H = 1769411,65Q_1^2$ | 22,17 |
| (19) 10-1 | 2,4 | $H = 1799516,65Q_1^2$ | 22,78 |
| (20) 10-2 | 2,4 | $H = 1795027,42Q_1^2$ | 22,73 |
| (21) 11-1 | 2,4 | $H = 1821441,61Q_1^2$ | 23,06 |

Fuente: Resultados de la investigación.

Cuadro 3. Valores de Q y H para graficar la curva del sistema

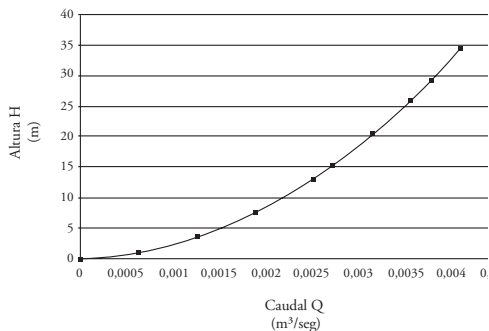
| Fración de Q1 | Q (gpm) | Rx | Q(m³/seg) | Q² | H(Q) |
|---------------|---------|------------|-----------|----------|--------|
| 0,000 | 0,00 | 2041477,56 | 0,00E+00 | 0 | 0,000 |
| 0,177 | 10,00 | 2041477,56 | 6,31E-04 | 3,98E-07 | 0,813 |
| 0,355 | 20,00 | 2041477,56 | 1,26E-03 | 1,59E-06 | 3,250 |
| 0,532 | 30,00 | 2041477,56 | 1,89E-03 | 3,58E-06 | 7,313 |
| 0,709 | 40,00 | 2041477,56 | 2,52E-03 | 6,37E-06 | 13,001 |
| 0,863 | 43,15 | 2041477,56 | 2,72E-03 | 7,41E-06 | 15,130 |
| 0,887 | 50,00 | 2041477,56 | 3,15E-03 | 9,95E-06 | 20,315 |
| 1,000 | 56,40 | 2041477,56 | 3,56E-03 | 1,27E-05 | 25,848 |
| 1,064 | 60,00 | 2041477,56 | 3,79E-03 | 1,43E-05 | 29,253 |
| 1,152 | 65,00 | 2041477,56 | 4,10E-03 | 1,68E-05 | 34,332 |

Fuente: Resultados de la investigación.

Análisis de las pérdidas totales del sistema de circulación de agua fría

En el Gráfico 5 se representa el “Diagrama de Pareto de Pérdidas del Sistema”. Como resultado de

Gráfico 3. Curva del sistema específico Nodriza Fluvial VI



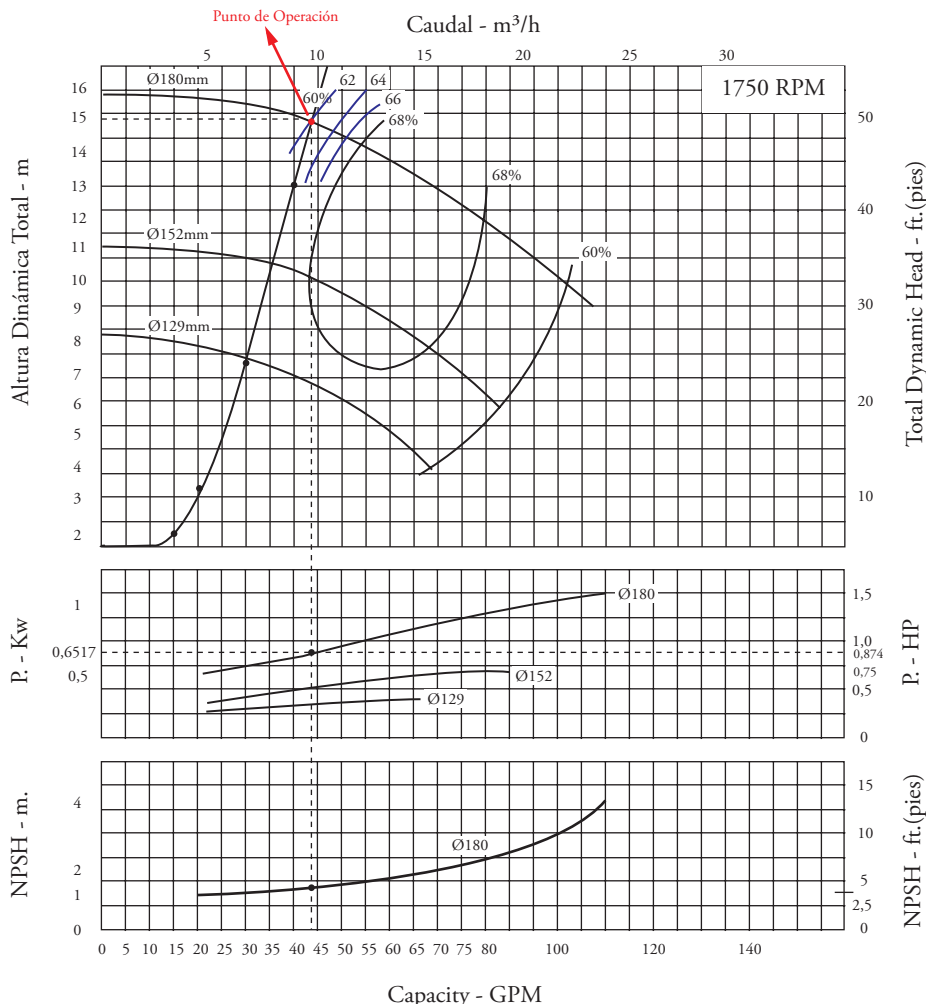
Fuente: Resultados de la investigación

este estudio se tiene que el 68,46% de las pérdidas totales del sistema son ocasionadas por las *pérdidas de longitud y accesorios* mientras que otro 22,20% corresponde a *pérdidas por fan coils* (con sus válvulas de bola y ajuste de flujo), indicando que estos son los puntos claves en los que debemos priorizar las investigaciones futuras dirigidas a la aplicación de medidas de ahorro que se reflejen en la disminución del consumo de energía.

De aquí que, una valoración preliminar nos indica que se deben realizar investigaciones para la modificación del sistema de tuberías reduciendo pérdidas, esto incluye:

- Cambio del material (rugosidad)
- Trazado de tubería
- Reducción de accesorios

Gráfico 4. Punto de operación cruzado con las curvas de Eficiencia según curva del fabricante



Fuente: Catálogo IHM - Resultados de la investigación

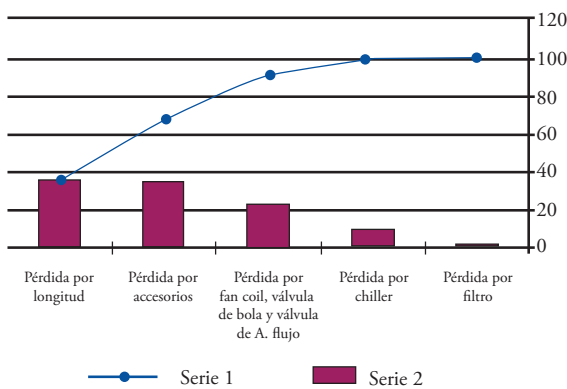
El análisis de la distribución de las pérdidas de carga total se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Pérdidas totales del sistema por equipos

| Causa | H (pérdida) en m | % | % Acumulado |
|---|---------------------|---------------|----------------|
| Pérdidas por longitud | 9,000 | 34,847 | 34,847 |
| Pérdidas por accesorios | 8,689 | 33,617 | 68,464 |
| Pérdidas por fan coil, válvula de bola y válvula de ajuste de flujo | 5,739 | 22,202 | 90,667 |
| Pérdida por chiller | 2,195 | 8,490 | 99,157 |
| Pérdida por filtro | 0,218 | 0,843 | 100,000 |
| Total | 26,000 | 100,00 | |

Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 5. Diagrama de Pareto de pérdidas totales del sistema por equipos



Fuente: Resultados de la investigación.

Análisis de consumo energético para el punto de operación actual¹

Actualmente las características del generador instalado en el buque en estudio son las siguientes:

Un generador marca Caterpillar C4.4 de 1800 rpm y 76 kW, con un dato de desempeño de 5,81 gal/h,

al 100% de la capacidad, que opera con una eficiencia del 94%.

Los cálculos para el dato de potencia consumida o requerida para el conjunto motor-bomba, se determinan a continuación.

$$Potencia\ hidráulica = \frac{Q_{op} * H_{op} * \rho * g}{1000W / kW} \quad (6)$$

Donde:

Q_{op} = flujo en el punto de operación en m³/seg.

H_{op} = carga en el punto de operación en m.

ρ = densidad del agua (1000Kg/m³).

g = constante gravitacional (9,81m/seg²).

Para el punto de operación actual del sistema tenemos:

Caudal = Q = 43,15 gpm.

Pérdida = H = 15,13 m.

Por lo tanto si sustituimos los valores en la ecuación 6 se obtiene que:

$$Potencia\ hidráulica = 0,040406\ kW$$

$$Potencia\ requerida\ (kW) = \frac{Potencia\ hidráulica}{\eta} \quad (7)$$

Siendo η el rendimiento total del bloque e igual a:

$$\eta = \eta_{motor} * \eta_{bomba} * \eta_{acoplamiento} \quad (8)$$

Donde:

$$\eta_{motor} = 0,92$$

$$\eta_{bomba} = 0,62$$

$$\eta_{acoplamiento} = 1\ \text{para una transmisión directa motor-bomba.}$$

Lo que substituyendo en la ecuación (7) corresponde a:

$$Potencia\ requerida\ (HP) = 0,950785\ Hp$$

Teniendo en cuenta las características del generador, el consumo de combustible para satisfacer la potencia requerida se puede determinar así:

¹ León y Cruz (2007).

para 76 kW → 5,81 gal / h

para 0,709 kW → x gal / h

Eso corresponde a 0,05420 galones/hora. Suponiendo que el sistema trabaja alrededor de 24 horas al día los 365 días del año, el dato de consumo que se obtiene es de 474,792 galones/año.

Consumo energético estimado para el sistema por incremento de eficiencia en la bomba

Para complementar el diagnóstico energético del sistema de circulación de agua fría del buque, es necesario realizar análisis comparativos con respecto al consumo de la bomba en estudio y el ahorro que se podría obtener con la selección de una nueva que cumpla con las condiciones de operación de la que se encuentra instalada, con una eficiencia superior. De esta manera se identifica claramente cómo el hecho de implementar medidas de ahorro concretas y viables, que mejoren el rendimiento de los equipos y reduzcan las pérdidas de energía dentro del sistema, elevan la calidad de la operación de todo el conjunto.

Para este análisis se considera que la nueva bomba trabaje con el gasto actual correspondiente a 43,15 gpm, que entregue la misma carga de 15,13 m y como ejemplo de evaluación que opere con una eficiencia estimada de 68% y no del 62% como lo hace en la actualidad.

Sustituyendo en las ecuaciones 6 y 7 se tiene que:

$$\text{Potencia hidráulica} = 0,040406 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia requerida (kW)} &= \frac{0,40406}{0,92 * 0,68 * 1} \\ &= 0,646 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\text{Potencia requerida (Hp)} = 0,8663003 \text{ Hp}$$

El consumo de combustible correspondiente al nuevo valor de la eficiencia estimada será:

para 76 kW → 5,81 gal / h

para 0,646 kW → x gal / h

Que corresponden a 0,049385 galones/hora. Suponiendo que el sistema trabaja alrededor de 24 horas al día, los 365 días del año, el consumo que se obtiene es de 432,613 galones/año.

Ahorros estimados por incremento de la eficiencia

Para estimar el ahorro por consumo en kW se tiene que:

$$A_{\text{consumo}} = (\text{Consumo Actual} - \text{Consumo Estimado}) \quad (9)$$

$$A_{\text{consumo}} = 0,709 - 0,646 = 0,063$$

Para estimar el ahorro por combustible en gal/año se tiene que:

$$A_{\text{consumo}} = (\text{Consumo Actual} - \text{Consumo Estimado}) \quad (10)$$

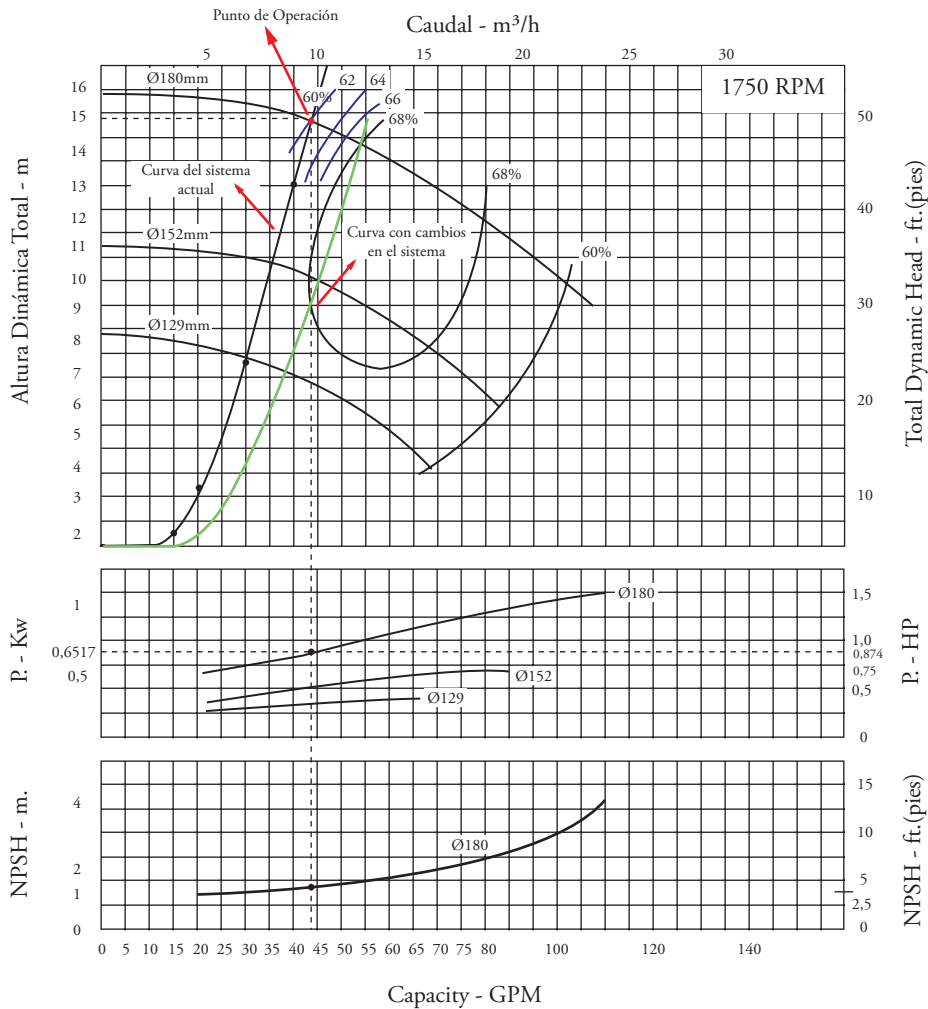
$$A_{\text{consumo}} = 474,792 - 432,613 = 42,179$$

Estimación de un nuevo trazado de tuberías en función de la constante R

Después de realizar y analizar los cálculos respectivos para el sistema de circulación de agua fría, es necesario estudiar la posibilidad de implementar mejoras en el trazado de tuberías incluyendo aspectos como longitud, accesorios y *fan coils*. Esto permite disminuir sustancialmente las pérdidas e incrementar el rendimiento, aprovechando al máximo la bomba instalada. Igualmente debe hacerse un estudio térmico que permita verificar que se estén supliendo las necesidades de confort de la embarcación.

Después de verificar el mejoramiento de la eficiencia de la bomba, se puede establecer que una opción viable para disminuir las pérdidas es llevar el sistema a otro estado de operación en donde no solo se incremente la eficiencia sino que se logre un consumo óptimo aprovechando la capacidad de la bomba. Partiendo de un valor de eficiencia estimada de aproximadamente 68% (tal como se hizo en el punto anterior), se pueden realizar otros análisis para el sistema ya que se tiene una nueva ecuación

Gráfico 6. Curva del sistema actual contra curva del sistema estimado



Fuente: Catálogo IHM - Resultados de la investigación

de pérdida de carga total, una curva y un punto de operación como se observa en el Gráfico 6.

Por lo tanto para el punto estimado sobre la curva “bomba-sistema” con una eficiencia del 68% se obtienen los siguientes parámetros de operación:

$$Q = 55 \text{ gpm} = 0,003469961 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$H = 14,5 \text{ m}$$

Con estos dos valores se puede determinar el valor de R que corresponde a la constante de la ecuación de pérdidas de la forma $H=RQ^2$ que abarca tramos rectos, accesorios y *fan coils*, de esta manera las ecuaciones para el sistema actual y el sistema con cambios quedan de la siguiente forma:

$$H_{\text{sistema actual}} = 2041477,46Q^2$$

$$H_{\text{deseado}} = R_{\text{sistema con cambios}} Q_{\text{deseado}}^2 \tag{11}$$

Para el sistema con cambios el valor de R según la ecuación, se determinaría de la siguiente manera:

$$R = \frac{H_{\text{deseado}}}{Q_{\text{deseado}}^2} \tag{12}$$

$$R = \frac{14,5\text{m}}{(0,003469961\text{m}^3/\text{seg})^2} = 1204255,989\text{seg}^2/\text{m}^5$$

De donde la ecuación de pérdida de carga del sistema con cambios sería:

$$H_{\text{sistema con cambios}} = 1204255,989Q^2$$

Por lo tanto la diferencia de la constante del sistema actual y el sistema con cambios permite cuantificar el valor de R que se va a disminuir en los puntos que generan mayores pérdidas, así:

$$R_{\text{sistema actual}} - R_{\text{sistema con cambios}} = R_{\text{a disminuir}}^2 \quad (13)$$

$$R_{\text{a disminuir}} = 2041477,46 - 12042559,89 = 837221,47 \text{ seg}^2/\text{m}^5$$

Este valor nos sirve como un punto de partida para realizar posteriores variaciones en el diseño del trazado para el sistema ya que teniendo este valor como meta nos permitirá cuantificar cada una de las mejoras que se hagan para llegar al sistema ideal.

A partir de estos datos es posible determinar el porcentaje de disminución para el valor de $R_{\text{a disminuir}}$ analizando cada constante R para longitud, accesorios y equipos varios en el sistema actual:

$$\%R_{\text{Adisminuir}} = \frac{R_{\text{a disminuir}}}{R_{\text{Sistema actual}}} * 100 \quad (14)$$

Por tanto:

$$\%R_{\text{Adisminuir}} = \frac{837221,47 \text{ seg}^2/\text{m}^5}{2041477,46 \text{ seg}^2/\text{m}^5} * 100 = 41 \%$$

Basados en este dato y en los valores obtenidos para los porcentajes de pérdidas según los diferentes equipos, se está en condiciones de jugar con estas variables de manera tal que se consigan los cambios esperados en el sistema y se obtengan las condiciones de operación deseada.

Conclusiones

Como resultado del estudio energético realizado al sistema de circulación de agua fría del buque No-driza VI, se llegó a las siguientes conclusiones:

La ecuación representativa de las pérdidas de todo el sistema y a partir de la cual se construyó la curva del sistema es:

$$H = 2041477,46Q^2$$

El punto de operación actual está definido por los siguientes parámetros: Eficiencia = 62%, Pérdi-

da de carga total = 15,13 m, Gasto = 43,15 gpm, Potencia=0,6517 kW, Carga neta de succión positiva (NPSH) =1,33 m.

El 68% de las pérdidas de energía son por longitud y accesorios, mientras que el 22% se concentran en los *fan coils* del sistema de acondicionamiento de aire de la embarcación.

El ahorro estimado por el hecho de llevar la bomba de un rendimiento del 62% hasta 68% es de: 0,063 kW y 42,179 galones de combustible al año.

Por estimación se tiene que un nuevo trazado de la tubería del sistema de circulación de agua fría con una curva que reduzca el valor de R (que abarca tramos rectos, accesorios y *fan coils*) ($H=RQ^2$) aproximadamente en 40% logra un aumento del rendimiento actual de la bomba hasta de 68%.

Los aspectos claves por estudiar en un futuro se centran en posibles cambios en los *fan coils* para disminuir pérdidas, reevaluar el trazado del sistema de tuberías, incluyendo modificaciones en las rutas con sus respectivos accesorios, además de un posible cambio del material, y por ultimo un cambio de la bomba por una de mejor rendimiento y disminución del consumo de energía con el fin de optimizar el sistema de circulación de agua fría en forma general. Por supuesto, debe hacerse un análisis de costos para estudiar la rentabilidad de todas estas propuestas.

Listado de abreviaturas

| | |
|--------------------------------|---|
| $\dot{Q}_{\text{ent neta}}$ | = Transferencia neta de calor al fluido |
| $\dot{W}_{\text{flecha, ent}}$ | = Entrada neta de trabajo en la flecha al fluido |
| $\frac{neta}{P/\rho}$ | = Energía de flujo |
| $V^2/2$ | = Energía cinética |
| gz | = Energía potencial |
| H | = Carga o pérdida total (m) |
| g | = Constante gravitacional (9,81m/seg ²) |
| f | = Factor de fricción (adimensional) |
| L | = Longitud de tubería (m) |

| | |
|---------------------------|--|
| Q | = Caudal del flujo en tuberías (m^3/seg) o (gpm) |
| D | = Diámetro de la tubería (m) |
| K | = Constante de pérdidas por accesorios (m) |
| V | = Velocidad del flujo en las tuberías (m/seg) |
| Re | = Número de Reynolds (adimensional) |
| $NPSH$ | = Cabeza neta de succión positiva |
| R | = Constante de la ecuación de pérdidas |
| Q_{op} | = Flujo en el punto de operación en m^3/seg |
| H_{op} | = Carga en el punto de operación en m |
| ρ | = Densidad del agua ($1000 \text{ Kg}/m^3$) |
| η | = Rendimiento total del bloque |
| η_{motor} | = Rendimiento del motor |
| η_{bomba} | = Rendimiento de la bomba |
| $\eta_{acoplamiento}$ | = Rendimiento del acoplamiento |
| $A_{consumo}$ | = Ahorro por consumo en kW o en gal/año |
| $H_{deseado}$ | = Carga total deseada para el nuevo sistema |
| $R_{sistema con cambios}$ | = Constante de la ecuación de pérdidas para el sistema con cambios |
| $Q_{deseado}$ | = Caudal del flujo en tuberías deseado para el sistema |
| $R_{sistema actual}$ | = Carga total del sistema actual de la Nodriza |
| $R_{sistema a disminuir}$ | = Carga total que se debe disminuir en el sistema |

Borrotto Nordelo A. E. et al., (2001), *Gestión energética empresarial*. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Ceema. Universidad de Cienfuegos, Cuba.

Cengel Yunus A., Cimbala John M., (2006), *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.

León K, Cruz J., (2007), "Evaluación y diagnóstico para la optimización energética del sistema de circulación de agua fría en las embarcaciones tipo nodriza fluvial construidas por Cotecmar" [trabajo de grado], Cartagena, Universidad Tecnológica de Bolívar, carrera de Ingeniería Mecánica.

Lugo R, Sierra A, De Armas M., (agosto de 2005), Evaluación energética de los sistemas de conversión y consumo de energía de un buque tipo Nodriza de segunda generación. Documento. Especialización en gestión eficiente de la Energía, Universidad del Atlántico.

Potter, M. C. y Wiggert, D. C., (2002), *Mecánica de fluidos*; 3ª. ed. México, Editorial Thomson.

Sarría López B. y Monteagudo Yanes J. (Redacción y recopilación bibliográfica), "Eficiencia energética en el uso de los fluidos y las máquinas de flujo". Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Ceema. Universidad de Cienfuegos, Cuba. junio de 2002.

Sarría López B., Fajardo Cuadro J. y Lugo Villalba R., (2006), "Optimización energética en buques tipo Nodriza Fluvial". Documento de formulación del proyecto de investigación, desarrollo tecnológico e innovación. Cartagena, Colombia.

Referencias

Ambriz García J. J. y Paredes Rubio H. R., (1 al 3 de julio de 2002), "Eficiencia energética y normativa de sistemas de refrigeración y aire acondicionado" [ponencia], Universidad de Guadaluajara, México.