

DESGASTE DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS EN LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Claudia Sánchez, Consultora en Innovación Tecnológica

Resumen — La generación hidroeléctrica es un proceso con desarrollo de tecnología consolidado y con difusión en lugares donde existen las condiciones geográficas y de acceso a fuentes de agua suficientes para su funcionamiento. Es clasificada por algunos autores como una fuente renovable, flexible y viable, debido a las condiciones que se incorporan desde el diseño de los sistemas para su operación. Sin embargo, los equipos involucrados en los procesos de generación hidroeléctrica se encuentran sometidos a condiciones de operación, que se convierten en críticas con el paso del tiempo, debido a la sedimentación de los embalses que va causando el ingreso de sedimentos junto con el flujo de agua, ocasionando impactos en las máquinas hidráulicas, que generan desgaste principalmente de tipo erosivo. En este artículo se pretende hacer una síntesis de algunos tipos de desgaste en diferentes partes que componen las máquinas hidráulicas utilizadas en generación de energía eléctrica.

Palabras Clave — Máquinas Hidráulicas, Sedimentos, desgaste, Productividad

1. INTRODUCCIÓN

La generación de energía es un factor fundamental para el desarrollo económico, así como de forma transversal, de las actividades en un país independiente de su tamaño, la cantidad de población o la cantidad de productos de exportación; sin embargo, actualmente, existe una preocupación adicional que está relacionada con la sostenibilidad de los procesos de generación de energía. De acuerdo con Eltvik, (2013), la fuente renovable de generación de energía más viable y flexible es la hidroeléctrica, teniendo en cuenta su capacidad de almacenamiento, eficiencia y sus costos de operación y mantenimiento. En el caso de Colombia, la principal fuente de energía es la generación hidroeléctrica, con una participación para el año 2014, de aproximadamente un 70% de MW generados (UPME, 2015). En esta condición, se puede afirmar que los procesos de generación hidroeléctrica, su eficiencia, optimización y control son importantes para garantizar la calidad de suministro y de prestación del servicio.

Uno de los fenómenos que debe enfrentar toda planta de generación hidroeléctrica es el proceso de sedimentación, que consiste en que a los embalses ingresan corrientes de diferentes afluentes, cada una de las cuales lleva consigo una carga de sedimentos. Estos sedimentos tienen diferentes etapas una vez ingresan al embalse: en algunos casos van avanzando conforme avanza la corriente hasta ser filtrados en cierta medida por los diferentes sistemas de rejillas y filtros que se ubican antes de la entrada a las turbinas. En otros casos, pueden irse acumulando, generando entonces disminución en la capacidad del embalse, obstrucción en las bocatomas, o efectos como desgaste en las partes de las máquinas hidráulicas (por ejemplo: turbinas, boquillas, agujas, etc) (Sánchez & Fuquen, 2013).

Este fenómeno de acumulación de sedimentos ha venido incrementándose alrededor del mundo, debido a que las plantas de generación acumulan ya tiempos importantes de funcionamiento, razón por la cual los temas asociados a gestión de sedimentos, prevención y control del efecto que generan los mismos, se conviertan en temas de investigación (Annandale,

y otros, 2003).

El presente artículo pretende hacer una revisión de los efectos de los sedimentos sobre las máquinas hidroeléctricas, y su desempeño en el proceso de generación de energía. En un futuro artículo se identificarán los mecanismos o materiales más útiles para prevenir este tipo de efectos.

2. GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Se puede definir una central hidroeléctrica, como un arreglo de equipos, mediante el cual es posible aprovechar la energía contenida en una masa de agua situada a una altura, que puede ser transformada en energía eléctrica a través del aprovechamiento de la energía potencial, por la conducción del agua desde su ubicación en altura hasta el punto donde se sitúan una o varias turbinas hidráulicas accionadas por la dinámica de la caída del agua, movimiento que permitirá la generación a través de los generadores conectadas con las mismas (Fernández & Robles, 2015). Un esquema de una central hidroeléctrica, puede verse en la Figura 1.

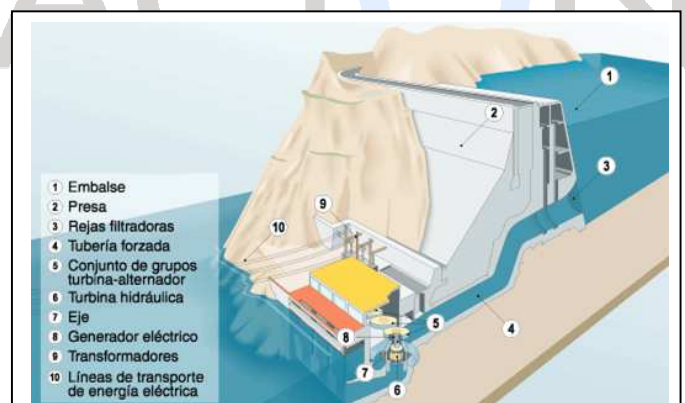
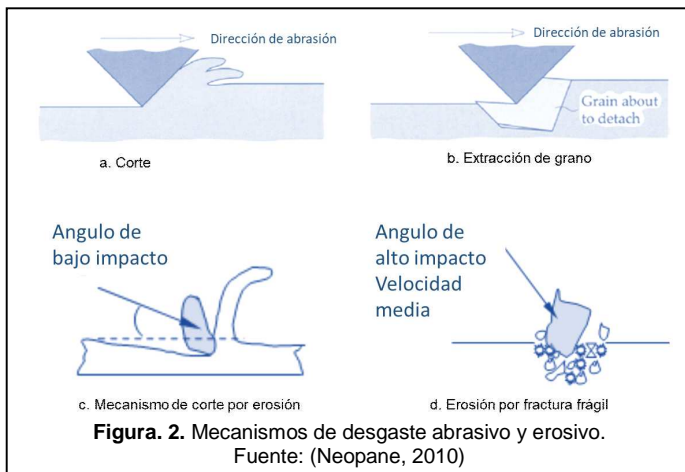


Figura 1. Esquema de Central Hidroeléctrica.
Fuente: (UNESA, 2016)

3. DESGASTE DE PIEZAS METALMECÁNICAS

De acuerdo con Neopane, (2013), la “definición general de desgaste es la pérdida de material debido al impacto mecánico sobre la superficie.” Existen varios tipos de desgaste, dependiendo de la aplicación a la que esté sometida la pieza. Por ejemplo en turbinas de gas, las palas de las turbinas están sometidas a erosión debido a la alta velocidad de las partículas sólidas; otro ejemplo son los aviones militares que están sujetos a desgaste por causa de la arena y la lluvia (Neopane, 2010).

En el caso de la maquinaria hidráulica, la industria minera, y el dragado, presentan un tipo de desgaste abrasivo y otro erosivo.



3.1 Desgaste abrasivo:

Corresponde a la eliminación de material debido al efecto que causa el deslizamiento sobre la superficie de partículas duras (a través del agua en el caso de las máquinas hidráulicas), las cuales se desplazan con un vector de velocidad paralelo a la superficie, razón por la cual es retirado el material por efecto de corte (Eltvik, 2013) (ver Figura 2 a. y b.).

3.2 Desgaste por erosión:

Causado por efecto de partículas que chocan contra la superficie de la pieza, con una velocidad y un ángulo. Este impacto continuo, da como resultado deformación plástica del material, corte, agrietamiento por fatiga o una combinación de estos efectos, que con el paso del tiempo ocasiona el desprendimiento de pequeñas cantidades de material (Eltvik, 2013) (ver Figura 2 c. y d.).

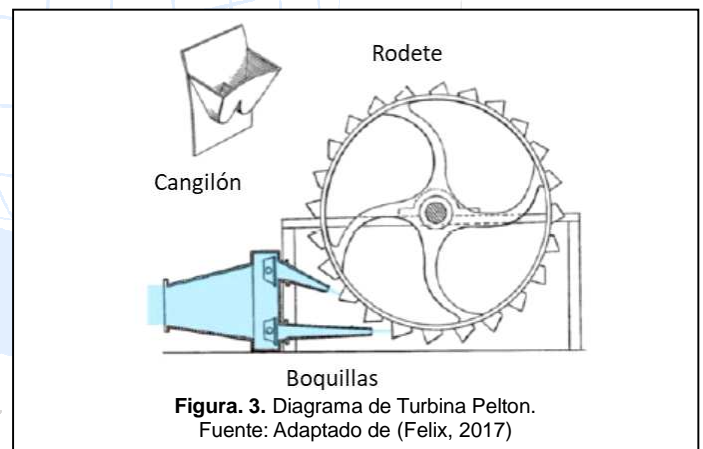
Este tipo de desgaste ocasionado por la dinámica entre el sedimento y el material del elemento afectado, tiene como factores principales, características como tamaño, concentración, dureza y forma del sedimento entre otras: adicionalmente, la velocidad y aceleración de los fluidos, su temperatura, turbulencia entre otras características; finalmente, con respecto al material base se tienen aspectos como la dureza, la morfología superficial y las propiedades elásticas entre otras (Neopane, 2010).

4. AQUINARIA INVOLUCRADA EN EL PROCESO DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Turbinas Hidráulicas

Este tipo de máquinas se dividen en dos grupos principales, con base en el principio de conversión de energía: Impulso y Reacción. Entre las de impulso o acción se encuentran las Pelton y Turgo las cuales giran en el mismo sentido de la proyección del chorro de agua y no tienen diferencias de presión entre la entrada y la salida del líquido. Por otro lado, entre las de reacción se encuentran las turbinas Francis, Kaplan y Bulb cuyo sentido de giro no coincide con la proyección de chorro de agua y tienen mayor presión al ingreso que a la salida del agua. Otro tipo de turbinas son las de flujo cruzado.

Según Felix (2017) los rodetes de las turbinas Pelton, que están compuestos de un divisor, una punta de cangilón y la superficie del mismo (Figura 3) se fabrican actualmente en acero inoxidable martensítico, con aleación de 13% de cromo y 4% de níquel. Las agujas de las boquillas o los cangilones (cubos) de la misma son fabricados con acero de diferentes grados como aleaciones de acero y cobalto, buscando que estos elementos tengan una mayor resistencia a la erosión (Felix, 2017).



Sistemas de admisión o entrada

En el caso de las turbinas Pelton, está compuesto de colector y válvula. Adicionalmente, se cuenta con un sistema de boquilla, el cual consta de un anillo de boquilla y una aguja. Para el caso de las turbinas Francis, consta de colector, válvulas y sistema de derivación.

Válvulas

Son elementos de obturación, utilizados para abrir y cerrar el paso del agua a través de los conductos forzados hacia la cámara de la turbina. Entre ellos se encuentran (Instituto Argentino de la Energía, 2003):

Válvula compuerta, cuyo desplazamiento es vertical y es usada en canales abiertos; este tipo de válvula se usa principalmente en el vaciado del fondo de los embalses, por cuanto su mecanismo de operación no es apto para regular el paso del agua.

Válvula mariposa, que es usada solo para permitir o no el paso de masas de agua, en conducciones de gran diámetro y son ubicadas como el tipo de válvula anterior en los desagües de fondo y en este caso, también en las tuberías forzadas, antes del arribo del agua a la turbina.

Válvula esférica, la cual se utiliza como órgano de seccionamiento y de seguridad, para dar paso o bloquear el paso de masas de agua. Teniendo en cuenta que se han eliminado las vibraciones, este tipo de válvula es utilizado también para regular el paso del agua.

Las turbinas Francis, por su parte tienen en su sistema de entrada un colector, válvulas, un sistema de derivación, carcasa en espiral y paletas (Neopane, 2010).

4. EFECTOS DE LOS SEDIMENTOS EN LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Uno de los desafíos que enfrentan las plantas de generación hidroeléctrica es la erosión debida a los sedimentos (Eltvik, 2013). El tipo de sedimentos que pueden llegar a ingresar a través de los canales de estas centrales, pueden contener minerales duros como el cuarzo, o feldespato, tienen el potencial de generar daños en los diferentes componentes de las máquinas hidráulicas vinculadas en el proceso de generación. Al entrar estos minerales en contacto con los diferentes elementos mecánicos que integran el proceso de generación de energía, se crean efectos como la disminución del tiempo de operación de la turbina debido a la remoción de material generado por los sedimentos.

Según Eltvik, M. (2013), las centrales de generación hidroeléctrica que están ubicadas cerca de áreas que contienen gran concentración de sedimentos, pueden estar sometidas a condiciones difíciles de trabajo, debido a que los componentes de las turbinas, por ejemplo, presentarían desgastes que impliquen su cambio o mantenimiento en periodos de tres meses. Cada intervención en mantenimiento o parada de turbina genera dificultades en términos del costo que implica tanto la sustitución y ajuste de la pieza, como la disminución de energía generada por esa máquina durante su detención.

En plantas de generación hidroeléctrica, muchos componentes se encuentran en contacto con partículas sólidas que al impactar a velocidades significativas contra una superficie, pueden causar pérdida de material. Dependiendo de características como: cantidad, tamaño y tipo de partículas sólidas, y de las propiedades de la superficie contra las que impacta, este fenómeno puede ocasionar mayor o menor magnitud de daño (Santa, et al., 2007).

De acuerdo con Santa et al. (2007) este tipo de efectos se hacen más frecuentes durante las épocas de lluvia, por cuanto hay un incremento de partículas sólidas en los cuerpos de agua, que ingresan a los sistemas e impactan las superficies.

5.1 Efecto en las Turbinas *Pelton*

En el caso de este tipo de turbina, de acuerdo con Neopane (2010), se requiere el análisis de los efectos en 3 de los elementos: el sistema de entrada, el sistema de boquillas y el rodete.

Con respecto al sistema de entrada, se tienen bajas velocidades de operación, por lo tanto, no es de esperar un alto impacto ocasionado por los sedimentos en las piezas que la componen (colector y válvula). Por otro lado, en el caso de las boquillas se presentan altas velocidades, presión y una geometría entre la aguja y la boquilla que genera turbulencias, ocasionando que las partículas que vienen en el fluido golpeen la superficie de la aguja, la cual puede presentar erosión en corto tiempo (ver Figura 4 a.); otro punto crítico en el cual se presenta desgaste es la punta de la boquilla (Neopane, 2010).

Neopane (2010) indica que en todas las partes que integran el

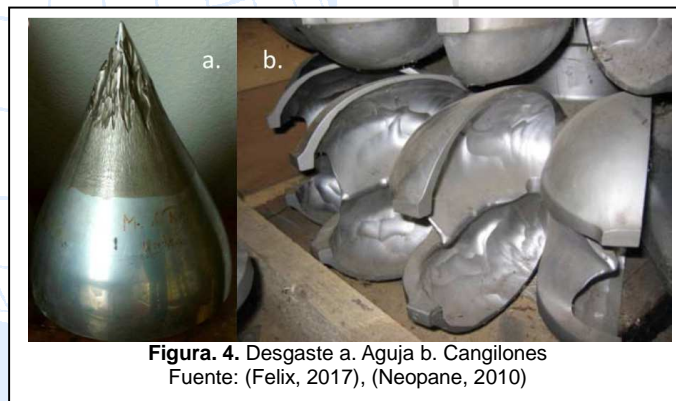


Figura 4. Desgaste a. Aguja b. Cangilones
Fuente: (Felix, 2017), (Neopane, 2010)

rodete podría llegar a encontrarse efectos ocasionados por la inclusión de sedimentos en los fluidos. Sin embargo, hay diferencia entre los sedimentos finos y los gruesos. Los primeros, debido al tipo de movimiento que generan pueden entrar al cangilón en la dirección del fluido y golpear la superficie del mismo en su proceso de salida, ocasionando daños en este elemento. En el caso de los sedimentos gruesos, ocasionan daño principalmente en la superficie del cangilón (ver Figura 4 b.), ocasionada por el golpeteo de las partículas al ingreso, en los lugares donde el chorro golpea directamente al cangilón (Neopane, 2010).

Otros lugares que pueden presentar desgaste erosivo son: el deflector de chorro, los escudos de boquillas (en los casos en que exista más de una), el interior de la carcasa del rodete y en las rejillas debajo del rodete, ocasionando en todos los casos mencionados posibles pérdidas de material, lo cual conduce a riesgos en la estabilidad mecánica y la integridad de cada una de las piezas, así como cambio de perfiles hidráulicos, que pueden poner en riesgo la seguridad de los equipos y la generación de energía (Felix, 2017).

5.2 Efecto en las Turbinas *Francis*

Etvik (2013) indicó que los patrones de erosión que pueden identificarse en las turbinas Francis, pueden ser ocasionados por fenómenos como la erosión de turbulencia, ocasionada por las velocidades de rotación de las partículas a altas velocidades en el interior del equipo. Erosión por aceleración, que ocasionan divergencia de las partículas con respecto al flujo del agua y por lo tanto, colisiones con partes de las máquinas generando desgastes y finalmente, erosión de vórtice de flujo secundario, ocasionado por la combinación de turbulencia y aceleración que pueden inducir vórtices en puntos críticos del material.

Según Neopane (2010) la válvula de entrada de las turbinas Francis enfrentará un 50% menos de presión con respecto a la Pelton, razón por la cual tiene una mejor resistencia a la erosión. Sin embargo, las turbinas Francis presentan retos de diseño en los sellos de válvula de derivación, por cuanto por su tamaño pueden enfrentar menor presión y por lo tanto, mayores daños debido al efecto de los sedimentos en el fluido en esa parte del equipo.

Por otro lado, el sistema de álabes guía puede ser muy afectado por desgastes erosivos, relacionados con la alta velocidad de la arena de grano fino en la región de salida, también se puede presentar entre la aleta guía y las placas de revestimiento, por la presencia de partículas de tamaño fino y mediano; entre la holgura de la aleta guía y la placa frontal puede presentarse erosión, debido a los vórtices ocasionados por las turbulencias del fluido; otra parte que puede ser afectada en este sistema es la superficie de la paleta guía, que puede ser afectada por la separación de partículas grandes de las líneas de corriente del flujo (Neopane, 2010).

En el caso del rodete, en este tipo de turbina es más susceptible de presentar erosión en los puntos de salida del agua, que en los de entrada, aunque en este último pueden causarse efectos de erosión local debido a sedimentos como arena de grano fino. A la salida del rodete la erosión, que es generada por turbulencia ocurre por sedimentos como arena fina que se mueven hacia el diámetro exterior de salida del rodete y se presenta habitualmente en el borde posterior de la cuchilla (Neopane, 2010).

5. ESTADO DEL ARTE LOCAL

En Colombia se han comenzado a desarrollar diferentes proyectos con el objeto de iniciar procesos de prevención y control ante los efectos que los sedimentos pueden generar en las máquinas hidráulicas. Algunos ejemplos se pueden encontrar a continuación:

Desarrollo de Modelo de Desgaste Hidro-Abrasivo para Selección de Materiales y Procesos que Disminuyan el Desgaste en Piezas de Turbinas Pelton en Hidroeléctricas Colombianas por el GRUPO DE INVESTIGACION E INNOVACIÓN EN ENERGÍA AES CHIVOR y el Grupo de Materiales y Manufactura CIPP – CIPEM de la Universidad de los Andes (COLCIENCIAS, 2016), del cual se derivaron temas de desarrollo como: Modelo hidro-abrasivo de las válvulas de inyección en turbinas Pelton para la selección de materiales y procesos que controlen la erosión por sedimentos en las plantas hidroeléctricas colombianas. Simulación computacional del transporte de sedimentos y el desgaste abrasivo de superficies. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes. AES Chivor y Colciencias. Bogotá, Colombia, 2014-2015 (Porrás, 2015).

Metodología para el Análisis de Integridad Estructural de Rodetes Pelton en la Central de San Carlos / ISAGEN (Vargas, y otros, 2007).

6. CONCLUSIÓN

Aunque no es un fenómeno nuevo, el efecto de la sedimentación de los embalses ocasionará en el futuro un impacto en las máquinas hidráulicas que se usan en generación de energía, que tiene implicaciones de seguridad para quienes trabajan en la operación de estas plantas, en la integridad de los equipos y en la estabilidad del servicio, razón por la cual se convierte en un tema relevante para el desarrollo de investigaciones que permitan hacerle frente de tal forma que se incremente la confiabilidad.

Por esta razón, la identificación de trabajos recientes en estos temas alrededor del mundo, así como en Colombia, genera la necesidad de desarrollar soluciones tanto en el diseño de partes y equipos, que incluya una adecuada selección de material y sus tratamientos, de tal forma que sea factible disminuir el efecto de los fenómenos físicos del desgaste, particularmente el erosivo en este tipo de maquinaria.

BIBLIOGRAFÍA

- Annandale, G. W., Dinar, A., Palmieri, A., Shah, F., Johndrow, T., & Kawashima, S. (2003). Reservoir Conservation Vol.1. Washington (U.S.A.): The World Bank.
- COLCIENCIAS. (2016). Sitio Web Gruplac - Red Scienti - Colciencias. Recuperado el 2016, de <http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000016797>
- Eltvik, M. (2013). Sediment Erosion In Francis Turbine. Trondheim, Noruega: Norwegian University of Science and Technology.
- Felix, D. (2017). Experimental investigation on suspended sediment, hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines. Zürich: ETH Zürich. Obtenido de <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2010-2019/238.pdf>
- Fernández, I., & Robles, A. (2015). Enseñanzas técnicas, centrales de generación de energía eléctrica. Recuperado el Octubre de 2016, de <http://ocw.unican.es/ensenanzas-tecnicas/centrales-de-generacion-de-energia-electrica/materiales/bloque-energia-III.pdf>
- Instituto Argentino de la Energía. (2003). Archivos Instituto Argentino de la Energía. Obtenido de Sitio Web Instituto Argentino de la Energía: www.iae.org.ar/archivos/educ6.pdf
- Neopane, H. P. (2010). Sediment Erosion in Hydro Turbines. Trondheim (Norway): Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Porras, O. (2015). Proyectos. Recuperado el 2016, de <http://www.orlandoporras.org/proyectos.html>
- Sánchez, C. M., & Fuquen, H. S. (2013). SEDIMENTOS: UNO DE LOS RETOS DE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA. DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN EMPRESARIAL, 1(2), 6-8.
- Santa, J. F., Baena, J. C., & Toro, A. (2007). Slurry erosion of thermal spray coatings and stainless steels for hydraulic machinery. *Wear*, 263, 258-264.
- UPME. (2015). Plan de expansión de referencia generación-transmisión 2015-2029. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá D.C.: Unidad de Planeación Minero Energética. Obtenido de http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2016/Plan_Expansion_GT_2015-2029/Plan_GT_2015-2029_VF_22-12-2015.pdf
- Vargas, M., Silveira, T., Leal, J., Freire, J., Tupiassú, J., Garzón, A., . . . Reyes, A. (2007). Metodología para el Análisis de Integridad Estructural de Rodetes Pelton en la Central de San Carlos / ISAGEN (Colombia). Medellín: CIER.