

Desgastes usuales en turbinas hidráulicas, para pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's)

Ing. Axel Söderberg

Ing. Nils Söderberg

El punto de partida de nuestra exposición es que *el desgaste* en las diferentes piezas de las turbinas hidráulicas depende fundamentalmente de 5 factores: 1) del contenido y del tipo de sólidos abrasivos del agua con que trabajan, 2) de la cavitación, producida por la disminución de la presión del agua en las piezas en que la velocidad alcanza valores máximos y/o presiones mínimas; 3) del material con que están fabricadas las diferentes piezas, el cual debería poseer las características antidesgaste adecuadas para las condiciones en que trabajan; 4) del diseño adecuado de las obras y de una buena selección de los equipos y sus materiales; y 5) del mantenimiento de los sistemas, especialmente de lubricación y de enfriamiento.

Factor de desgaste 1): Contenido y tipo de sólidos abrasivos del agua

Con relación a la primera condición, hay que tener en cuenta que las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's) se caracterizan por no disponer de embalses para acumulación de grandes cantidades de agua; y aquellas que disponen de capacidad de acumulación, generalmente acumulan agua únicamente para producir a máxima capacidad durante las horas de la franja horaria correspondiente a PUNTA. De ahí que cuando llueve, estas centrales decantan únicamente los sólidos de mayor tamaño que arrastran los ríos, debiendo turbinar agua con un porcentaje considerable de sólidos. Es por ello que el diseño de la Obra de Toma y de otras obras de una PCH es muy importante para *disminuir la cantidad de sólidos que serán arrastrados en la canalización que conduce el agua a los equipos y a las turbinas* de la Casa de Máquinas. Con buenos diseños de estas obras y seleccionando adecuadamente los equipos y sus materiales, se logra disminuir notablemente el desgaste en las distintas piezas de las turbinas y con ello, disminuir los costos de producción.

Lo dicho anteriormente se puede constatar observando la siguiente serie de fotografías que muestran el pequeño embalse en el dique del río Sensunapán, de la PCH Nahuizalco. Una de las fotografías de la serie muestra el volumen de sólidos sedimentados en el embalse, cuando se baja el nivel del agua abriendo la compuerta de fondo del dique. La última fotografía de la serie muestra el desarenador que está a continuación de la Obra de Toma en el dique. Este desarenador está diseñado para decantar por gravedad, sólidos de 0.25 mm de diámetro. De igual manera, el material decantado debe de desalojarse periódicamente, especialmente durante la estación lluviosa.

Existe la creencia de que el material decantado tiene un valor importante como abono orgánico; sin embargo, estudios realizados por la sociedad SENSUNAPAN S.A. de C.V. demuestran que los nutrientes que arrastra la lluvia de los terrenos que forman la cuenca del río, no se decantan sino que quedan incorporados al agua en forma de emulsión. Es decir que esos nutrientes son arrastrados por el río y pueden ser aprovechados aguas abajo por las plantaciones que son regadas con dichas aguas en las planicies cercanas la costa.



Pequeño embalse de la PCH Nahuizalco en el dique del río Sensunapán



Obra de Toma en el dique anterior en que se observa la emulsión mencionada



Embalse del dique, habiéndose abierto la compuerta de fondo para desalojar el material decantado

Los materiales que se decantan en los pequeños embalses de las PCH's hay que desalojarlos para recuperar la capacidad de decantación de los sólidos de mayor tamaño y evitar lo más posible la presencia de sólidos abrasivos. Como se ha mencionado anteriormente, durante la época lluviosa en El Salvador, el agua derivada en los diques todavía contiene sólidos en suspensión, por lo que es aconsejable utilizar desarenadores antes de conducir el agua por canales, para continuar decantando los sólidos de mayor tamaño (0.25 mm). Las labores de desalojo de los lodos acumulados se realizan aproximadamente cada mes durante la época lluviosa y dos veces durante la época seca.



En la época lluviosa, a pesar de la decantación de sólidos en el embalse del dique y en el desarenador, el agua aún contiene sólidos abrasivos que provocan desgaste en las conducciones, estructuras, válvulas y en las diferentes piezas de las turbinas.

En Sensunapán estamos evaluando un dispositivo colocado al final de la tubería de presión, que consiste en una prolongación de la misma, al final de la cual se ha colocado una válvula que se mantiene abierta para desalojar una parte de los sólidos que se depositan y se desplazan por el fondo de la tubería. Con este dispositivo se pretende disminuir los sólidos que llegan al rodete de la tercera turbina, al final de la tubería de presión.



En la PCH Nahuizalco I, a pesar de utilizar para decantar sólidos, los siguiente elementos: el Embalse del dique, un Desarenador por cada río incorporado a la conducción, la Cámara de Carga y una Válvula abierta al final de la Tubería Forzada, es necesario revisar los equipos periódicamente para reparar los desgastes producidos en la estación lluviosa y mantener una buena eficiencia en la utilización del recurso hidráulico.

En las PCH's se debe inspeccionar periódicamente la tubería forzada, y las siguientes piezas, en aquellas que tienen instaladas turbinas Francis: Válvula de admisión, chumaceras, baleros, eje de la turbina, acoplamiento flexible, álabes móviles, manguitos para los ejes o muñones de los álabes móviles, tapaderas y sus anillos de desgaste, estopero, rodete y tubo de aspiración.

Las fotografías que siguen corresponden a una de las 3 turbinas Francis de la PCH Nahuizalco I, propiedad de Sensunapán S.A. de C.V.



De las 2 fotografías anteriores vale la pena observar que el eje del generador es independiente del eje de la turbina; y que ambos están unidos por medio de un acoplamiento flexible.

Tal vez los acoplamientos flexibles son las partes peor tratadas de cualquier maquinaria. A través de una apropiada selección del acoplamiento y de un buen procedimiento de alineación pueden evitarse altos costos de mantenimiento por **los desgastes** en sus piezas y evitando además pérdidas en la producción.

La fotografía que sigue muestra un acoplamiento flexible compuesto de 2 flanges de acero, cada uno con agujeros equidistantes a un radio determinado, de dimensión adecuada para alojar intercalados anillos de material con cierta elasticidad (Nylon) y con agujero al centro donde pasan los pernos de apriete de ambos flanges.



Una de las 2 mitades de un acoplamiento flexible

La ventaja de este tipo de acoplamiento para Unidades Turbina Hidráulica-Generador es el relativo poco mantenimiento que requieren.

Para unir el eje de la turbina con el eje del generador en unidades Turbina-Generador con ejes independientes, también se puede utilizar un *acoplamiento flexible de engranes* como el que se muestra en la siguiente fotografía. A simple vista, pareciera que el acoplamiento es rígido; sin embargo, en cada eje se monta un manguito que tiene un anillo dentado, dejando una pequeña separación entre ejes. El manguito montado en el eje motriz de la turbina, transmite par a su medio acople, provisto con dientes fresados interiormente; este transmite al otro medio cople y por medio del manguito montado en el eje del generador, se transmite el par para generar potencia eléctrica.



Unidad Turbina Hidráulica-Generador de la PCH La Calera, propiedad de la Sociedad “De Matheu y Cía S.A. de C.V.”

En la siguiente ilustración se muestran cortes de un acoplamiento flexible de engranes como el descrito anteriormente.



Cada medio acople dispone de una grasera para inyección de una grasa apropiada; sin embargo los dientes de los manguitos y los engranes internos de los medios acoples sufren desgastes, con la desventaja de que estos desgastes no son visibles fácilmente. **Los desgastes en los dientes en los manguitos y en la parte interior de los flanges** se deben reparar periódicamente.

La ventaja principal de utilizar ejes separados en las unidades Turbina Hidráulica-Generador es la facilidad para dar mantenimiento a los desgastes en el eje de la turbina.

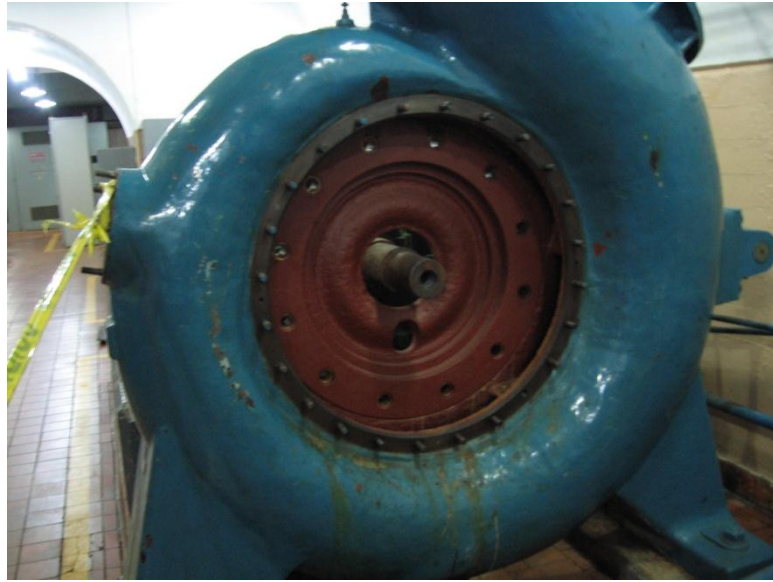
Algunos fabricantes ofrecen unidades Turbina Hidráulica-Generador que no requieren del acoplamiento de ejes, porque el rodete se monta en cantiliver en el eje del generador, aprovechando los soportes del mismo, como se muestra en las siguientes fotografías:



El problema con esta disposición es el mantenimiento del eje en la zona que atraviesa la tapadera de la turbina, en la cual va montado un prensa estopas o un mecanismo equivalente para impedir la salida de agua por el eje.

Independiente de que se use un prensa estopas o un mecanismo equivalente, el eje sufrirá desgaste por abrasión o por oxidación, requiriendo de reparaciones en la punta en cantiliver, la cual se complica por compartir con el generador un eje común.

La tapadera posterior de la turbina que no es atravesada por el eje, contiene los manguitos para el soporte de los álabes móviles y un flange para acoplar la descarga del agua de la turbina o tubo de aspiración, como se muestra en la siguiente fotografía. Antes de montar la tapadera se monta el rodete al eje.



Esta disposición la proponen los fabricantes con cierta frecuencia; pero hay que pensarlo muy bien antes de adoptarla, **porque los problemas de desgaste** conllevan dificultades especiales para su reparación.

En la fotografía que sigue se muestra un eje nuevo de otra unidad Turbina Hidráulica-Generador, para montar también en cantiliver, el rodete de la turbina.



Factor de desgaste 2): cavitación, producida por la disminución de la presión del agua en las piezas en que la velocidad alcanza valores máximos y/o presiones mínimas.

Con el objetivo de reducir el peso (o simple y llanamente, el costo), se tiende a construir turbinas lo más pequeñas posibles. Si queremos seguir desarrollando, con todo, la misma potencia, se impone un aumento en la velocidad de rotación... que puede redundar –por ejemplo- en el desencadenamiento de un problema de cavitación. La cavitación es la formación y actividad de burbujas (cavidades) en líquidos. La formación, precisamente, de estas cavidades tiene lugar cuando la presión de un líquido baja por debajo de la tensión de vapor (P_v). Es bien sabido que si la presión de un líquido disminuye lo suficiente, comenzará a evaporarse; esto es: una parte del mismo sufrirá una transformación de fase, pasando del estado líquido al gaseoso. La presión a la que este fenómeno tiene lugar es la denominada presión o tensión de vapor de saturación (P_v), valor que depende fuertemente de la temperatura del fluido, incrementándose rápidamente con el aumento de la temperatura.

El efecto que se produce por la presencia de la cavitación de burbujas que es sin duda, la más importante y depende del coeficiente sigma, acostumbra a aparecer en la salida de los álabes, hacia la salida del rodete y se ve influenciada por el punto de funcionamiento de la máquina. (La potencia desarrollada).

La adecuada selección de los equipos en cuanto a velocidad del agua en los mismos, la adecuada selección de la velocidad específica de la turbina y la altura del rodete con relación a la superficie del agua en la descarga, son determinantes en los desgastes sufridos por cavitación, la cual se presenta fundamentalmente en las turbinas Francis, en diferentes zonas del rodete y en el codo que conecta la turbina con el tubo de aspiración. Suele presentarse también en turbinas hélice y Kaplan.

A continuación se muestra los efectos de la cavitación en un rodete de bronce y en el codo de descarga de la planta Hidroeléctrica La Calera, propiedad de la sociedad “De Matheu y Cía S.A. de C.V.”, después de cinco años de trabajo.





Esta fotografía muestra el codo de descarga de una turbina de la planta hidroeléctrica la Calera.



La fotografía a continuación muestra desgastes principalmente por cavitación, por abrasión y por oxidación en el codo de descarga.



Hay que hacer notar que el agua con la que trabaja la planta La Calera es ideal, ya que es agua recién nacida y nunca se mezcla con agua llovida. Por lo tanto, los desgastes por abrasión son mínimos.

Factor de desgaste 3): material con que están fabricadas las diferentes piezas, el cual debe poseer las características de resistencia mecánica y antidesgaste adecuadas para las condiciones en que trabajan.

Los distintos materiales que se requieren **en las PCH's**, tanto en la conducción, como en los distintos equipos, así como en las piezas de las turbinas hidráulicas, están sujetos a desgaste. Generalmente se usan piezas de hierro fundido, distintos tipos de bronces, de acero de varios tipos; y últimamente, de resinas y cerámica.

El hierro fundido ha sido tradicionalmente usado en los cuerpos de las válvulas, y en las carcasas de turbinas de pequeño tamaño y en codos de descarga. Se requieren electrodos especiales para depositar con soldadura eléctrica, material en las zonas de desgaste.

El bronce con composiciones adecuadas, ha sido utilizado ampliamente en los bujes para alojar los eje y los muñones de los álabes móviles, en rodetes y en otras piezas menores. Igualmente, se requieren electrodos especiales para depositar por soldadura eléctrica y autógena, material en las zonas de desgaste.

Los rodets de las turbinas suelen fabricarse en muchos casos, de acero inoxidable, que son aleaciones a base de hierro, carbono, cromo, níquel, molibdeno entre otros elementos, que le confieren al material una excelente resistencia a la corrosión. En general, según la composición química de la aleación existen cuatro tipos principales de aceros inoxidables: ferríticos, martensíticos, austeníticos y duplex. Estas aleaciones han sido fuente de estudio desde la primera guerra mundial, ya que, brindan una variedad de propiedades mecánicas para diversas aplicaciones.

Dentro de la gama de los aceros inoxidables, destacan los martensíticos con un 13% de Cromo, a los cuales se realizó posteriormente una adición de 4% de Níquel para mejorar su resistencia a la cavitación y al impacto, con lo cual se obtuvieron ventajas adicionales como:

- Mejor Resistencia a la corrosión
- Mayor grado de dureza
- Mayor resistencia a la fractura
- Mayor soldabilidad

Dentro de los aceros inoxidables martensíticos con bajo porcentaje de carbono tipo 13Cr-4Ni, se encuentra la aleación ASTM A743 grado CA6NM, la cual se desarrolló en la década de los 60 en Suiza y posteriormente se comenzó a utilizar en América alrededor de los años 70. Esta aleación se emplea desde hace algunos años en aplicaciones como fabricación de componentes de bombas, turbinas hidráulicas, propulsores, entre otros, por su excelente combinación de resistencias al impacto, a la corrosión, a la fractura y a la cavitación, mayor grado de dureza, soldabilidad y tenacidad, lo cual ha permitido su uso en estas aplicaciones. Este acero tiene porcentajes de Carbón menores a 0.06%, Manganeso menos que 1.00%, Silicio menos que 1.00%, Cromo entre 11.5% y 14.0%, Níquel entre 3,5% y 4.00%, Molibdeno entre 0.4% y 1%, Fósforo menos que 0.03%, y Azufre menos que 0.025%.

Las soldaduras de aceros inoxidables martensíticos son sumamente importantes para la industria generadora de energía, especialmente para elementos tales como turbinas Pelton, Kaplan, Hélice y Francis fabricadas en acero inoxidable ASTM A743 grado CA6NM. *Hay procesos especiales de soldadura* que permiten buenas características mecánicas y de resistencia al desgaste por cavitación. Se utiliza soldadura tanto para fabricación como para la reparación de rodets.

Los ejes de las turbinas suelen fabricarse con acero BS970 Gr 708M40 con porcentajes de Carbón menores a 0.44%, Manganeso menos que 1.00%, Silicio menos que 0.35%, Cromo entre 0.9% y 1.2%, Molibdeno entre 0.15% y 0.25%, Fósforo menos que 0.035%, y Azufre menos que 0.04%.

Hasta acá hemos expuesto que la calidad del agua con que trabajan las PCH's en El Salvador implica desgastes por erosión de sus componentes y equipos; que la cavitación siempre estará presente como factor de desgaste en las turbinas; y que tanto los desgastes por erosión, por oxidación y por cavitación se pueden reducir considerablemente utilizando los materiales adecuados. También hemos mencionado que el material desgastado se puede reponer utilizando materiales y procesos adecuados para depositarlos y así prolongar la vida útil de las diferentes piezas. Queremos enfatizar que las inversiones que hay que efectuar en la

construcción de una PCH se recuperan en tiempos prolongados, por lo cual se debe tener muy controlados los desgastes.

Factor de desgaste 4): diseño adecuado de las obras y una buena selección de los equipos.

Un buen diseño de las obras involucradas en una PCH implica entre otros factores: 1) obras civiles que permitan eliminar al máximo los materiales sólidos contenidos en el agua que pasa por las instalaciones; 2) montar la maquinaria en la Casa de Máquinas a un nivel respecto al nivel del agua del río en el sitio de la descarga, que mantenga bajo el nivel de cavitación en las turbinas; 3) Seleccionar adecuadamente la velocidad específica de las turbinas y especificar adecuadamente los materiales con que serán construidas. Evaluar si es aceptable por el problema de la reparación de los desgastes, aceptar unidades Turbina Hidráulica-Generador con el rodete montado en cantiliver en el eje del generador.

Factor de desgaste 5): mantenimiento de los sistemas, especialmente de lubricación y de enfriamiento.

Los sistemas antes mencionados son básicos en mantener adecuadas condiciones de funcionamiento de muchas piezas importantes de una PCH. Fallas tanto en el sistema de lubricación como en el sistema de enfriamiento del aceite de lubricación pueden desgastar distintas piezas hasta el punto que no sea posible repararlas y que requieran reemplazo. Tal es el caso de los baleros y las chumaceras de las turbinas.

Conclusión:

Es muy importante antes de construir una PCH, verificar que se han tenido muy en cuenta en su diseño y en la selección de los equipos, los cinco factores de desgaste aquí mencionados. Una vez construida, lo que queda es batallar para que los desgastes sean reparados oportunamente para lograr operar eficientemente el recurso hidráulico.

A continuación iremos observando **desgastes** comunes que se dan en los equipos y distintas piezas de las turbinas para PCH's. *Las fotografías que siguen muestran desgastes en turbinas de la PCH Nahuizalco después de un año de trabajo.*



Desgaste del eje de una turbina, antes de modificaciones hechas al sello mecánico



Desgaste en un álabe móvil



Desgaste en el muñón de un álabe móvil



Desgaste en el buje o manguito para soporte de un álabe móvil



Desgastes en una tapadera de la turbina, la cual ha sido ya revestida con lámina Hardox antidesgaste.



Desgastes en los manguitos y anillos de una tapadera



Desgaste en rodete de acero inoxidable



Desgaste en rodete de acero inoxidable

La fotografías que siguen corresponde a desgastes en el rodete de bronce una turbina Francis de la PCH La Calera de la sociedad De Matheu y Cía S.A. de C.V.



Desgastes producidos en cinco años sin reparar, en rodete operando desde 1980 con agua en condiciones ideales



Desgaste en chumacera de babbit de turbina Pelton



Rodetes de turbinas Pelton desmontados para inspeccionar desgastes



Canjilones que muestran desgaste normal por abrasión



Inspección de rodete Pelton con líquido penetrante

MUCHAS GRACIAS POR HABERNOS PERMITIDO COMPARTIR NUESTRAS EXPERIENCIAS