

Determinación de la disminución del rendimiento global de una bomba centrífuga por concepto de desgaste en su carcasa

Luis E. Vallés D., Trina G. Cortez M.

Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Email: lvalles@uc.edu.ve

Resumen

Puesto que en la actualidad no existe suficiente información acerca de la evolución del desgaste en la carcasa, no se conoce el comportamiento de las variables operativas incluyendo el rendimiento global en función a este fenómeno; es por ello que la presente investigación se plantea como objetivo principal la determinación de la disminución del rendimiento global que presenta una bomba centrífuga por concepto de desgaste en su carcasa. Para el logro de tal objetivo, se realizaron ensayos que permitieron simular tal proceso, observando al mismo tiempo el comportamiento de las variables operativas, empleando para ello una bomba marca KSB modelo ETA 32-200, ya que estas bombas son muy utilizadas a nivel industrial. Los resultados arrojaron, para el caudal nominal del equipo, una disminución del rendimiento global desde 44,74 % hasta 41 % lo que representa una caída de un 8,36 % respecto a su valor inicial, así como una disminución neta de la altura efectiva de 3,11 m.c.a y un aumento considerable de la potencia de accionamiento. El desgaste que afectó la carcasa es de tipo abrasión por arranque, y provocó la pérdida del 3 % del peso inicial la carcasa.

Palabras claves: Carcasa, rendimiento, desgaste, bomba centrífuga, altura efectiva.

Determination of the global yield decrease of a centrifugal pump due to casing wear

Abstract

Since now, there is not enough information about the casing wear evolution, the operative variable behavior does not know including the global yield in function to this phenomenon; wherefore the main objective of the present investigation is the determination of the global yield decrease that a centrifugal pump presents for the wear concept in its casing. To get this objective, rehearsals carried out, which allowed simulating the process, observing the operative variables behavior at the same time, using a marks KSB model ETA 32-200 pump, since these pumps are very utilized at industrial level. The results hurtled a global yield decrease for the nominal flow of the equipment from 44.74 % to 41 %, what represents a fall of 8.36 % with respect to the initial value, as well as a net decrease of the effective height of 3.11 m.c.a and a considerable increase of the working power. The wear that affected the casing is an outburst abrasion type, and it caused the loss of 3 % of the casing initial weight.

Keywords: Casing efficiency, wear, centrifugal pump, dynamic head.

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas poseen una imperiosa necesidad de asegurar su futuro, dentro de ellas se llevan a cabo procesos en los cuales están involucrados equipos que en la mayoría de los casos, no se tiene conocimiento de cómo ni cuándo acarrearán problemas.

El desgaste es una de las principales causas, que hace necesario el mantenimiento de la maquinaria

industrial. Comparado con los otros dos problemas que ocasionan el reemplazo de máquinas y/o sus componentes como son la fatiga y la corrosión, el desgaste ha sido el menos estudiado y probablemente sea por esta razón, que aún no se ha constituido un cuerpo de conocimientos racional que permita predecirlo con cierto grado de exactitud.

La situación de Venezuela en los últimos años

ha llevado a que se le dé una importancia creciente al estudio del desgaste ya que este proceso degenerativo es prácticamente inevitable, dañino en muchos casos pero reducible. En los momentos actuales parece más adecuado dirigir esfuerzos hacia la prolongación de la vida útil de los elementos de máquinas, antes que a la fabricación intensiva de piezas de reposición.

En la actualidad las bombas centrífugas conforman las piezas claves de la mayoría de los sistemas para manejo de fluidos; y por ser máquinas dinámicas, conformadas por una parte rotatorias y otra fija, forman parte de aquellos equipos cuyos componentes son bastante susceptibles a desgaste.

Por todo lo anterior, el hecho de estudiar el fenómeno de desgaste en una bomba centrífuga, específicamente de su carcasa, constituye un aporte importante a la necesidad de obtener un mejor rendimiento de las superficies susceptibles de desgaste en las bombas, a la determinación de las causas de este fenómeno y predicción de sus consecuencias. La presente investigación espera determinar el efecto del desgaste de la carcasa sobre el rendimiento y funcionalidad de la bomba a través de la observación de las curvas características a lo largo del proceso de desgaste.

2. METODOLOGÍA

Desarrollo de la solución

En el presente trabajo se hace referencia al diseño del procedimiento a seguir, desde los ensayos, el banco de ensayos y el procesamiento de los datos recolectados. Luego se procederá al análisis de los resultados obtenidos en esta etapa, y efectuar conclusiones y establecer las respectivas recomendaciones.

Descripción del banco de pruebas

Esta sección estará dedicada a la descripción detallada del banco de pruebas donde están instaladas las bombas requeridas para la realización de los ensayos. Es importante destacar que este banco de pruebas ya ha sido utilizado en el desarrollo de ensayos para estudios de desgaste, en otros componentes de la ETA 32-200; por lo cual dispone de las tomas y conexiones necesarias para la instalación de los ins-

trumentos de medición de las diferentes variables que se medirán durante el proceso de desgaste de la carcasa. Todos los instrumentos de medición a emplear en el banco de ensayos, son los mismos seleccionados por las investigaciones previas desarrolladas en el mismo, considerando los cálculos, criterios y normas correspondientes [1, 2].

Los sistemas A y B están conformados por los mismos componentes, la única diferencia es el fluido de trabajo. Tales componentes son: (a) conjunto bomba-motor, (b) fluido de trabajo, (c) base del banco sobre la cual se instalará el conjunto, (d) tanque de almacenamiento para el fluido de trabajo, (e) circuito hidráulico compuesto por la tubería de succión y tubería de descarga, accesorios, válvula de control de fluido, (f) instrumentación [3].

Conjunto bomba motor

El tipo de bomba con la cual se hará el estudio es una bomba centrífuga para manejo de agua limpia, específicamente de la casa fabricante de estos equipos KSB, modelo ETA 32-200 con motor de 15 HP a 3.500 rpm.

Las dimensiones principales y los caudales nominales de las bombas de baja presión de la serie ETA construidas por KSB corresponden a las normas DIN 24 255.

Circuito de succión y descarga

El circuito hidráulico es de succión negativa; consta de un tramo de elevación de succión ($\phi 2''$), compuesto de una válvula check para mantener la ceba y una toma de presión para ser conectada a un vacuómetro (0-30"Hg.), el cual mostrará la presión en la succión de la bomba. En el tramo de descarga ($\phi 1\frac{1}{4}''$) se encuentra una toma de presión que se conectará a un manómetro (0-12 bar) que registrará la presión de descarga de la bomba, al final de la tubería de descarga se coloca una válvula para el control del caudal manejado por la bomba [4].

Selección de los instrumentos de medición

Mediante el banco de ensayos se podrá determinar las magnitudes de las variables hidráulicas de

funcionamiento de la bomba centrífuga, tales como: altura efectiva, potencia de accionamiento, rendimiento global. Para ello se hace necesario medir las variables involucradas que permitan determinar dichas variables hidráulicas fundamentales por lo que se harán las mediciones de: presión a la descarga, presión en la succión, velocidad del fluido, temperatura del fluido, velocidad de giro del motor, voltaje, intensidad de corriente y factor de potencia [5].

Cada instrumento tiene límites de mediciones tales, que los valores donde se va a mover la variable estén entre un 60 % a un 80 % del intervalo del instrumento, de esta manera se busca seleccionar el instrumento que proporcione la mejor apreciación posible.

Presión

Las presiones que se requieren medir son la presión en la succión y la de descarga de la bomba. Para el caso de la succión se requiere de un vacuómetro (0-30 "Hg) debido a que, de acuerdo a la ubicación de esta tubería respecto a la bomba, se tiene una elevación de succión y por ende la presión en la succión de la bomba será menor que la atmosférica, es decir, una presión de vacío.

Se debe tener en cuenta que la máxima presión manométrica de succión o vacío, de acuerdo con los cálculos realizados al momento de diseñar el banco y seleccionar los instrumentos a emplear en él, es de 0,196 bar por debajo de la presión atmosférica. De acuerdo con esto se empleará en la succión un vacuómetro tipo Bourdon marca Bourdon Sedeme.

Para establecer la posición más apropiada en la cual debe instalarse o colocarse el instrumento, se considera la norma ASME PTC 8.2 - 1990; de acuerdo con la sección 4 párrafo 4.7 de esta norma, se tiene que "los instrumentos para medir presión deben ser colocados a una distancia mínima de la succión de la bomba de dos veces el diámetro de la tubería".

Para el caso de la descarga se empleará un manómetro, ya que como es de esperarse la presión en este punto es mayor que la presión atmosférica. Para la selección de este instrumento es necesario conocer el valor máximo de presión que puede presentarse en este punto. De acuerdo con las características y especificaciones de la bomba, el valor máximo de presión

a la descarga de la misma es de 8,5 bar (125 psig). Debe prevenirse el efecto que puede ocasionar la vibración en este instrumento, para ello se requiere que el mismo contenga glicerina.

A partir de lo anterior se selecciona un manómetro (0-12 bar) tipo Bourdon con glicerina. Para determinar la colocación del manómetro se hace referencia a la norma ASME PTC 8.2-1990, al igual que en el medidor de presión de succión.

Caudal

Para la selección del medido de caudal uno de los aspectos más importantes a considerar es el caudal o los caudales que manejarán cada una de las bombas del sistema. Conocer con la mayor exactitud los valores de esta variable es importante, dado que indica en que punto de la curva del equipo, se está trabajando. Para la etapa de los ensayos en que se produce el desgaste de la carcasa, con la bomba A del banco de ensayos, se trabajará en un entorno del punto de máximo rendimiento de $\pm 5\%$, es decir ($16 \text{ m}^3/\text{h} \pm 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$). Para la etapa de medición de las variables operativas en la bomba B del banco de ensayos, se tomará la lectura de las mismas para los caudales establecidos en el Manual para ensayo de performance de KSB, también con una tolerancia de $\pm 5\%$ para cada caudal [6-8].

Debido a que el fluido que maneja el sistema es una mezcla de agua y arena se debe utilizar un método especial de medición, ya que dicha mezcla es altamente abrasiva, se hace necesaria la selección de un medidor de velocidad de flujo de colocación externa a la tubería (normas ASTM PTC 8.2-1990, aparte 4.25). Por lo anterior, se elige un medidor de caudal tipo Doppler.

Temperatura

Se quiere conocer no sólo la temperatura del fluido, sino también la temperatura superficial de la bomba y del motor. Para el caso del primero, se empleará un termómetro fijo colocando en el tanque de almacenamiento y un termómetro móvil para conocer la temperatura a la cual opera el equipo de bombeo en los sitios más importantes como son la carcasa de la bomba y la caja de rodamientos [9].

Para medir la temperatura del fluido se colocará

un termómetro en el tanque de almacenamiento ya que dentro del mismo la temperatura se hace más uniforme. Para la selección de este instrumento se considera que la temperatura máxima que podría, en un caso extremo, alcanzar el fluido es de 100 °C.

Para determinar la temperatura del equipo de bombeo (bomba y motor) se utilizará un pirómetro de radiación. Este instrumento presenta la ventaja que con él se pueden realizar mediciones sobre cualquier superficie.

Velocidad de giro del motor (rpm)

Para determinar la velocidad a la cual gira el motor en conjunto con la bomba se empleará un tacómetro de contacto que requiere estar fijo al eje de rotación [10].

Potencia eléctrica

Para conocer con exactitud la potencia de accionamiento, sería conveniente realizar la calibración del motor, es decir, instalarlo en un equipo capaz de medir el tanque en el eje y la velocidad de giro del mismo a fines de obtener esta potencia y con ello determinar el rendimiento global de la bomba. Sin embargo, ésta representa una limitación ya que la Universidad de Carabobo actualmente no cuenta con este equipo para motores de 15 hp y realizar este procedimiento fuera de las instalaciones de la Universidad resultaría excesivamente costoso.

Para determinar la potencia eléctrica consumida por el motor se empleó un transformador de corriente para llevar la corriente de una línea que está por orden de los 37 A (según especificaciones del motor a 220 v), a una corriente que soporte el instrumento de medición (5A) que para este caso será cofímetro que en conjunto con un amperímetro y un voltímetro, suministrarán información para determinar la potencia eléctrica consumida por el motor a través de la ecuación.

$$P_a = \sqrt{3}IV\cos(\phi)\eta_{mot} \quad (1)$$

3. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA DE AGUA Y ARENA

En el campo de la investigación de bombas cen-

trífugas, se ha observado la utilización de una mezcla de agua y arena para producir el desgaste acelerado de los componentes del equipo de una manera progresiva y uniforme. Por lo general predomina el uso de dos tipos de arena, un tipo de arena de cuarzo (arena de montaña) y otro tipo de arena de sílice (que se utiliza para realizar los moldes en los procesos de fundición).

Investigaciones anteriores [3], en las cuales se simuló el desgaste progresivo del impulsor de este mismo tipo de bomba mediante condiciones de trabajo real, se realizó una comparación entre los dos tipos de arena anteriormente mencionadas basándose en parámetros como dureza, resistencia a la fricción, facilidad de adquisición y bajos costos. De esta manera se consideró más apropiado para acelerar el desgaste, el uso de arena de sílice en comparación con la de cuarzo ya que posee un tamaño de partícula que comprende los valores de dureza y resistencia a la fricción capaces de resistir el trabajo frente a las propiedades del material de la carcasa, además de ser más accesible su adquisición, que la arena de cuarzo.

El tamaño de partícula está basado en estudios de tribometría donde se establece un diámetro mínimo de 0,186 mm y un diámetro máximo de 1 mm. Con este tamaño de partícula, en la mencionada investigación [3] se estableció que una concentración de 5 % (masa/volumen) es apropiada para acelerar el proceso de desgaste en las condiciones de funcionamiento dadas.

Los valores de diámetro de partícula de arena se sílice que usará para la preparación de la mezcla están entre 0,21 mm como valor mínimo y 0,85 mm como valor máximo puesto que se cuenta con tamices ASTM N° 70 Y N° 20; los demás tamices de número mayor o inferior a éstos dan un diámetro de partícula que sale del rango recomendado.

El cálculo del peso (Kg) de arena necesaria para lograr una concentración del 5 % se realizó en función de la cantidad de agua en el tanque de almacenamiento.

Este volumen de agua dada la geometría del tanque, es de 0,52 m³ lo que es igual a 520 Kg de agua, por ende si la cantidad de agua representa el 95 % de la masa total de la mezcla, entonces la mezcla tiene una masa total de 548 Kg. La diferencia entre la masa total de la mezcla y la masa de agua

sería por ende la masa de arena, teniendo así una cantidad de arena necesaria igual a 28 Kg.

4. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CARCASA

De acuerdo con investigaciones previas [5] a lo largo del proceso de desgaste, la superficie de la carcasa va perdiendo material, lo cual hace que ésta adquiera un aspecto físico importante, típico del tipo de desgaste que se presenta.

A fines de obtener la mayor cantidad de información acerca del mencionado fenómeno, se realizará el pesaje de la carcasa en condiciones iniciales y al final de cada período de trabajo para desgaste; es decir, al momento en que está nueva, luego a las 12, 24, 36, 48 y 60 horas de trabajo. Esto permitirá conocer la cantidad de material de carcasa perdido durante todo el proceso, para lo cual se utilizará una balanza marca OHAUS con capacidad de Kg y apreciación de 1 gramo.

Medición del espesor de pared

Otra variable que permite obtener información acerca del efecto del desgaste a lo largo de la carcasa es el espesor de pared de la misma. Si la carcasa pierde peso por efecto del desgaste, esta pérdida se reflejará en la variación del espesor de pared. Las mediciones de tal variable, se realizarán al inicio (0h) y al final (60h) del proceso de desgaste.

Para establecer los puntos donde se evaluará el espesor de pared, se realiza una división imaginaria de la carcasa en tres regiones o circunferencias diferentes las cuales a su vez se subdividen en zonas tal como se muestra en la Figura 1; esto permitirá observar la tendencia de esta variable a lo largo y ancho de este componente.

Como puede verse en la Figura 1 la carcasa se divide en tres regiones denotadas como R1, R2 y V, a su vez cada una de éstas se subdivide en siete zonas diferentes denotadas como Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6 Y Z7. De todas las zonas de cada una de estas regiones se tomará un punto particular (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7) y se evaluará siempre en el mismo punto el espesor de pared a las 0 y 60 horas de trabajo.

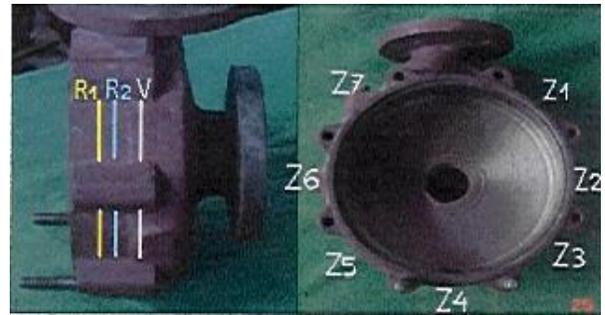


Figura 1. División de la carcasa para la ubicación de los puntos donde se evaluó el espesor de la pared.

Esto permite comparar el grado de severidad del desgaste a lo largo de los 360° de la carcasa en sentido del recorrido del flujo (Figura derecha) y a lo ancho de la misma (Figura izquierda).

Las mediciones se realizaron empleando un medidor ultrasónico. Los valores de espesor de pared se tabularon en un formato especialmente diseñado para tal fin que se muestra en la Figura 2.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA							
FORMATO PARA LA MEDICIÓN DEL ESPESOR DE PARED							
Fecha:	Horas de trabajo para desgaste:						
Espesor de pared (mm)							
PUNTOS	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
R1							
R2							
V							
Observaciones:							

Figura 2. Formato para la medición del espesor de la pared de la carcasa a lo largo del proceso de desgaste.

5. OBSERVACIÓN DE LAS HUELLAS QUE SE FORMAN EN LA SUPERFICIE INTERNA DE LA CARCASA PRODUCTO DE DESGASTE

Otro aspecto importante para el análisis del desgaste en la carcasa, es la observación del aspecto que adquiere la superficie interna de la misma durante este proceso. Tal observación se basará en la realización de una impresión sobre papel de la superficie a lo

largo de toda la circunferencia interna de la carcasa una vez terminado cada intervalo de trabajo, tal como se muestra en la Figura 3, empleando para ella una pieza graficada que permita marcar las "huellas" que se producen por efecto del fenómeno de desgaste.

La observación de esta superficie conllevará al establecimiento del tipo de desgaste que se presenta en la misma. Además de esto, este procedimiento permitirá observar si la geometría y tamaño de la huella que se forma por efecto del desgaste sobre la superficie interna de la carcasa es uniforme o si es variable a lo largo de los 360°.

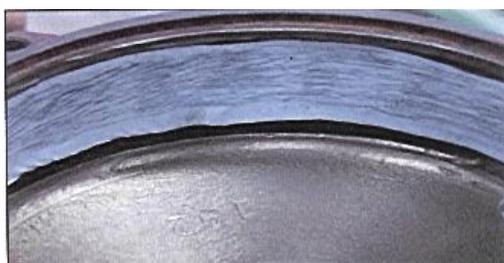


Figura 3. Impresión de la huella que se forma en la superficie interna de la carcasa por efecto del desgaste.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Evolución de las curvas de funcionamiento durante el proceso de desgaste

Una vez realizado cada ensayo, se procedió al levantamiento de las curvas de las variables operativas: altura efectiva (H), potencia de accionamiento (P_a) y rendimiento global (η). Los datos recolectados se procesaron en un programa diseñado en Microsoft Excel, el cual se basó en los cálculos del procedimiento para ensayo de performance establecido por KSB fundamentado en las Normas del Instituto de Hidráulica Nivel B.

Curvas H vs. Q

Como puede notarse en el gráfico los valores de H para un mismo caudal tienen a disminuir a medida que aumenta el tiempo de desgaste. Este comportamiento obedece al hecho de que al aumentar el desgaste en la carcasa: 1) aumenta el caudal de recirculación; y puesto que la energía que se le comunica a este caudal no es aprovechada, se tienen entonces ma-

yores pérdidas volumétricas. 2) aumenta el choque entre sí de las partículas del fluido ya que se originan torbellinos debido a la deformación de la superficie interna de la carcasa; esto se traduce en un incremento de las pérdidas hidráulicas, las cuales disminuyen la energía específica útil que la bomba comunica al fluido, es decir, la altura efectiva.

De acuerdo con la ecuación de Euler, se tiene que en los rodetes centrífugos, la cantidad de energía transferida al fluido la determinan las condiciones cinemáticas a la salida del rodete (U_2 , B_2 , A_2 , Q).

$$H_e = \left(\frac{1}{g} \right) U^2 \quad (2)$$

Si para un mismo caudal a lo largo del proceso de desgaste, la velocidad de giro rpm fue más o menos constante y por ende la velocidad tangencial en la salida U_2 también; y manteniendo el mismo impulsor, por lo cual fue constante el área de la sección de salida A_2 y el ángulo del alabe en la salida, entonces se deduce que la variación en el valor de H que muestra la Figura 4 es producto del desgaste de la carcasa.

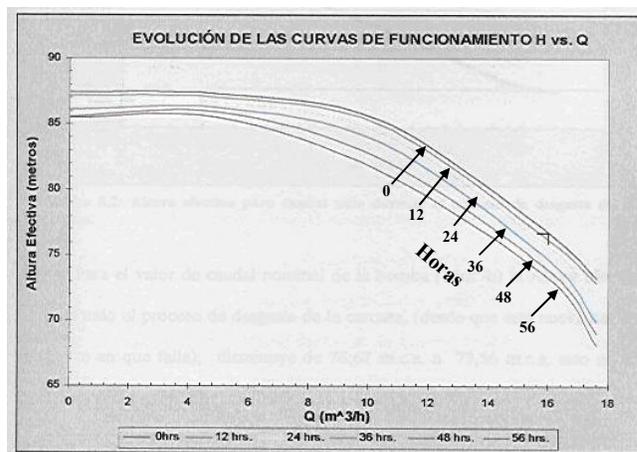


Figura 4. Curvas de comportamiento de la altura efectiva durante el proceso de desgaste.

Para el punto de caudal nulo o shutt-off, la disminución de la altura efectiva responde al aumento de las holguras internas por efecto del desgaste, como por ejemplo la holgura entre el ojo del impulsor y la succión de la carcasa, aumenta por efecto del desgaste del anillo de desgaste lo que hace aumente el caudal de recirculación. La Figura 5 muestra los valores de altura efectiva para el punto de caudal nulo, durante el proceso de desgaste de la carcasa.

Para el valor de caudal nominal de la bomba (16 m³/h) la altura efectiva, durante todo el proceso de desgaste de la carcasa, (desde que está nueva hasta el momento en que falla), disminuye de 76,67 m.c.a. a 73,56 m.c.a, esto es, cae 3,11 m.c.a. lo que representa 4,05 % de su valor inicial.

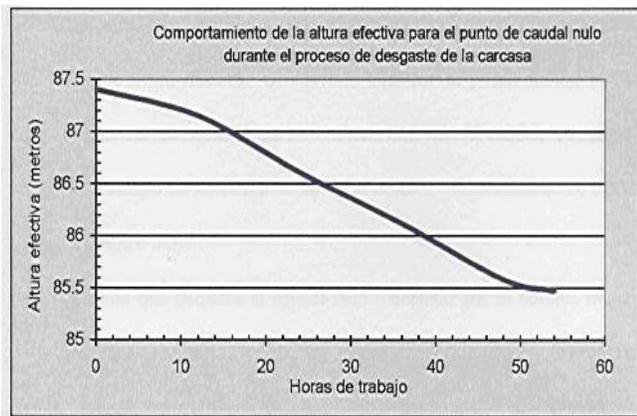


Figura 5. Curva de comportamiento de la altura efectiva para caudal nulo durante el proceso de desgaste.

Un aspecto importante que debe observarse, es el cambio en la pendiente de las curvas de altura efectiva. Observando tales curvas puede notarse como la pendiente de las curvas aumenta, para un mismo intervalo de caudal, con el grado de desgaste o tiempo de funcionamiento de la bomba. Este aumento se observa mejor en el siguiente gráfico.

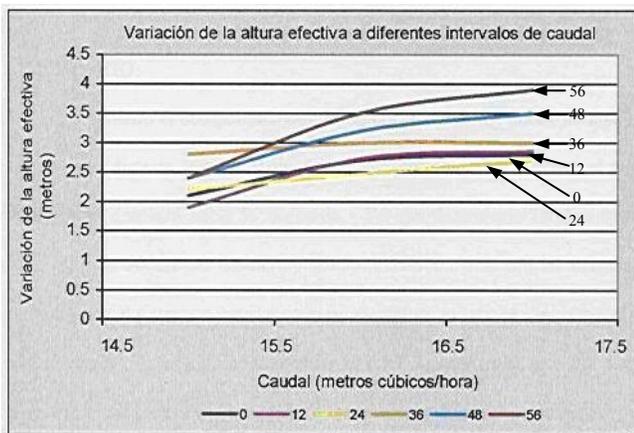


Figura 6. Altura efectiva para caudal nulo durante el proceso de desgaste de la carcasa.

A medida que aumenta el caudal neto manejado por la bomba, mayores son las pérdidas hidráulicas. El gráfico evidencia que, las pérdidas hidráulicas se

incrementan con el caudal neto manejado, tal incremento se acentúa aun más con el desgaste de la carcasa. Esto quiere decir, que cuando la bomba maneja caudales mayores al nominal, el efecto del desgaste sobre la funcionalidad de la misma, es aún más negativo que cuando maneja caudales que estén cercados o dentro del entorno del punto de máximo rendimiento; véase en la Figura 6 como aumenta la variación de altura efectiva para caudales mayores al nominal.

Observando el comportamiento de las curvas H vs. Q, puede notarse que para cualquier sistema, a medida que aumenta el desgaste de la carcasa, el punto de trabajo se desplaza hacia la izquierda. Tal desplazamiento implica que el nuevo valor de altura y/o caudal puede no corresponderse con las exigencias solicitadas por el sistema donde se encuentra instalada la bomba; en este caso se hace necesaria una evaluación del proceso para determinar si éste no admite variación en una de las variables. Si la variable que resulta crítica es la altura (H) y ésta logra mantenerse sacrificando caudal (Q) o viceversa, entonces quiere decir que el equipo puede seguir operando con la carcasa a cierto grado de desgaste. Sin embargo si no existe manera de poder mantener la variable crítica para el proceso que se tenga, entonces es necesario el reemplazo de la carcasa.

Curvas P_a vs. Q.

Como puede notarse en la Figura 7 la potencia de accionamiento tiene a aumentar con el desgaste o envejecimiento de la carcasa.

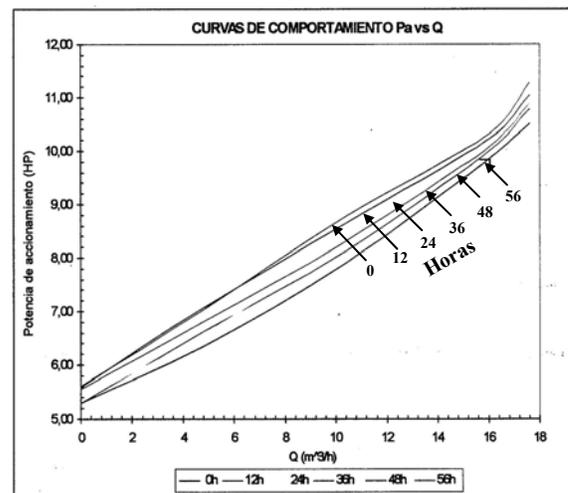


Figura 7. Curva de comportamiento de la potencia de accionamiento durante el proceso de desgaste.

Para el caudal nominal la potencia se incrementa desde 9,86 hp hasta 10,32 hp es decir, aumenta 0,46 hp lo que representa un 4,66 % del valor inicial.

Si al momento de instalar el equipo para la realización de los ensayos, se hubiese seleccionado un motor de 10 hp, es decir, no se hubiese respetado el factor de reserva de potencia, se habría tenido una sobrecarga del motor y por ende se habría dañado.

Por esto es importante señalar, que el evidente aumento en la potencia obliga al usuario a seleccionar motores que soporten tal incremento; logrando evitar pérdidas por reparación o sustitución de los mismos.

Como puede observarse a través de la Figura 7, las curvas de potencia de accionamiento, se desplazan de forma casi paralela, aumentando con el grado de desgaste de la carcasa. La menor variación de la potencia de accionamiento ocurre para caudales cercanos al punto de shut-off y para caudales cercanos al entorno de máximo rendimiento (16 m³/h).

Curvas n vs. Q

Dado el aumento en la potencia de accionamiento así como la disminución de la potencia útil (por el aumento de las pérdidas de disponibilidad) a través del proceso de desgaste, el Rendimiento global se comporta como se muestra en la Figura 8, disminuyendo considerablemente desde 44,74 % hasta 41 %, es decir, cae 3,74 puntos porcentuales, lo que representa un 8,36 % respecto a su valor inicial, para el punto de caudal nominal de la bomba (16 m³/h).

Tal como indican las curvas de comportamiento en la Figura 9, a lo largo del proceso de desgaste de la carcasa, la bomba experimenta una caída considerable del rendimiento global. Esta disminución se observa mejor en la Figura 9, que muestra los valores de rendimiento global para caudal nominal de la bomba (16 m³/h) a las diferentes horas de trabajo para desgaste.

Como se observa en la Figura 8, el rendimiento global de la bomba en estudio, para el caudal nominal, experimenta un comportamiento descendente durante el proceso de desgaste de la carcasa, tal comportamiento se ajusta a un polinomio de tercer orden, cuya ecuación se muestra sobre la Figura 8.

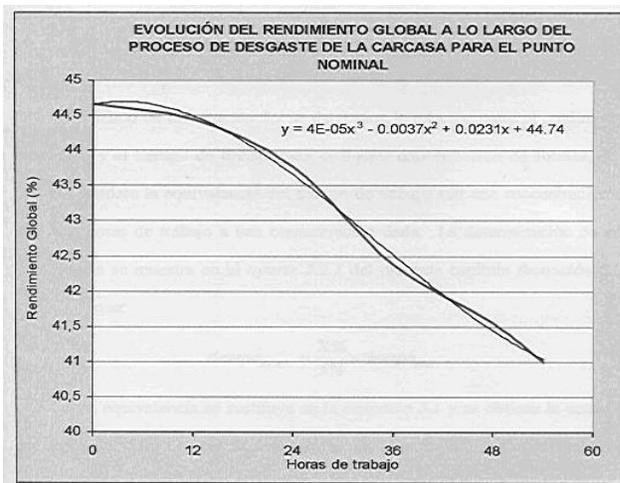


Figura 8. Rendimiento global de la bomba para el caudal nominal durante el proceso de desgaste de la carcasa.

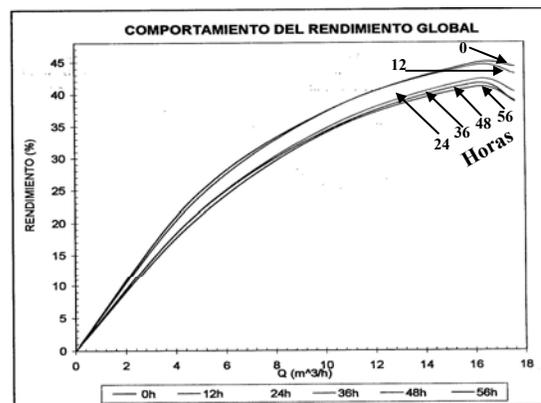


Figura 9. Curva de comportamiento del rendimiento global de la bomba durante el proceso de desgaste de la carcasa.

A partir del análisis de la Figura 8, se establece que la ecuación del polinomio aproximado al comportamiento del rendimiento global resulta la relación entre el rendimiento global y el tiempo de desgaste de la carcasa trabajando bajo las condiciones del ensayo. Es decir, el rendimiento global de la bomba para caudal nominal (16 m³/h) varía con el tiempo de desgaste de la carcasa (bajo las condiciones del ensayo) según la ecuación:

$$N = 0,00004t^3 - 0,0037t^2 + 0,0231t + 44,74 \quad (3)$$

Siendo:

t = tiempo (horas) para el cual se desea conocer el rendimiento durante el ensayo.

Partiendo de la ecuación anterior, se determina la relación entre el rendimiento del equipo y el tiempo de trabajo para cualquier concentración de sólidos. Para ello se considera la equivalencia del tiempo de trabajo con una concentración de 5 y las horas de trabajo a una concentración dada, teniéndose que:

$$Tiempo = \frac{X\%}{5\%} tiempo_{real} \quad (4)$$

Esta equivalencia se sustituye en la ecuación de rendimiento y se obtiene la ecuación que expresa el valor del rendimiento global de la bomba en función del tiempo de trabajo y de la concentración de sólidos que maneje, tal ecuación resulta:

$$\eta(\%) = \left(\frac{X\%}{5\%} \zeta_{tiempo}\right)^3 - 0,003 \left(\frac{X\%}{5\%} \zeta_{tiempo}\right)^2 + \frac{X\%}{5\%} \zeta_{tiempo} + 44,74 \quad (5)$$

De manera simplificada se tiene que:

$$\eta(\%) = 3,2 \times 10^{-7} (X.t)^3 - 1,48 \times 10^{-4} (X.t)^2 + \dots + 4,62 \times 10^{-3} (X.t) + 44,74 \quad (6)$$

Donde:

X = concentración de sólidos en suspensión del agua con que se trabaje (% masa/ volumen).

t = tiempo de trabajo (horas).

De igual forma puede obtenerse la ecuación que define el comportamiento de la potencia de accionamiento, bajo condiciones tolerables de trabajo. Para ello debe partirse, del comportamiento de esta variable durante los ensayos.

Partiendo de los valores de potencia de accionamiento para el caudal nominal, de acuerdo al tiempo de funcionamiento del equipo durante los ensayos, se obtiene la curva de comportamiento de esta variable en función al tiempo de desgaste de la carcasa.

Como muestra la Figura 10, la potencia de accionamiento para caudal nominal a lo largo del proceso de desgaste de la carcasa sigue un comportamiento aproximado al de un polinomio de tercer orden.

De acuerdo con esto, la ecuación que define el valor de la potencia de accionamiento para el caudal

nominal, bajo las condiciones del ensayo es:

$$P_a = 4 \times 10^{-6} t^3 - 0,0003 t^2 + 0,0155 t + 9,86 \quad (7)$$

Realizando el mismo procedimiento que al momento de establecer la ecuación al rendimiento global, teniendo como base la equivalencia entre el tiempo de ensayo y el tiempo real de trabajo de la bomba, se tiene que:

$$P_a(\text{hp}) = 3,2 \times 10^{-8} (X.t)^3 - 1,2 \times 10^{-5} (X.t)^2 + \dots + 3,1 \times 10^{-3} (X.t) + 9,86 \quad (8)$$

Donde:

X = concentración de sólidos en suspensión del agua con que se trabaje (% masa / volumen).

t = tiempo de trabajo (horas).

Uno de los aspectos más importantes de esta curva, es que mediante su ecuación pueden realizarse cálculos inherentes al consumo de potencia, para cualquier tiempo de funcionamiento del equipo y para cualquier concentración con que se trabaje.

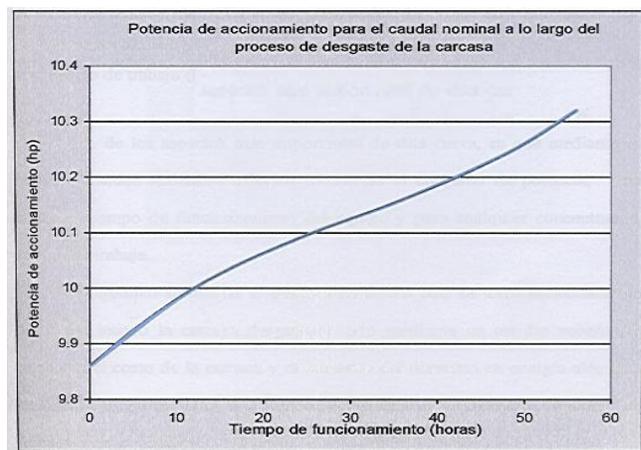


Figura 10. Potencia de accionamiento para el caudal nominal a lo largo del proceso de desgaste en la carcasa.

Desgaste de la carcasa

El seguimiento del proceso de desgaste en la carcasa se realizó a través de la observación del comportamiento de las variables peso y espesor de pared de la carcasa, además del aspecto físico, es decir, a las huellas que se producen en la superficie interna como consecuencia del proceso de desgaste.

Esta observación permitirá determinar aspectos importantes como qué tipo de desgaste se presenta, relación entre la evolución de éste y el tiempo de funcionamiento, uniformidad del mismo a lo largo de la carcasa, entre otros. A la hora 56 de funcionamiento, se presentó un considerable goteo producto del desgaste severo del material de la carcasa. La falla se ubicó en la zona 4, de acuerdo con la división realizada para la observación del desgaste.



Figura 11. Ubicación de la falla de la carcasa.

Variación del peso de la carcasa durante el proceso de desgaste

La pérdida de peso de la carcasa es producto del arranque de material de la superficie interna de la carcasa por parte de la mezcla agua-arena, por ende la variación del peso permite observar la pérdida de material con respecto al tiempo.

La medición del peso de la carcasa se realizó a las 0, 12, 24, 36, 48 y 56 horas de trabajo. Estos valores se representan en la Figura 12.

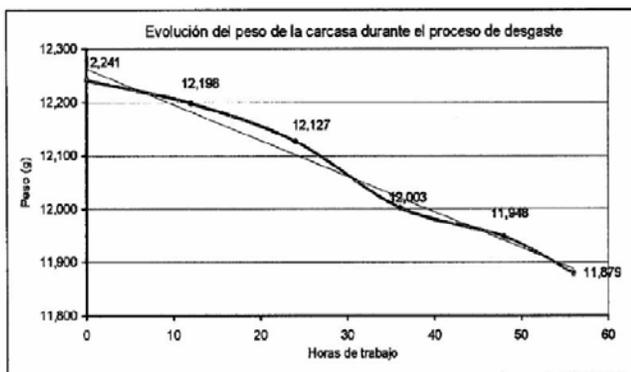


Figura 12. Peso de la carcasa durante el proceso de desgaste.

Como puede verse en la Figura 12, el peso de la

carcasa tiene un comportamiento con desgaste acelerado controlado.

La variación neta de peso fue de 362 gramos después de 56 horas de trabajo, esto quiere decir que a lo largo de la vida útil de la carcasa, ésta pierde casi el 3 % de su masa total inicial. A partir de esto también puede determinarse la tasa total de desgaste o pérdida de material durante el proceso de desgaste acelerado controlado.

$$T_{ensayo} = \Delta P / t \quad (9)$$

Siendo:

T_{ensayo} = Tasa de variación del peso durante el proceso de desgaste (g/h)

ΔP = peso total perdido durante el proceso de desgaste (g)

t = tiempo para que ocurra la falla de la carcasa (h)

Se tiene entonces que:

$$T_{ensayo} = 6,464g/h \quad (10)$$

Investigaciones previas sobre desgaste [3] en un impulsor de la ETA 32-200, determinaron que la tasa de variación del peso de un componente por efecto del desgaste, se comporta de manera aproximadamente lineal según la concentración de sólidos en suspensión de la mezcla con que se trabaje. Esto permite entonces obtener la tasa real de desgaste, es decir, la velocidad de desgaste de la carcasa trabajando con agua en condiciones tolerables (concentración no mayor a 0,02 %) a partir de la concentración a la cual se encuentren los sólidos en suspensión de esta agua, es decir, la concentración real de trabajo. Tales investigaciones determinaron que:

$$T_{real} = \frac{\% real}{\% ensayo} T_{ensayo} \quad (11)$$

Siendo:

$\% real$ = concentración real de trabajo (masa/volumen).

$\% ensayo$ = concentración de arena en el ensayo (masa/volumen).

T_{real} = tasa de variación del peso en condiciones reales de trabajo (g/h).

T_{ensayo} = tasa de variación del peso durante los ensayos (g/h).

Dado que la concentración máxima tolerable

de sólidos en el agua para condiciones normales de trabajo, de acuerdo al fabricante de la bomba en estudio, es de aproximadamente un 0,02% y utilizando la ecuación $\Delta P t$ se tiene que:

$$\begin{aligned} T_{real} &= \frac{0,02\%}{5\%} \zeta 6.464 g/h \\ T_{real} &= 0,026 g/h \end{aligned} \quad (12)$$

A partir de la ecuación T_{real} , se tiene de forma general que la velocidad de desgaste a una concentración dada se puede determinar de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} T\% &= \frac{X\%}{5\%} \zeta 6,464 g/h \\ T\% &= X\% 1,223 g/h \end{aligned} \quad (13)$$

Siendo:

$T\%$ = tasa de desgaste a una concentración específica.

$X\%$ = concentración de sólidos a la cual se desea conocer la velocidad de desgaste.

Así mismo a partir de la ecuación $\Delta P t$, puede generarse una relación que permita determinar el tiempo para la falla de la carcasa (en horas) a partir de la concentración con la cual se trabaje, esto es:

$$T_{real} = \frac{X\%}{\%ensayo} T_{ensayo} \quad (14)$$

$$\left(\frac{\text{gramos}}{\text{tiempo}} \right)_{real} = \frac{X\%}{\%ensayo} \left(\frac{\text{gramos}}{\text{tiempo}} \right)_{ensayo} \quad (15)$$

Los gramos representan la pérdida total de material de la carcasa durante el proceso de desgaste, bien sea durante los ensayos o bajo condiciones de trabajo reales. Esta cantidad es la misma puesto que es la cantidad de material que se pierde hasta el momento en que comienza la falla de la carcasa.

Tomando en cuenta lo anterior y despejando $Tiempo_{real}$, se tiene:

$$Tiempo_{real} = \frac{\%ensayo}{X\%} Tiempo_{ensayo} \quad (16)$$

$$Tiempo_{real} = \frac{280h}{X\%} \quad (17)$$

Donde:

$Tiempo_{real}$ = tiempo en que la carcasa falla por desgaste.

$X\%$ = concentración de sólidos en suspensión con que trabaje.

Para el caso de agua con 0,02% de sólidos, se tiene que el tiempo de funcionamiento para que ocurra la falla de la carcasa de la bomba en estudio, con las especificaciones (material, dimensiones, etc.) es:

$$Tiempo_{real} = \frac{280h}{0.02\%} = 14,000h \quad (18)$$

A su vez a partir de la ecuación ($Tiempo_{real}$), puede obtenerse la equivalencia del tiempo de trabajo con agua con 0,02 % de sólidos en suspensión y una hora de trabajo de ensayo con una concentración de 5 %.

$$Tiempo_{real} = \frac{5\%}{0.02\%} 1h_{ensayo} = 250h \quad (19)$$

Con esto se tiene que, 1 hora de ensayo con una concentración de 5 % equivale a 250 horas de trabajo con una concentración de 0,02 %. De forma general partiendo de la misma ecuación ($Tiempo_{real}$), se tiene que la equivalencia del tiempo de ensayo a 5 % de sólidos en suspensión en el agua, y el tiempo de trabajo a X concentración, es:

$$Tiempo_{ensayo} = \frac{X\%}{5\%} Tiempo_{real} \quad (20)$$

Variación del espesor de pared de la carcasa durante el proceso de desgaste

En esta sección se muestran las zonas de la carcasa que fueron mayormente afectadas por el desgaste. Se realizó una división de la carcasa en tres regiones o circunferencias (Región 1, Región 2 y voluta) las dos primeras se subdividieron en siete zonas y voluta en cuatro (debido a la geometría de la fundición), de manera de ubicar los puntos donde se midió el espesor de pared y de así localizar la pérdida de

material y determinar si ésta es uniforme o no a lo largo y ancho de la circunferencia o 360° de la carcasa en sentido del flujo. A partir de estos valores se determinó la variación neta del espesor durante todo el proceso, es decir desde el estado inicial de la carcasa (sin desgaste) hasta el estado final (56 horas de trabajo).

Como muestra la Figura 13, la variación del espesor de pared no es igual en los diferentes puntos, esto indica que el desgaste a lo largo del recorrido de los 360° que definen la carcasa no es uniforme, ni tampoco a lo ancho de la misma, observándose mayores cambios del espesor de pared hacia las zonas de mayor presión, en las zonas 5, 6 y 7 para las Regiones R1 y R2 al igual que en la voluta.

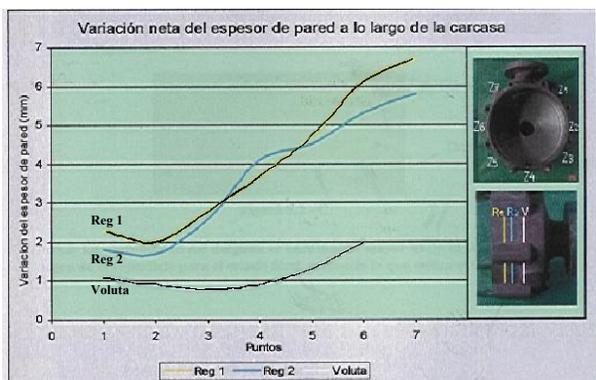


Figura 13. Variación neta del espesor de la pared de la carcasa en la Región 1, Región 2 y voluta, durante las 56 horas del proceso de desgaste.

Es importante destacar que la disminución de espesor de pared más significativa ocurre en la zona 7 de la Región 1, siendo ésta la zona más cercana a la descarga de la bomba (Figura 16). Este cambio es de 6,7 mm en un punto cuyo espesor de pared inicial era de 1,59 mm, lo que representa una disminución del 42,14 % de su valor inicial. El desgaste produce mayor arranque de material hacia la zona de donde se encuentra la descarga (Figura 16), a diferencia de la zona 1 o zona de inicio de la voluta (Figura 14) y zona 4 (Figura 15) donde es menos severo.

Aspecto que adquiere la superficie interna de la carcasa por efecto del desgaste

En esta sección se muestra el aspecto que adquiere con el tiempo de desgaste, la superficie interna de la carcasa. La observación de la huella que produce



Figura 14. Voluta, zona de inicio.



Figura 15. Voluta, zona 4.



Figura 16. Descarga.

este proceso, permitirá determinar con precisión que mecanismo de desgaste actúa y verificar si la severidad del mismo, de acuerdo a la huella que deja, coincide con lo que indica la variación del espesor de pared.

Las huellas se observarán a través de la impresión de la superficie sobre papel, para lo cual se empleó una pieza de grafito. Las Figuras 12 - 16 muestran un modelo representativo de cómo quedó la superficie luego de cada intervalo de trabajo para desgaste. En tales Figuras, las regiones blancas representan las cavidades y las regiones negras representan las protuberancias.

7. CONCLUSIONES

- Con el desgaste de la carcasa el rendimiento global de la bomba disminuye de un valor inicial de 44,74 % hasta 41 % para las condiciones finales

del desgaste de la carcasa. Esto comprende una caída de 3,74 puntos porcentuales, que representan un 8,35 % del valor inicial de esta variable.

- La altura efectiva o energía específica útil, para el caudal nominal de la bomba en condiciones iniciales (sin desgaste) disminuye desde 76,67 m.c.a hasta 70,91 m.c.a, es decir cae 5,76 m.c.a lo que representa un 7,51 % de su valor inicial.
- La Potencia de accionamiento se incrementa desde 9,86 hp para las condiciones iniciales, hasta 10,32 hp para el momento en que falló la carcasa, lo que representa un aumento neto de 0,46 y a su vez se traduce a largo plazo, en incremento del costo de operación del equipo.
- A lo largo del proceso de desgaste de la carcasa, el Rendimiento global de la bomba en estudio se comporta de manera descendente, y se relaciona con el tiempo de funcionamiento del equipo (t) y la concentración de sólidos en suspensión (X) a través de la siguiente ecuación:

$$\eta(\%) = 3,2 \times 10^{-7} (Xt)^3 - 1,48 \times 10^{-4} (Xt)^2 + 4,62 \times 10^{-3} (Xt) + 44,74$$

- A lo largo del proceso de desgaste de la carcasa, la potencia de accionamiento de la bomba ETA 32-200 se comporta de manera ascendente, y se relaciona con el tiempo de funcionamiento del equipo (t) y la concentración de sólidos en suspensión (X) a través de la siguiente ecuación:

$$P_a(\text{hp}) = 3,2 \times 10^{-8} (Xt)^3 - 1,2 \times 10^{-5} (Xt)^2 + 3,1 \times 10^{-3} (Xt) + 9,86$$

- La carcasa sufre un proceso de abrasión por arranque, el cual provoca pérdida de material en la superficie interna de la misma. Esta pérdida de material hace que el peso de la carcasa disminuya siguiendo un patrón aproximadamente lineal en función al tiempo de desgaste.
- El desgaste no es uniforme a lo largo de la carcasa, siendo más pronunciado en la zona de la carcasa donde el área de la voluta es mayor, es decir, donde existe mayor presión.
- El desgaste que sufrió el anillo de desgaste y su efecto negativo sobre las curvas de funcionamiento H vs Q justifica la colocación de este tipo de elementos cambiables.
- El tiempo para la falla de la carcasa bajo condiciones tolerables de trabajo (agua a 0,02% de sólidos en suspensión) es de 14.000 h.

- El ensayo puede realizarse a bombas diferentes, con carcasas de diferente material, para así corroborar su vida útil con determinadas concentraciones; además con potencias mayores donde la variación del η y su incidencia, de acuerdo al proyecto, horas de trabajo diarias, etc., pueda ser notoria.
- A partir de la gráfica de potencia de trabajo del equipo, mediante un estudio económico basado en el costo de la carcasa y el consumo de energía eléctrica, pudiera fijarse el punto a partir del cual se torna antieconómico seguir empleando la voluta desgastada. Esto involucra considerar la potencia del equipo y el número de horas diarias de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] ADDISON, Herbert. Centrifugal and other Rotodynamic pumps. Editorial Chapman & Hall. London. (1996).
- [2] BALJE E. Turbomáquinas "A Guide to Design, Selection and Theory" Willey- Interscience Publication. New York, (1976) Páginas: 37, 446-456
- [3] ESPAÑA, L. SERRATO, C Trabajo Especial de Grado. Universidad de Carabobo. (2001).
- [4] G Wilson. Diseños de Bombas Centrífugas. Sección 10.21.2 Hydraulic Institute.
- [5] "Hydraulic Institute Standards" 12° Edición. U.S.A (1969).
- [6] KARASSIK, Igor. CARTER, Roy "Bombas Centrífugas". Editorial Continental S.A. 5ta Edición. México (1975).
- [7] KARASSIK, Igor. KRUTZSCH, William. Pump Handbook. Editorial Mc Graw Hill. Segunda Edición, (1976).
- [8] KARASSIK, Igor. Manual de Bombas Centrífugas. Diseño Aplicación, Especificaciones, Operación y Mantenimiento. Editorial McGraw Hill. (1994)
- [9] NASCIMBENI, M. Bombas Centrífugas. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad de Carabobo. (2001).
- [10] YEDIDIAH, S. Centrifugals pumps problems. Petroleum Publishing company. Tulsa, Oklahoma. (1980).