



JIDeTEV
Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción



JIDeTEV- Año 2021 -ISSN 2591-4219

Modos de Fallas en Bombas Centrifugas utilizadas como Turbinas Hidráulicas

O. A. Audisio ^a, A. R. Marchegiani ^b, V. H. Kurtz ^{c*}

^{a, b} *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue (UNCo)*
Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (LA.M.HI.)
Calle Buenos Aires 1400 – Q8300 BCX Neuquén Capital – Patagonia Argentina
Proyecto de Investigación: 04/I229

^c *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM)*
Departamento de Electrónica. Calle Juan M. de Rosas 325 – Oberá - Misiones – Argentina
Proyecto de Investigación: 16/II120-PI

e-mail: orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar, ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar, Kurtz.unam@gmail.com

Resumen

Las bombas de tipo centrífugas (BC) son muy utilizadas en aplicaciones en modo reverso para la pequeña generación hidroeléctrica.

Los problemas que surgen dentro de estas máquinas rotativas inciden de manera directa en la disminución de caudales y potencia, interrumpiendo así la producción energética. Esto puede provocar que partes vinculadas al sistema de generación se ralenticen, y se comporten de forma indeseable o colapsen.

Como resultado, es imperativo que estas bombas sean monitoreadas, diagnosticadas, mantenidas o reemplazadas correctamente antes de que la bomba falle de manera funcional (falla catastrófica) 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 bombas centrífugas, especialmente en la industria del transporte de fluidos.

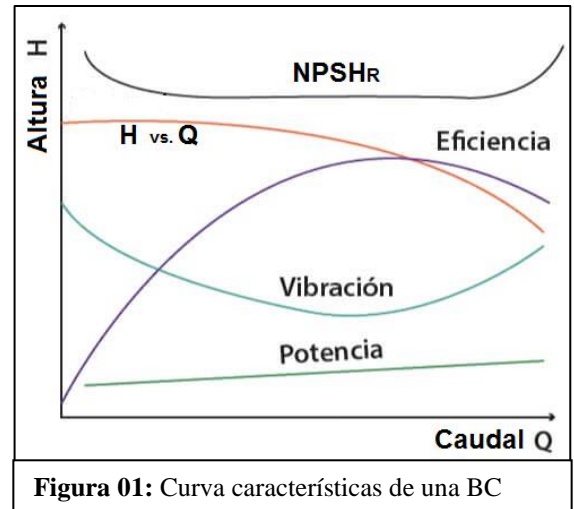
Se hace hincapié en la naturaleza de las fallas, los síntomas que se muestran dentro de la bomba que podrían utilizarse para la detección y el diagnóstico de fallas específicas, y cualquier procedimiento correctivo mecánico que exista para ayudar a mitigar el problema.

Además, este trabajo contiene una comparación y crítica de trabajos publicados anteriormente que han intentado diagnosticar los modos de falla de las bombas centrífugas.

Palabras Clave – BUTUs, Energía Renovable, Energía Hidráulica, Mantenimiento, PCH.

1. INTRODUCCIÓN

Las bombas y sus sistemas asociados son esenciales en una amplia variedad de aplicaciones industriales y principalmente en lo inherente a su uso en rotación reversa para ser utilizadas como pequeñas turbinas hidráulicas. Se sabe que las BC fallan como resultado de problemas que surgen dentro del fluido, como cavitación, y fallas mecánicas, como las que se encuentran en cojinetes y sellos. Se ha encontrado que el monitoreo de vibraciones es adecuado para determinar fallas dentro de las BC. Los sensores de monitoreo de condición permanentemente fijos son adecuados para aplicaciones en las que la bomba está sumergida en entornos inaccesibles. Es cada vez más común que los fabricantes de bombas proporcionen sensores integrados en sus equipos; sin embargo, la interpretación y el análisis de estos datos por parte del usuario final no se están utilizando en todo su potencial. En las siguientes secciones se describirá que el uso de múltiples lecturas de sensores y la síntesis de estas mediciones con la información de los modos de falla y falla dentro del uso de la BC aún debe utilizarse para el monitoreo de la condición para crear una estrategia de mantenimiento más eficiente en las BC utilizadas como turbinas hidroeléctricas (BUTUs). Las fallas de la BUTUs dan



como resultado cambios operativos que reducen la eficiencia o dan como resultado final una falla operativa de la misma.

Hay un número importante de fallas y/o problemas principales que afectan a las BUTUs cuando están en uso. Estos problemas son de tipo mecánicos e hidráulicos, y en estos últimos 20 años se los ha discutidos en la literatura.

Los problemas que se abordarán aquí serán fallas hidráulicas (cavitación, pulsaciones de presión, empuje radial, empuje axial, recirculación de succión y descarga), fallas mecánicas (falla de cojinete, falla de sello, lubricación, vibraciones excesivas, fatiga) y otros tipos de falla (erosión, corrosión, caída en la generación de energía).

Cada problema se describirá incluyendo su causa y efecto, síntomas y procedimientos correctivos mecánicos pertinentes.

2. FALLAS HIDRÁULICAS

Las fallas hidráulicas surgen de cambios en la presión, ya sea en la cámara espiral o en las tuberías que alimenta a la BUTUs, debido a cambios en factores como la temperatura, la velocidad del flujo y caudal.

2.1 Cavitación

La cavitación es la formación de burbujas de vapor en un fluido en movimiento donde la presión del fluido cae por debajo de su presión de vapor. Es el resultado de una reducción de la presión de descarga, o un aumento del caudal por encima de aquél para el que se ha diseñado la BUTUs [3].

Las causas son: alto caudal; una gran disminución en la cantidad de líquido en el sistema que da como resultado un aumento anormal de la temperatura del líquido; disminución de la presión de succión debido a cambios en las condiciones en el lado de descarga de la BUTUS; inestabilidad del flujo dentro de la bomba, que normalmente ocurre a tasas de flujo muy por debajo del flujo del punto de mejor eficiencia (BEP) de la BUTUs; bombas sobredimensionadas que funcionan a gran capacidad; un alto porcentaje de flujos de fuga puede conducir a un aumento de la temperatura en el ojo del rotor, lo que posiblemente causaría pulsaciones localizadas [4-9].

El daño por cavitación se visualizan en la superficie de baja presión de los alabes de descarga de la BUTUs y se acompaña de cuatro síntomas: Erosión, Ruido, Vibración, y Reducción de la eficiencia de la BUTUs.-

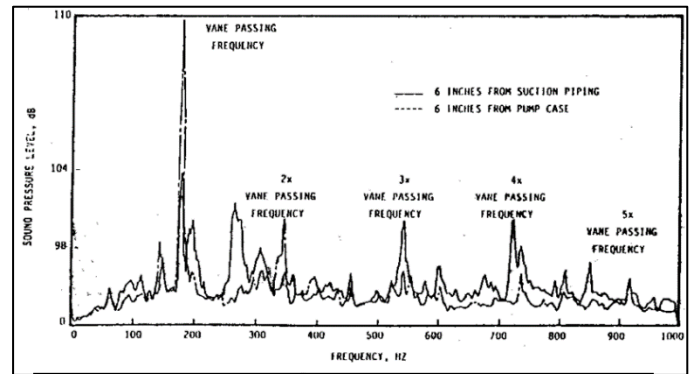


Figura 02: Espectro de ruido por cavitación y vibración en una BUTUs

2.2 Pulsaciones de Presiones

Las pulsaciones de presión se presentan en sistemas de alta presión (superior a 300 mca). Las pulsaciones en admisión y descarga causan inestabilidad en el control de la BUTUs, vibración de las tuberías y altos niveles de ruido de la máquina.

La magnitud y frecuencia de estas pulsaciones dependen de factores tales como diseño de la bomba, altura total intercambiada, respuesta de tubería de alimentación y descarga y punto de operación en la curva característica de la BUTUs.

La frecuencia de la pulsación puede provenir de fuentes conocidas, como la frecuencia de funcionamiento o de paso de los alabes de rotor o múltiplo de estos, o ser aleatoria con origen en la resonancia del sistema, el comportamiento acústico, los remolinos de válvulas o deficiencias en la tubería de alimentación.

Para mitigar o amortiguar estas pulsaciones de presión en tubería de alimentación y/o descarga se puede cambiar las frecuencias de resonancia en la tubería o soportes de esta; reemplazar impulsores por otros que contengan más o menos álabes si la tubería responde a la frecuencia de paso de álabes del rotor; instalar filtros acústicos para reducir la magnitud de las pulsaciones de presión [11].

2.3 Esfuerzos Radiales

El empuje radial actúa sobre el rotor de la BUTUs y en dirección al centro de rotación y, por lo general tiene una componente cíclica dinámica, que se superpone a una carga media estática.

La componente dinámica aumenta rápidamente cuando la bomba está operando en su estado de recirculación (bajos caudales de operación). La carga estática aumenta con la operación en caudales

altos y bajos, teniendo su valor mínimo cerca del punto de mejor eficiencia (BEP) [11]. Este efecto se encuentra a menudo en bombas de diseño de una sola voluta, menos en bombas de diseño de doble voluta y rara vez en bombas con diseño de difusor. La geometría de la voluta también tiene incidencia en la magnitud del empuje radial del sistema [3].

Las cargas radiales elevadas producen altas temperaturas en cojinetes y consecuentemente reducir la vida útil de estos. Los cojinetes de deslizamiento tendrán el metal del cojinete desgastado solo en una dirección y el muñón se desgastará de manera uniforme. Sin embargo, si ocurre lo contrario, que es que el rodamiento está desgastado uniformemente y el muñón está excesivamente desgastado en una dirección, entonces la causa no son cargas excesivas del rodamiento, sino más bien un desbalanceo o eje flexionado [11].

La mayoría de las fallas son el resultado de un empuje radial excesivo que ocurren cuando la BUTUs está funcionando a caudales bajos. Esto se pueden reducir operando la unidad a caudal más alto o instalando un By-Pass desde la admisión de la BUTUs hasta la restitución de la turbina [11].

2.4 Carga axial

El empuje axial se manifiesta a lo largo del eje y en ambos sentidos. El esfuerzo suele ser el resultado de una componente cíclica dinámica, que se superpone a una carga de estado estable, y en cualquier dirección. El aumento de la carga dinámica en el eje puede imponer tensiones excesivas, lo que en última instancia podría conducir a la fatiga del metal. La carga estática excesiva actúa sobre el rodamiento, lo que puede aumentar la temperatura a un estado inaceptable y reducir la vida útil del cojinete. La mayoría de las fallas en rodamientos de BUTUs son por fatiga inducida por las cargas axiales cíclicas dinámicas [11].

2.5 Recirculación de succión y descarga

La recirculación generalmente ocurre a bajos caudales y es un flujo que se inicia en el lado de alta presión y v en dirección al lado de baja presión. La recirculación es inevitable en todos los diseños de impulsores y puede reducir en el diseño, pero a costa de sacrificar eficiencia nominal de la BUTUs.

Para evitar la recirculación, la recomendación es no exceder ciertas velocidades específicas de. Durante la recirculación de succión, se produce un fuerte crujido alrededor de la succión de la bomba, para la recirculación de la descarga, en la voluta de descarga o difusor. El ruido producido por la recirculación tiene una intensidad mayor que el producido por la cavitación, y normalmente se caracteriza por un golpe aleatorio [11].

Para corregir la recirculación en el sistema, se sugieren los siguientes pasos: aumentar el caudal de operación de la BUTUs; instalar un “bypass” entre la descarga y la descarga de la turbina; sustituir el impulsor por un material mejorado que sea más resistente a los daños por cavitación; o modificar el diseño del impulsor [11].

3. FALLAS MECANICAS

Las fallas mecánicas pueden surgir en varios puntos de la BUTUs como ser cojinetes, sellos, lubricación, fundaciones, y anclajes. En este punto consideraremos los principales problemas mecánicos, las razones detrás de ellos y las soluciones factibles de implementar.

3.1 Falas en Cojinetes

Los cojinetes fallan, en general, por contaminación del aceite con agua o partículas sólidas o, debido a altas temperaturas, que a menudo es causado por una sobrecarga en el cojinete o por una lubricación excesiva [9].

La contaminación por humedad en los cojinetes proviene de múltiples fuentes: fugas del sistema de sellos que se direccionan hacia los cojinetes y se filtran a la carcasa del cojinete; usar una manguera de agua para limpiar una fuga en el empaque, lo que permitiría que el agua salpique en la caja del cojinete y en la carcasa a través del respiradero o el área del sello de grasa; reemplazar el aire caliente a través del respiradero de la carcasa del cojinete con aire atmosférico más frío cuando la caja del cojinete se enfría; o la fuga de vapor, condensado o agua de refrigeración de un prensaestopas de cierre mecánico y dirigido al cojinete radial [18].

Cuando la bomba está funcionando en su BEP, las únicas cargas de los cojinetes se deben al peso del conjunto giratorio, la tensión causada por el ajuste de interferencia en el eje y cualquier precarga del cojinete que haya sido especificada por el fabricante.

La mayoría de las BUTUs no funcionan en su BEP. La sobrecarga en cojinetes puede ser el resultado de diversas condiciones: elementos rotantes desbalanceados; eje flexionado; orificios de equilibrio del impulsor bloqueados; cavitación; empuje axial excesivo; carga radial excesiva causada por operación a bajos caudales o alguna falla mecánica dentro de la bomba; calentamiento excesivo en cojinetes debido a una disipación inadecuada del calor; enfriamiento inadecuado de los cojinetes; holgura en exceso en anillos de desgaste; velocidad del rodamiento inadecuadas; desalineación entre la bomba e impulsor; operar BUTUs lejos de su punto de mejor eficiencia (BEP), originando fuerzas radiales excesivas en el impulsor y consecuentemente sobre cojinetes; tuberías que ejercen tensión; accionamientos de bombas por polea; empuje inapropiado de manguitos cónicos en rodamiento; oxidación de cojinetes antifricción por presencia de agua en carcasa de cojinete; expansión térmica del eje mayor que la expansión térmica del rodamiento, provocando deformaciones en caja de cojinetes; rotor emplazado demasiado lejos del rodamiento; ajuste de interferencia incorrecto entre el cojinete y el eje (eje fuera de tolerancia o cojinetes muy ajustados); frecuencia de paso de alabes coincidente con la resonancia del conjunto; o producir golpes de ariete en las líneas [3, 18, 20, 21].

Las causas del sobrecalentamiento pueden deberse a problemas de lubricación. Esto puede deberse a: nivel de aceite demasiado bajo o alto, grado incorrecto de aceite, humedad en el aceite, demasiada grasa dentro del rodamiento, falta de lubricación, en general; material extraño dentro del lubricante (debido a fugas en el sello del eje) [9, 21]; picaduras y corrosión de las pistas de rodamientos y elementos rodantes que aumentan la fatiga de los componentes metálicos, fragilización por hidrógeno que conduce a una aceleración de la fatiga en el metal del cojinete, y la falta de una buena película lubricante debido a la no mezcla de agua y aceite.[18]. La vibración causada por fallas en los rodamientos por lo general resulta ser sutil en las primeras etapas de la degradación del rodamiento y no se notará en la señal de vibración general y, a menudo, se necesita un procesamiento más sofisticado de la señal de vibración. Las ondas de tensión y los pulsos de choque en la carcasa del cojinete de la bomba mostrarán tendencias de falla que preludian un aumento en el nivel de vibraciones mecánicas. La monitorización de estas ondas o pulsos se incluye en la categoría de

monitorización acústica de alta frecuencia o detección de fallos incipientes (IFD) [11], o análisis de envolvente de banda estrecha. Es poco probable que se detecte fallas tempranas en rodamientos fuera de las mediciones de vibraciones o emisiones acústicas.

3.2 Fallas en sellos

Los sellos mecánicos pueden fallar debido a que la BUTUs funciona en seco. Muchas aplicaciones se protegen mejor mediante el uso de sellos mecánicos duales presurizados, que permanecen lubricados incluso durante períodos de funcionamiento en seco completo.

Los sellos mecánicos, en general, fallan por dos razones: las caras superpuestas se abren o uno de los componentes del sello se daña. Cuando se abre una cara de sellado, permite que los sólidos penetren entre las superficies traslapadas. Los sólidos se incrustan en la cara más blanda de carbono-grafito, lo que hace que actúe como un elemento erosivo, lo que provoca un desgaste severo y prematuro en la cara dura. Este tipo de falla explica la mayoría de las fallas de los sellos mecánicos [19].



3.3 fallas en la lubricación

El objetivo de la lubricación es disminuir la fricción entre dos partes que tienen movimiento relativo, disminuyendo así su desgaste y prolongando la vida útil operativa de las partes del sistema. El aceite no contaminado no puede desgastarse y tiene una vida útil de unos treinta años a 30 °C. Esta vida útil se reduce a la mitad por cada 10 °C de aumento de temperatura del aceite [18].

La sobrecarga de los cojinetes puede generar un calor excesivo dentro de los cojinetes. El aumento de temperatura dará como resultado una disminución en la viscosidad del lubricante, lo que luego conduce 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 temperatura elevada. Esta coquización destruirá la capacidad del aceite o la grasa para lubricar el rodamiento, además de introducir partículas sólidas en el lubricante [18]. La termografía infrarroja se puede utilizar para determinar si el rodamiento está sobrecargado por la cantidad de calor que se produce [23].

3.4 Vibraciones

Las vibraciones son el resultado de las partes móviles desequilibradas que se encuentran dentro del sistema, las interacciones del fluido y sus partículas con la BUTUs, tuberías de alimentación y sus movimientos propios. Existen numerosas razones que pueden provocar vibraciones, como desbalanceo del rotor, desequilibrio hidráulico, problemas en cojinetes, movimiento en placa base, excentricidad de componentes, cavitación y excitación hidráulica.

3.4.1 Causas mecánicas de las vibraciones: Las causas mecánicas de las vibraciones incluyen:

- ✓ Componentes rotativos desequilibrados.

- ✓ Impulsores y manguitos de eje no concéntricos y dañados.
- ✓ Eje flexionado.
- ✓ Desalineación bomba - motor
- ✓ Deformación de la tubería (ya sea por diseño o como resultado del crecimiento térmico).
- ✓ Insuficiencia de cimientos o cimientos mal diseñados.
- ✓ Crecimiento térmico de varios componentes, especialmente ejes.
- ✓ Rozamiento entre piezas de movimientos relativos.
- ✓ Cojinetes desgastados o sueltos, piezas sueltas.
- ✓ Pernos de sujeción sueltos.
- ✓ Partes dañadas.

3.4.2 *Causas hidráulicas de vibraciones:* Las causas hidráulicas de las vibraciones incluyen:

- BUTUs operando en un punto fuera del de máxima eficiencia (BEP).
- Vaporización del fluido.
- Alabes de Rotor/Impulsor funcionando demasiado cerca del corte de agua de la Turbomáquina.
- Recirculación interna.
- Atrapamiento de aire en el sistema mediante agitación, etc.
- Turbulencia en el sistema (flujo no laminar).
- Golpe de ariete.

3.4.3 *Causas periféricas de vibraciones:* Las causas periféricas de vibraciones incluyen:

- Vibración armónica de equipos o conductores cercanos.
- Operar la turbomáquina a una velocidad crítica.
- Agarre temporal de las caras del sello.

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. El balanceo de un impulsor se lo debe hacer a la velocidad de funcionamiento para evaluar la importancia de la deflexión del eje debido a los factores actuantes y debido a posibles componentes de resonancia modal [11].

El desequilibrio hidráulico se debe a una distribución desigual del flujo den los canales del rotor, provocando vibraciones de frecuencia de velocidad de funcionamiento de $1x$. Un flujo inestable en el impulsor puede resultar en empuje axial y altas vibraciones axiales.

También se sabe que las placas base producen vibraciones no deseadas. Las tendencias en la construcción de bombas y tuberías han pasado de velocidades de rotación bajas y placas base de hierro fundido a velocidades de rotación más altas con placas base de acero fabricadas menos rígidas. Los problemas de vibración de la placa base deben resolverse en la etapa de diseño o durante la construcción del sistema. Las alteraciones del diseño para aliviar estos problemas pueden incluir tornillos niveladores, orificios de llenado de lechada, orificios de ventilación y protección contra la corrosión [11].

Los ejes también producen vibraciones no deseadas debido a un desequilibrio de masa o una flexión natural en el eje. Estos desbalanceo producen una frecuencia de velocidad de funcionamiento de $1x$, dependiendo de si solo hay un defecto en el eje.

Varios autores [25] han publicado una lista de frecuencias de vibración que se pueden encontrar en una bomba centrífuga y las posibles causas de cada vibración. Además, [25] publicó una tabla que contiene las etapas de degradación de los rodamientos y las vibraciones asociadas con cada etapa. Varias pruebas realizadas en una bomba centrífuga también pueden proporcionar información útil sobre el estado de la bomba. Las pruebas de impacto de la carcasa / alojamiento del cojinete pueden detectar la proximidad de las frecuencias naturales a la frecuencia síncrona y diagnosticar resonancias estructurales. Las pruebas que utilizan variaciones de velocidad pueden detectar excitación de resonancia estructural y / o velocidades críticas del rotor. Las pruebas que utilizan variaciones de flujo a una velocidad fija pueden detectar un desequilibrio hidráulico. Las pruebas que utilizan un cambio de temperatura pueden detectar una desalineación debido al crecimiento térmico; y un cambio en la frecuencia natural de la carcasa debido al atasco / aflojamiento de los chaveteros. Y, por último, las pruebas que utilizan el equilibrio de compensación también pueden determinar un desequilibrio de acoplamiento [24]

3.5 Fatiga

La fatiga se clasifica principalmente en uno o más de las siguientes situaciones: carga cíclica, fatiga del material o fatiga asistida por el medio ambiente. Las bombas son básicamente máquinas que tienen un fluido, con o sin sólidos, que induce una carga cíclica en sus componentes. Aunque las bombas centrífugas son principalmente equipos rotativos de estado estacionario, se encuentran pulsaciones o tensiones aplicadas fluctuantes. La fuente de estas tensiones cíclicas puede ser la interacción del fluido entre las paletas de salida del impulsor y las paletas del difusor o, en el caso de una bomba de voluta, las paletas del impulsor y la carcasa en el tajamar. 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].

Cuando se aplican fuerzas cíclicas a las piezas que se encuentran en la bomba, puede aparecer una grieta durante un período de tiempo en la superficie de un componente. Pueden producirse fracturas en un componente, aunque la carga produzca tensiones mucho menores que la resistencia a la tracción del material. Después de que la grieta se ha introducido en el componente, la grieta puede crecer con cada carga cíclica hasta que el componente finalmente se fractura [11].

La fatiga asistida por corrosión ocurre cuando el daño por corrosión cambia la textura de la superficie y aumenta significativamente las tensiones locales que actúan sobre un componente de la bomba debido a la sensibilidad a las muescas. Cuando esto sucede, es probable que el componente se agriete por fatiga. En algunos casos, la oxidación puede influir en la propagación de grietas, que puede enmascarar las características del mecanismo de fatiga. Los óxidos de corrosión, que se forman a lo largo de la cara de la grieta, pueden producir un efecto de acuñamiento, que mecánicamente es capaz de aumentar las fuerzas de tracción locales que actúan sobre la punta de la grieta y, por lo tanto, aumentar la velocidad de propagación de la grieta. La fricción o el desgaste también pueden producir sitios en los que se pueden iniciar grietas por fatiga. Además, los radios agudos y los defectos en la superficie del material, como en el caso de la porosidad y el mecanizado deficiente, pueden actuar como concentraciones de tensión en materiales susceptibles [11].

La fatiga se puede ver en su progresión de tres etapas desde (1°) el inicio de la grieta, que a veces se asocia con defectos preexistentes, (2°) propagación de grietas y (3°) falla final. El nivel de esfuerzo aplicado, la geometría, el tamaño de la falla y las propiedades mecánicas determinan la existencia y extensión de estas etapas de fatiga. Estas tres etapas de agrietamiento por fatiga se pueden observar en la superficie de la fractura, siempre que no exista daño secundario que enmascare el aspecto característico. Las bandas que resultan de la fatiga a menudo se denominan "marcas de concha", "líneas de detención de grietas" o "marcas de playa" y reflejan diferentes períodos de crecimiento de la grieta. Las "líneas de trinquete", que son la unión de dos frentes de fisura diferentes en planos diferentes, se observan en fisuras de origen múltiple. Estos tipos de fracturas por fatiga se asocian normalmente con componentes giratorios. Una vez que se ha identificado la causa del agrietamiento por fatiga, se pueden tomar acciones correctivas para remediar el problema. Estas acciones correctivas pueden incluir: utilizar materiales resistentes a la fatiga, modificar el diseño de la bomba, 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 múltiples fuentes, como es el caso de un consumo excesivo de energía.

4.1 Erosión

La erosión en las bombas, para ambos modos de rotación, se presenta en cinco formas diferentes: erosión por cavitación, desgaste adhesivo, rozamiento, desgaste abrasivo y erosión por impacto de partículas sólidas [11].

El desgaste adhesivo es la única teoría del desgaste por deslizamiento que puede ofrecer una ecuación de desgaste general que cuantifica la predicción del desgaste [11].

El desgaste abrasivo se caracteriza por la interacción de los sólidos con los componentes internos, ya sea en dos o tres cuerpos. El desgaste abrasivo de tres cuerpos es el principal mecanismo de daño en las bombas centrífugas. Esto ocurre cuando las partículas sólidas duras, que se encuentran en el fluido bombeado, ingresan entre las áreas de ajuste del anillo o las caras del chavetero del impulsor. Para minimizar este efecto, se deben tener en cuenta algunas variables. La holgura del anillo de desgaste influye en la cantidad de daño en la BUTUs. [11].

El rasgo característico del daño por erosión debido a las partículas sólidas que golpean la maquina suele ser reconocible; sin embargo, a veces se confunde con corrosión-erosión o viceversa. En casos como este, un diagnóstico inadecuado conducirá a una solución inapropiada del problema [11].

4.2 Corrosión

La corrosión es la alteración química de un material. La corrosión se presenta en 7 formas diferentes (general, desmoldeante, galvánica, agrietamiento por corrosión bajo tensión, fragilización por hidrógeno, corrosión inducida microbiológicamente, corrosión intergranular), algunas de las cuales son más comunes que otras. La corrosión general ocurre sin ninguna localización del ataque.

Este tipo de corrosión ocurre en metales o aleaciones que no desarrollan una película pasiva efectiva en la superficie. La corrosión generalmente ocurre como resultado de la oxidación y se produce óxido metálico.

Muy a menudo, las bombas fabricadas con aceros al carbono, hierro fundido y aleaciones a base de cobre experimentan este tipo de corrosión.

La 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, donde el agua de mar tiene menos conductividad que el agua dulce; la relación del área de los metales acoplados; los potenciales negativos de los metales; y el uso de revestimientos para dificultar el proceso de corrosión galvánica [11].



El cuarto tipo de corrosión se llama agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC). Esta forma de corrosión es peligrosa ya que generalmente no se detecta hasta que ha avanzado a una etapa que puede causar fallas catastróficas. Aunque es poco común en la mayoría de las bombas, este tipo de falla puede ocurrir en varias clases de material y, por lo tanto, el diseñador de la bomba debe ser consciente de su potencial. 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].

La fragilización por hidrógeno es el siguiente tipo de corrosión que resulta de la combinación de hidrógeno y una tensión de tracción residual o aplicada. Este tipo de daño resulta en agrietamiento, formación de ampollas, hidrolización o pérdida de ductilidad. El daño causado por la fragilización por hidrógeno se encuentra ocasionalmente en las bombas como resultado de los procesos de enchapado, como el cromado, que se utiliza para reconstruir los ejes de las bombas [11].

La corrosión inducida microbiológicamente es el resultado de la actividad microbiológica, que se encuentra principalmente en el agua estancada. Este tipo de corrosión ocurre con mayor frecuencia cuando el agua estancada permanece en la bomba cuando se apaga durante un período prolongado de tiempo. Las bacterias productoras de sulfato, que se encuentran en muchas aguas, forman tubérculos (montículos o colonias viscosos, de forma semiesférica rojiza) sobre acero al carbono o hierro fundido. Al raspar, dejan un hoyo en forma de platillo, dentro del cual habrá un depósito negro y húmedo. Las picaduras son el resultado del ácido sulfúrico excretado por las bacterias; sin embargo, esto no resultará en una falla prematura. En casos como este, en ocasiones se han encontrado biocidas que ayudan a paliar el problema. Finalmente, la descomposición de organismos biológicos también puede generar sulfuro de hidrógeno, que afecta la película protectora de óxido en las aleaciones a base de cobre. Esta actividad biológica puede perjudicar la resistencia a la corrosión de los bronce [11].

El tipo final de corrosión se llama corrosión intergranular. Este tipo poco frecuente de corrosión generalmente es causado por diferencias químicas locales, como las regiones empobrecidas en cromo de una placa de acero inoxidable austenítico. Las aleaciones de bronce susceptibles a este tipo de

corrosión incluyen los latones de aluminio, los bronce de silicio, el metal muntz y el metal almirante. Este tipo de corrosión a menudo conduce a grietas por fatiga asistidas por corrosión cuando se aplica una carga cíclica al metal [11].

4.3 Potencia Generada Escasa

La merma en la potencia generada con el motor de la bombas utilizado como generador (banco de capacitores) es un indicativos de que puede haber varios problemas diferentes con la BUTUs.

Uno de los principales problemas que resulta es la existencia de concentraciones pequeñas o altas de partículas en el fluido que provoca problemas de rendimiento a largo plazo; los espacios libres de funcionamiento aumentan gradualmente por el desgaste de las piezas. Esto se puede encontrar en cualquier aplicación de bomba centrífuga y BUTUs, independientemente de cuán limpio se vea el fluido. Este desgaste produce una pérdida de rendimiento hidráulico. Cuanto mayor sean los huelgos, el rendimiento volumétrico disminuye y la potencia generada decae [26].

Otras causas principales de fallas son: la velocidad del impulsor es demasiado baja, empaquetadura demasiado apretada, desalineación en la bomba, el rotor toca la carcasa, el rotor gira en la dirección incorrecta, el rotor está instalado en la dirección incorrecta [27], la maquina tiene aire atrapado en el interior; hay una fuga grave en la línea de suministro a la bomba, los anillos de desgastes están excesivamente desgastados, el impulsor está dañado, y la tubería está ejerciendo presión sobre la bomba [9].

Los procedimientos correctivos que se pueden tomar para eliminar las causas en la merma de generación incluyen: Registro periódico de la corriente y el voltaje del motor si la bomba está funcionando la curva de altura / flujo donde la curva de flujo de cabeza no es empinada; medición periódica de la altura de cierre de la bomba; renovar las juntas defectuosas, reparar las fugas existentes, reducir la velocidad del impulsor, desmonte la bomba y restaure los espacios libres a las dimensiones originales, aliviar la presión interna sobre la empaquetadura, afloje las tuercas del casquillo y vuelva a apretarlas con los dedos, desmontar la bomba y renovar el impulsor; desmonte la bomba, verificar ajustes y tolerancias según sea necesario [9, 26].

Debido a la cantidad de fallas que pueden estar provocando la falla en la generación y 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.

5 DISCUSION

Las bombas más antiguas no poseen sensores para medir datos como presión, caudal, rpm, temperatura, desplazamiento, aceleración; las más nuevas se pueden proporcionar con sensores de temperatura, vibración y fugas, así como con analizadores de potencia para determinar el estado del motor eléctrico y el equipo electrónico asociado en la bomba. Sin embargo, a pesar de la información proporcionada, no existe una interpretación y evaluación de datos recopilados.

Ha habido un cambio en el enfoque de los trabajos de investigación en las últimas dos décadas, pasando de tener una interpretación del operador de los signos mecánicos e hidráulicos de falla a crear sistemas expertos que utilizan redes neuronales, algoritmos genéticos y lógica difusa para interpretar

la información recopilada y presentar el final al usuario con un diagnóstico del estado actual de la bomba. Estos tipos de diagnóstico incluyen indicar la existencia y gravedad de la falla e intentar pronosticar la vida remanente de la bomba.

Velocidades de procesamiento más altas en computadoras, dispositivos portátiles de computadora más pequeños y veloces, sensores más pequeños y mejores métodos para transmitir datos de forma inalámbrica o mediante conexiones por cable, proporcionan hoy mejores medios para obtener los datos de campo, interpretando los datos en el sitio o en una computadora local y proporcionar al usuario final en un lugar distante los resultados interpretados de las señales obtenidas.

La mayoría de los sistemas actuales de diagnóstico intentan determinar algunos modos de falla, enfocándose en fallas hidráulicas y mecánicas, sin enfocarse en otras debido a la dificultad de detección. Por ejemplo, es posible que los modos de falla, como la corrosión, el profesional no detecte de manera fácil, sino a través de una inspección visual de la causa del problema.

6. Conclusiones

Se ha presentado una revisión de distintos problemas principales que afectan a las bombas centrífugas que operan en sentido reverso para la generación hidroeléctrica en pequeña capacidad.

Se incluyeron varios temas relacionados con cada problema, como su causa y efecto, síntomas y procedimientos correctivos mecánicos.

Se dieron detalles de los síntomas que un ingeniero podría utilizar para diagnosticar el problema, ya sea mediante inspección visual, inspección de audio o vibración.

La visión futura es un sistema integrado de monitoreo de condición y administración de salud de activos para bombas y estaciones de bombeo capaz de alertar a los operadores de problemas inminentes con suficiente advertencia para reducir los costos de mantenimiento, mejorar la disponibilidad de los equipos y prevenir daños significativos a la infraestructura al eliminar fallas catastróficas.

Agradecimientos:

Este trabajo está desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación financiado por la Universidad Nacional del Comahue (UNCo) denominado: *Estudio y Desarrollo de Turbomáquinas y Sistemas Asociados Aplicados a Pequeñas Fuentes de Energías Renovables*, código 04-I229, y del Proyecto de Investigación en conjunto con la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Misiones (2020-2022) 16/I1120-PI.

7. BIBLIOGRAFÍAS Y/O REFERENCIAS

- [1] B. Hart, "NPSH Curve. (Image)," http://www.pumpingmachinery.com/pump_magazine/pump_articles/article_15/article_15.htm, 2005.
- [2] ITT, "Cross section of a Flygt N pump with sensors labeled," W. W. F. N.-p. ITT, 3306, 3312, 3356, 3400 [Brochure], Ed. White Plains, NY: ITT, 2010.
- [3] S. Shiels, "How centrifugal pump hydraulics affect rolling element bearing life," *World pumps*, vol. 1998, pp. 32-35, 1998.
- [4] S. Shiels, "Optimizing centrifugal pump operation," *World pumps*, vol. 2001, pp. 35-39, 2001.
- [5] A. J. Stepanoff, *Centrifugal and axial flow pumps : theory, design and application*. New York: Wiley, 1957.
- [6] I. Karassik, *Centrifugal pump clinic*, Second ed. New York: Dekker, 1989.

- [7] S. Shiels, "Centrifugal Pump Academy: Causes of intermittent and chronic cavitation," *World pumps*, vol. 1998, pp. 57-60, 1998.
- [8] S. Shiels, "Centrifugal pump troubleshooting Part two: a retrospective approach," *World pumps*, vol. 2001, pp. 38-42, 2001.
- [9] R. Rayner, *Pump Users Handbook*. Oxford: Elsevier Advanced Technology 1995.
- [10] R. K. Turton, *An introductory guide to pumps and pumping systems*. London: Mechanical Engineering Publications 1993.
- [11] Karassik, Igor J., J. P. Messina, P. Cooper, and C. C. Heald, *Pump Handbook (3rd Edition)*. New York: McGrawHill, 2001.
- [12] 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.
- [13] T. Hicks and T. W. Edwards, *Pump application engineering* New York: McGraw-Hill 1971.
- [14] J. Tuzson, *Centrifugal pump design* New York: Chichester: Wiley, 2000.
- [15] S. Shiels, "Protecting centrifugal pumps at low flow," *World pumps*, vol. 1999, pp. 25-27, 1999.
- [16] A. Ismaier and E. Schlücker, "Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 239, pp. 3151-3154, 2009.
- [17] 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.
- [18] W. Mc Nally, "Troubleshooting the ball bearings in a centrifugal pump," *World pumps*, vol. 2004, pp. 28-29, July 2004 2004.
- [19] T. Sahoo, "Making centrifugal pumps more reliable," *World pumps*, vol. 2009, pp. 32-36, 2009.
- [20] S. Shiels, "Troubleshooting centrifugal pumps: rolling element bearing failures," *World pumps*, vol. 2001, pp. 28 - 30, 2001.
- [21] I. Karassik and J. T. McGuire, *Centrifugal pumps*. New York: Chapman & Hall, 1998.
- [22] S. Shiels, "Successful centrifugal pump commissioning and start-up," *World pumps*, vol. 2000, pp. 24-26, 2000.
- [23] R. A. Epperly, G. E. Heberlein, and L. G. Eads, "A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography," in *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1997. Record of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 44th Annual*, 1997, pp. 59-68.
- [24] U. Bolleter and A. Frei, "Courses and control of synchronous vibrations of multi-stage pumps," in *The Fluid Machinery Committee of the Power Industries Division of the Institution of Mechanical Engineers* Institution of Mechanical Engineers Mechanical Engineering Publications for the Institution of Mechanical Engineers, 1990, pp. 1- 6.
- [25] R. S. Beebe, *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2004.