

TURBOMAQUINAS HIDRAULICAS: MODOS DE FALLA Y SU INCIDENCIA EN EL MANTENIMIENTO

Orlando Aníbal AUDISIO¹

¹Universidad Nacional del Comahue (UNCo) - Fac. de Ingeniería
Dpto. de Mecánica Aplicada – Lab. de Maquinas Hidráulicas (LA.M.HI.)
Calle Buenos Aires 1400 – C.P. Q8300BSX Neuquén Capital, Patagonia Argentina
correo-e: orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar

Resumen:

La bomba centrífuga (BC) es una de las maquinas más utilizadas en la industria del gas y el petróleo, por lo tanto, este trabajo describirá los principales modos de falla de los componentes y las tareas de mantenimiento. Los problemas que surgen dentro de estas máquinas rotativas inciden de manera directa en la disminución del flujo del fluido dentro de las tuberías, interrumpiendo así la producción y el transporte del mismo a su destino centro del proceso. Provocando que otras partes del sistema de proceso se ralenticen o se comporten de forma indeseable.

Como resultado, es imperativo que estas bombas sean monitoreadas, diagnosticadas, mantenidas o reemplazadas correctamente y enmarcado dentro de normativas vigentes como ser API 697, antes de que la bomba falle de manera funcional (catastróficamente) para reducir el tiempo de inactividad, el costo de materiales y los costos de mano de obra. Este trabajo hace una revisión de los principales modos de falla que se encuentran en las BC, especialmente en la industria del transporte de fluidos. Se hace hincapié en la naturaleza de las fallas, sus síntomas los cuales podrían ser utilizados para la detección y el diagnóstico de fallas específicas, y cualquier procedimiento correctivo mecánico que exista para ayudar a aliviar el problema.

Además, el trabajo presenta comparaciones y referencias de trabajos publicados que han intentado diagnosticar los modos de falla en las BC. La Norma API 697 (Práctica Recomendada-RP) cubre las recomendaciones mínimas para la inspección y reparación de bombas API 610 tipos OH1 a OH5 y BB1 a BB5. Consulte el Anexo A para ver las figuras y la descripción de los tipos de bombas. Además, aborda el proceso de inspección de campo, modificaciones, inspección, actualizaciones, reparación y/o fabricación de nuevos componentes, reensamblaje de la carcasa y el rotor de la bomba en el taller, y la reinstalación y puesta en marcha de la bomba en el campo.

Palabras Claves: Bombas Centrifugas; Modos de fallas; Mantenimiento Predictivo; Monitoreo;

1. Introducción

La confiabilidad es la probabilidad de que un equipo, producto o servicio tenga éxito hasta un momento específico. Para definir la confiabilidad de los equipos, productos y servicios, es necesario recopilar datos históricos de fallas.

Por lo tanto, el primer paso en el estudio del análisis del ciclo de vida es saber cómo ocurren las fallas a lo largo del tiempo, lo cual es fundamental para definir un índice como la tasa de fallas, la confiabilidad, la disponibilidad y el tiempo medio de falla (MTTF) para respaldar las decisiones en la definición del mejor momento para inspección, mantenimiento, para comprobar si el equipo ha alcanzado un requisito de fiabilidad, y para suministrar información a nuevos proyectos.

Las BC fallan como resultado de problemas que surgen en el fluido mismo o por cuestiones operativas y/o mecánicas. Los sensores de monitoreo de condición son adecuados para aplicaciones en las que la bomba está operando en entornos inaccesibles. En este contexto, los fabricantes de BC proporcionan a ciertos equipos sensores integrados a los mismos; sin embargo, la interpretación y el análisis de estos datos por parte del usuario final, no se están utilizando en todo su potencial.

Las fallas en que incurre una BC resultan en cambios en la etapa de explotación que reducen la eficiencia y/o van a un fallo funcional de la misma. Los problemas que en su mayoría se abordarán en el presente trabajo, son los que se enumeran en el Diagrama 01, los cuales están estrechamente vinculados al mantenimiento de estos equipos. Cada tipo de fallo, se lo abordara en sus causas y efecto, síntomas y procedimientos correctivos pertinentes.-



Diagrama 01: Distintos tipos de fallas en BC

La Norma API 697 tiene por objeto cubrir las recomendaciones mínimas para la inspección y reparación de bombas estandarizadas sobre Normas API 610 tipos OH1 a OH5 y BB1 a BB5. Además, cubre todo el proceso de inspección de campo, modificaciones, inspección, actualizaciones, reparación y/o fabricación de nuevos componentes, reensamblaje de la carcasa y el rotor de la bomba en el taller, y la reinstalación y puesta en marcha de la bomba en el campo.

Cada fase de inspección determinará un alcance de trabajo. El alcance del trabajo se hará más definitivo a medida que avance el proceso de inspección.

- b) Ruido:** Similar al ruido que hace el fluido cuando arrastra gravas y se originan ruidos de banda ancha, con baja amplitud, en rango de 2 kHz a 40 kHz. La cavitación aguas abajo del alabe es más ruidosa; aparece en frecuencias de 20 kHz a 40 kHz.-
- c) Vibración** - Las vibraciones de la BC debidas a cavitación son característicamente de alta amplitud y baja frecuencia, generalmente dentro del rango de 0 a 10 Hz [9].
- d) Reducción de eficiencia de bombeo** - Las burbujas originadas en canales del impulsor impiden el flujo de fluido, reduciendo el mismo [13]. La caída del rendimiento es evidencia de cavitación, ya que el ruido no es prominente hasta que la cavitación plena y el punto de rendimiento de la BC es muy baja. [5].

Procedimientos correctivos: Reemplazar impulsor por otro de material más resistente a la cavitación (acero inoxidable); reducir el caudal hasta que $NPSH_R$ sea menor que $NPSH_A$; rediseñar la geometría del impulsor, mejorar características del flujo o aumentar el área de paso para bajar velocidades de entrada al impulsor; estrangular la descarga de la BC; colocar inductor; inyectar aire en succión de la BC [5, 6, 10, 11, 15].

2.2 Pulsaciones de Presiones

Son de consideración en BC multi-etapas (mayores a 300 mca). Las pulsaciones de presión en succión y descarga causan inestabilidad de los controles de la bomba, vibración en tuberías y altos niveles de ruidos, y potencian la aparición de fallas por fatiga [11]. La magnitud y frecuencia de estas pulsaciones dependen de factores tales como: diseño de la BC, altura total de la BC, respuesta de las tuberías de succión y descarga, y punto de operación en la curva H vs. Q de la BC. Las frecuencias característica en succión son del orden de 5 a 25 ciclos/s, y no tienen una relación directa con la velocidad de rotación o frecuencia de paso de los alabes [11].

2.3 Esfuerzos Radiales (ER)

Un alto ER, provoca flexiones en el árbol, y conlleva problemas en el sistema de sellos de la BC, y fallas en tramos medios del mismo. Los ER también producen altas temperaturas en cojinetes. [11]. La mayoría de las fallas que resultan de un alto ER se manifiestan cuando la BC está operando a bajos caudales [7].

Transmisiones por correa y acoplamientos flexibles también ejercen fuerza sobre el eje de la BC. Las fuerzas resultantes de los acoplamientos flexibles se minimizan con una mejor alineación del eje de la BC con el motor de accionamiento.

SKF realizó ensayos para determinar la influencia de los orificios de equilibrio en la magnitud de los ER y EA de la BC [Ver Figura 01]. La magnitud y dirección de la carga axial pueden cambiar respecto al valor de diseño si la holgura del alabe de la BC varía por el desgaste o no se ajusta dentro de la tolerancia y si los orificios de equilibrio se tapan con desechos. La carga axial en BC con impulsor de doble succión está equilibrada, excepto por un posible desequilibrio en el flujo de fluido a través de las dos mitades del impulsor.

En las bombas de etapas múltiples, los impulsores se colocan en tándem y espalda con espalda para equilibrar la carga axial.

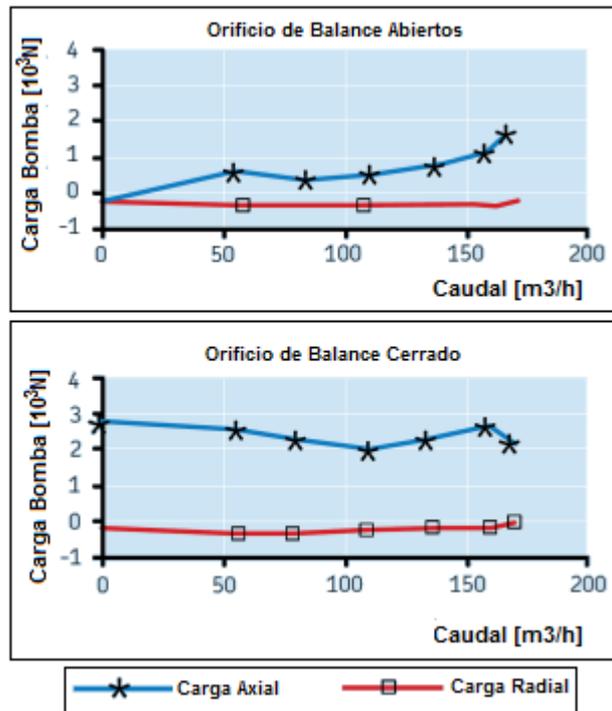


Figura 01: Variación Esfuerzo radial y Axial en la BC

2.4 Esfuerzos Axiales (EA)

El EA se presenta a lo largo del árbol, y es el resultado de una componente cíclica dinámica, superpuesta a una carga estática. Las cargas dinámicas dan origen a elevadas tensiones y fatiga en el metal. La carga estática provoca altas cargas en cojinetes y sellos, aumentando temperatura y reduciendo vida útil de los mismos. La mayoría de las fallas de los rodamientos son fatiga provocadas por EA cíclicos dinámicos [11].

La falla del árbol se debe principalmente a la alta carga cíclica inducida en el mismo cuando la bomba recircula parcialmente su caudal. En este caso, las tensiones cíclicas axiales se pueden reducir aumentando la descarga de la bomba o instalando una línea de recirculación para desviar el flujo y así alejar el caudal total de la bomba del punto crítico. Si esto no es posible, las fallas en el árbol se pueden reducir seleccionando un material de mayor resistencia [11].

Dependiendo de la ubicación del EA, se utiliza diferente instrumentación para determinar su magnitud, tales como sensores de proximidad para inferir el movimiento axial del árbol. Finalmente, el EA del tipo de cojinete de empuje de zapata basculante puede ser monitoreada por una celda de carga instalada permanentemente en la placa balanceadora [7].

2.5 Recirculación de succión y descarga

La recirculación, generalmente, aparece a caudales bajos, y es inevitable en todos los diseños de impulsores. La recirculación de descarga se puede reducir con el diseño, pero esto daría como resultado una disminución en el rendimiento nominal de la BC. La recirculación de succión también

se puede reducir, lo que trae aparejado a un aumento de $NPSH_R$. La recirculación se mitiga no excediendo ciertas velocidades específicas de succión [9]. La recirculación en línea de succión, produce fuertes crujidos y/o ruidos los cuales tienen una intensidad mayor a la de cavitación, y se caracteriza por golpes aleatorios [11].

Para corregir la recirculación en el sistema, se sugieren los siguientes pasos: aumentar el flujo de salida de la bomba; instalar bypass entre descarga y succión de la BC; sustituir el impulsor por un material más resistente a daños por cavitación; aumentar la capacidad de salida de la BC; o modificar el diseño del impulsor [11].

3 Fallas Mecánicas

3.1 Fallas en Cojinetes

Los cojinetes generalmente, entran en fallo por lubricación y/o contaminación del aceite, por temperatura causada por sobrecargas en los mismos, o por lubricación excesiva; fallas que pueden activar causas funcionales [9].

La sobrecarga en rodamientos es el resultado de diversas condiciones operativas: desbalanceo; eje flexionado; orificios de equilibrio en impulsor bloqueados; cavitación; altos EA y ER causada por bajos caudales o falla mecánica dentro de la bomba; calentamiento excesivo de los cojinetes; Enfriamiento inadecuado en cojinetes; huelgos en anillos de desgastes fuera de tolerancias admisibles; desalineación entre la BC y Motor; BC operando lejos del punto BEP (altos ER en impulsor); tuberías ejerciendo tensión; accionamientos de bombas por correas; impulsar fluidos de alta densidad específica (ácido sulfúrico), que llega a duplicar el EA y ER en el rodamiento; oxidación de cojinetes antifricción; expansión térmica del eje mayor que la expansión térmica del rodamiento; impulsor emplazado muy lejos de los rodamientos; ajuste de interferencia incorrecto entre cojinete y eje (el eje estaba fuera de tolerancia y los cojinetes estaban demasiado apretados); tener frecuencia de paso de las paletas coincidente con la resonancia del conjunto de BC; o producir golpes de ariete en las líneas [3].

3.2 Fallas en sellos

La operación en seco de la BC conlleva a fallas en sellos mecánicos. Muchas aplicaciones se protegen utilizando sellos mecánicos duales presurizados, que pueden permanecer lubricados durante largos períodos de operación en seco. Una BC con sello de empaquetadura lubricada con fuente externa sobrevivirá mejor al funcionamiento en seco, pero en prolongados tiempos de operación, terminan colapsando. [12].

Los sellos mecánicos, en general, fallan por dos razones: las pistas en contacto se abren o una de ellas presenta daños superficiales. Cuando se abre una cara de sellado, permite que los sólidos penetren entre ambas superficies; los sólidos se incrustan en la cara más blanda de carbono/grafito, que provoca un desgaste acelerado en la cara de mayor dureza. Este tipo de falla explica la mayoría de las fallas de los sellos mecánicos [11].

3.3 fallas en lubricación

Es la causa de falla predominante en cojinetes. La sobrecarga en cojinetes genera excesivo calor en los mismos. El aumento de temperatura lleva a una disminución en la viscosidad del lubricante, y consecuentemente a la generación de más calor a medida que pierde su capacidad para soportar la carga. Se forma un residuo de barniz que luego se coquea a temperatura elevada. Esta coquización

rompe la capacidad del aceite o la grasa para lubricar el rodamiento, además de introducir partículas sólidas en el lubricante [6]. La termografía infrarroja se puede utilizar para determinar si el rodamiento está sobrecargado por la cantidad de calor que se produce [7].

3.4 *Vibraciones Excesivas*

Los niveles de aceptabilidad en vibraciones están normalizados por la ISO 10816, con amplitud superior a 2,80 mm/s para máquinas pequeñas, 4,50 mm/s para máquinas medianas, 7,10 mm/s para grandes máquinas con fundaciones rígidas, y 11,2 mm/s para máquinas grandes con fundaciones flexibles.

Las vibraciones son el resultado de numerosas razones que las pueden provocar como desbalanceo del impulsor, desequilibrios hidráulicos, fallas en cojinetes, movimiento en fundaciones o bancadas, excentricidad de componentes, cavitación, y excitación hidráulica.

El desbalanceo del impulsor generalmente aparece como una vibración de frecuencia de velocidad de funcionamiento de 1x, y puede ser el resultado de un problema mecánico, como un sello mecánico o falla del cojinete, o un problema hidráulico. Los ejes también producen vibraciones no deseadas debido a un desequilibrio de masa o un arco natural en el eje. Los desequilibrios de masa y los arcos producen una frecuencia de velocidad de funcionamiento de 1x, dependiendo de si solo hay un defecto en el eje. El desequilibrio hidráulico se debe principalmente a una distribución desigual del flujo dentro de todos los pasos de las paletas, lo que provoca una vibración de frecuencia de velocidad de funcionamiento de 1x. Se ha encontrado que el aumento de la $NPSH_A$ ayuda a bajar el nivel de oscilaciones [11].

Varios autores [7] han publicado frecuencias de vibración que se pueden encontrar en una BC y las posibles causas de cada vibración. Además, [7] publicó una tabla que contiene las etapas de degradación de rodamientos y las vibraciones asociadas con cada etapa

3.5 *Fatiga*

Las BC son máquinas que intercambian energía con un fluido e induce una carga cíclica en sus componentes. Aunque las bombas centrífugas son principalmente equipos rotativos de estado estacionario, se encuentran aplicadas pulsaciones o tensiones fluctuantes. La fuente de estas tensiones cíclicas puede ser la interacción del fluido con los alabes del impulsor y del difusor. Las fuerzas inducidas mecánicamente son el resultado de los momentos de flexión que actúan sobre el eje de la bomba o un desequilibrio de un componente en el conjunto del rotor [11].

Una vez que se ha identificado la causa de la falla por fatiga, es factible adoptar acciones correctivas para cada problema. Estas acciones pueden incluir: utilizar materiales resistentes a la fatiga, modificar el diseño de la BC, tratar la superficie afectada o utilizar materiales más resistentes a la corrosión [11].

4 **Otros Modos de Fallas**

Hay algunos modos de falla que no entran en las categorías de problemas hidráulicos o mecánicos. Estos modos de falla son a veces estructurales, como en el caso de la erosión y corrosión, o son el resultado de una multitud de fuentes diferentes, como en el caso de un consumo excesivo de energía.

4.1 *Erosión*

La erosión en las BC adopta una de las cinco formas: *erosión por cavitación, desgaste adhesivo, rozamiento, desgaste abrasivo, y erosión por impacto de partículas sólidas* [11]. El desgaste adhesivo es un desgaste por deslizamiento y es factible de abordar este tema de manera teórica la cual ofrecer una ecuación de desgaste general que cuantifica la predicción del mismo[11].

El desgaste abrasivo es el principal mecanismo de daño en las BC. Ocurre cuando las partículas sólidas en el fluido bombeado, ingresan al huelgo entre anillos de desgaste o en el chavetero del impulsor. Para minimizar este efecto, se deben tener en cuenta la tolerancia de los huelgos.

Es importante la velocidad de las partículas en el nivel de daño en una BC. La bomba da energía cinética a la partícula arrastrada que, al chocar contra una superficie dura, erosiona el material. El rasgo característico del daño ^[Ver Foto 01] por erosión sólidas suele ser reconocible, pero, a veces se confunde con corrosión-erosión o viceversa [11].



Foto 02: Aspecto de la erosión por desgaste de partículas solidas

4.2 Corrosión

Corrosión es la alteración química de un material. Esta se manifiesta en diferentes formas: Corrosión General, Desaleación, Corrosión Galvánica, Agrietamiento bajo tensión, fragilización por hidrógeno, corrosión inducida microbiológicamente, y corrosión intergranular.

Las BC fabricadas con aceros al carbono, hierro fundido o aleaciones de cobre experimentan corrosión. El acero al carbono, no desarrolla una película protectora de óxido y se corroe a una velocidad que depende de la temperatura, el contenido de oxígeno, el pH, el tipo de fluido y la velocidad del fluido. Para la mayoría de las aplicaciones de bombas, dado que la tasa de corrosión es demasiado alta para que este material proporcione una vida útil, se coloca una forma de revestimiento protector sobre el acero para evitar la corrosión [Ver Foto 02] [11].



Foto 03: Aspecto de la corrosión en carcasa de BC

Desaleación, es la eliminación de una fase de una aleación multifásica o un elemento de un material. El caso más común en BC es la corrosión gráfica de la fundición gris. [11].

Corrosión Galvánica ocurre cuando una aleación se acopla eléctricamente a otra y se expone en un líquido conductor. Varios factores afectan la tasa de corrosión galvánica, como la conductividad del fluido; la relación de área de los metales acoplados; potenciales negativos de los metales; y el uso de revestimientos para dificultar el proceso de corrosión galvánica [11].

Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC). Es peligrosa ya que no se detecta hasta que ha avanzado a una etapa que puede causar fallas catastróficas. Los factores que ayudan al SCC incluyen la tensión de tracción (residual o aplicada), un material susceptible, un entorno capaz de causar corrosión por tensión y el tiempo [11].

Fragilización por Hidrógeno resulta en agrietamiento, formación de ampollas, hidrolización o pérdida de ductilidad. El daño causado por la fragilización por hidrógeno se encuentra ocasionalmente en las BC con estructuras cromadas [11].

4.3 *Excesivo consume de potencia*

El alto consumo de energía en BC es indicador de diversas fallas; el principal origen es el desgaste, ya que los huelgos aumentan gradualmente llevando a la BC a una pérdida de rendimiento hidráulico. Cuanto mayor sean los huelgos, se requiere más potencia del motor, lo que puede llevar a una falla funcional de la BC [13].

Otras causas pueden ser: Alta Velocidad de Rotación; empaquetadura demasiado ajustada; el líquido que se bombea tiene una viscosidad superior a la que se diseñó la bomba; desalineación en la bomba; el impulsor roza con la carcasa; el impulsor gira en la dirección incorrecta; el impulsor está instalado en reverso [12]; la bomba tiene aire atrapado en el interior; hay una fuga grave en la línea de suministro a la bomba; la bomba está entregando más de su cantidad nominal; los anillos de desgaste del impulsor tienen excesivo huelgo; el impulsor está dañado; hay una estanqueidad mecánica en los componentes internos de la bomba; o la tubería está ejerciendo presión sobre la bomba [9]. Los procedimientos correctivos para eliminar causas del alto consumo de energía incluyen: seguimiento periódico de la posición de la válvula de control del caudal; Registro periódico de Amperaje y Tensión del motor; medición periódica de la altura de la BC; reparar fugas existentes; reducir velocidad del impulsor; restaurar huelgos a tolerancias admisibles; desmontar la bomba y renovar el impulsor, verificar huelgos y ajustar según sea necesario; [9, 13]. Por la cantidad de fallas que causan un consumo de energía excesivo, para tener un diagnóstico correcto de la falla subyacente, se necesita una variedad de datos de medición basados en condiciones, desde información de proceso hasta mediciones de temperatura y vibración.

4.4 *Bloqueos*

Los atascamientos pueden ser un modo de falla importante de las BC; existe poca evidencia en la literatura sobre estas fallas. El fluido bombeado contiene materiales sueltos que se alojan en el impulsor para obstaculizar y posiblemente detener la rotación del impulsor, o que obstruyen los pasajes entre las paletas del mismo, disminuyendo el caudal. Los procedimientos correctivos implican detener la bomba, retirar los objetos responsables del bloqueo.



Foto 04: Aspecto de Bloqueo en Impulsor de BC

6 Conclusiones

Se ha presentado una revisión de las principales fallas que afectan a las BC. Se incluyeron a partir de la Norma ISO RP 697 Pump Repair-First Edition, varios temas relacionados con cada tipo de falla, sus causas y efectos, síntomas y procedimientos correctivos mecánicos. Se dan detalles de los síntomas que un ingeniero podría utilizar para diagnosticar la falla, ya sea mediante inspección visual, de audio o vibración. Se hicieron comentarios respecto a las industrias donde este tipo de información, ampliamente conocida, no se utiliza en la medida en que debería ser a través de sensores u otra instrumentación adjunta a las bombas, y software para interpretar la información (post-procesamiento). A futuro, se busca alcanzar un sistema integrado de monitoreo de condición y administración de salud de activos para BC y estaciones de bombeo capaz de alertar a los operadores de inminentes problemas con una elasticidad temporal suficiente de modo que permita reducir costos de mantenimiento, mejora en la disponibilidad de equipos y prevenir daños significativos a la infraestructura al eliminar fallas catastróficas.

7 Agradecimientos

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el Proyecto de Investigación **04/I-268 estudio y desarrollo de turbomáquinas y sistemas asociados aplicados a pequeñas fuentes de energía renovable II.-**

8 Referencias

- [1] S. Shiels, "Optimizing centrifugal pump operation," *World pumps*, vol. 2001, pp. 35-39, 2001.
- [2] A. J. Stepanoff, *Centrifugal and axial flow pumps: theory, design and application*. New York: Wiley, 1957.
- [3] S. Shiels, "Centrifugal pump troubleshooting Part two: a retrospective approach," *World pumps*, vol. 2001, pp. 38-42, 2001.
- [4] R. Rayner, *Pump Users Handbook*. Oxford: Elsevier Advanced Technology 1995.
- [5] R. K. Turton, *An introductory guide to pumps and pumping systems*. London: Mechanical Engineering Publications 1993.
- [6] Karassik, Igor J., J. P. Messina, P. Cooper, and C. C. Heald, *Pump Handbook (3rd Edition)*. New York: McGrawHill, 2001.

- [7] R. Palgrave, "Diagnosing Pump Problems From Their Noise Emissions Signature," in *New Challenges – Where Next? – 11th International Conference of the British Pump Manufacturers' Association* UK: BHRA, 1989, pp. 9 - 28.
- [8] J. Tuzson, *Centrifugal pump design* New York: Chichester: Wiley, 2000.
- [9] W. S. Everett, "Predicting Centrifugal Pump Pressure Excursions (Noise)," in *25th annual International Gas Turbine Conference and Exhibit and the 22nd annual Fluids Engineering Conference*, New Orleans, 1979 pp. 287 – 289.
- [10] W. Mc Nally, "Troubleshooting the ball bearings in a centrifugal pump," *World pumps*, vol. 2004, pp. 28-29, July 2004 2004.
- [11] T. Sahoo, "Making centrifugal pumps more reliable," *World pumps*, vol. 2009, pp. 32-36, 2009.
- [12] I. Karassik and J. T. McGuire, *Centrifugal pumps*. New York: Chapman & Hall, 1998.
- [13] R. S. Beebe, *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2004.