

Quality control and assurance plan for the recovery of a Francis turbine runner from a hydroelectric power plant

Plan de control y aseguramiento de la calidad para la recuperación de un rodete de turbina Francis de una central hidroeléctrica

M. Toapanta¹

¹Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, Unidad de Negocio Hidroagoyán, Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales, CIRT, Baños de Agua Santa, Ecuador
E-mail: marcelo.toapanta@celec.gob.ec

Abstract

The purpose of this paper is to establish the procedure for the inspection and execution of tests to control and assurance of quality, during the recovery process of the Francis runners, which are elements used as a fundamental part in hydraulic turbines for the generation of electric power. The recovery is based on executing the dimensional control over runner geometry, the material characterization, the metallographic analysis and non-destructive tests (NDT) on welds based on the guidelines of the specification for hydraulic machines CCH 70-4; to determine the zones of wear affected by phenomena such as: cavitation, corrosion and erosion; as well as areas damaged by failure mechanisms as a result of efforts to design, loads and operating factors of the machines. In addition, this creates a reference in terms of technical and technological capabilities in the country, which is projected at the regional level to provide services and specialized engineering solutions, achieving to break the dependence of big foreign companies, creating an added value with the transfer of knowledge; obtaining in this way a substantial saving in costs and time in the process of runner's recovery.

Index terms— Hydraulic turbines, Francis runner, ITP Inspection and testing plan, Non-destructive tests NDT, Failure analysis, Metallography, Characterization of materials.

Resumen

El propósito del presente trabajo es establecer el procedimiento para el plan de inspección y ejecución de pruebas, para el control y el aseguramiento de la calidad, durante el proceso de recuperación de los rodetes de las turbinas Francis, que son elementos empleados como parte fundamental en las turbinas hidráulicas para la generación de energía eléctrica. El procedimiento de recuperación se basa en ejecutar el control dimensional sobre la geometría del rodete, la caracterización del material, el análisis metalográfico y los ensayos no destructivos END sobre los cordones de soldadura en base a las directrices de la especificación para máquinas hidráulicas CCH 70-4; para determinar las zonas de desgaste, afectadas por los fenómenos de cavitación, corrosión y erosión; así como las áreas dañadas por los mecanismos de falla como consecuencia de esfuerzos inherentes a factores de diseño, cargas y funcionamiento de las máquinas. Además, con esto se crea una referencia en cuanto a las capacidades técnicas y tecnológicas en el país, que se proyecta a nivel de la región para brindar servicios y soluciones de ingeniería especializados, logrando romper la dependencia de las grandes empresas extranjeras, creando un valor agregado con la transferencia del conocimiento; obteniendo de esta manera un ahorro sustancial en costos y tiempo en el proceso de recuperación de un rodete.

Palabras clave— Turbinas hidráulicas, rodete Francis, Plan de inspección y pruebas ITP, Ensayos no destructivos END, Análisis de fallas, Metalografía, Caracterización de materiales.

Recibido: 30-09-2018, Aprobado tras revisión: 16-01-2019

Forma sugerida de citación: Toapanta, M. (2019). "Plan de control y aseguramiento de la calidad para la recuperación de un rodete de turbina Francis de una central hidroeléctrica". Revista Técnica "energía". No. 15, Issue II, Pp. 57-65.

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2019 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

1. INTRODUCCIÓN

La Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, creó el Centro de Investigación y Recuperación de Turbina Hidráulicas y Partes Industriales CIRT, con la finalidad de brindar servicios especializados de ingeniería a la creciente demanda del sector eléctrico del país, a las actuales y futuras centrales de generación eléctrica, en base a las políticas gubernamentales que fomentan la soberanía, la eficiencia y el cambio de la matriz energética, al desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas.

La creciente industria energética, en especial las hidroeléctricas, hace prever que a mediano plazo, los componentes de las turbinas hidráulicas deberán ser sometidos a una reparación o recuperación de los componentes desgastados o en cuya integridad existan daños provocados por los mecanismos de fatiga o por cumplir su ciclo de vida útil.

En la transición hacia el desarrollo, el CIRT se encuentra ahondando esfuerzos para poder solventar la problemática provocada por el desgaste de los componentes, que es una condición inherente desde que entran en funcionamiento, sumados el apareamiento de ciertos fenómenos como la cavitación, las picaduras “pitting”, la corrosión, la erosión, entre otros, que pueden llevar a una disminución del ciclo de los componentes y que comprometen la integridad del componente y de la máquina por el apareamiento de defectos como las fisuras que son provocadas principalmente por la fatiga del material.

Las nuevas tecnologías en la construcción de rodetes combinan la fundición de partes con componentes fabricados que posteriormente son soldados entre sí. Además, ciertas áreas de los rodetes son recubiertos con materiales cerámicos como el carburo de tungsteno para proporcionarles una mayor resistencia al desgaste. Entre los materiales utilizados para el diseño y fabricación de rodetes, álabes directrices y más componentes de las turbinas se tiene el ASTM A743 gr. CA6NM [1], que es un acero inoxidable martensítico 13-4, que proporciona una buena soldabilidad, una buena resistencia a la cavitación y una resistencia mecánica alta.

Al utilizar un material de aporte martensítico para soldar sobre este material, se requiere una elevada temperatura de precalentamiento y un tratamiento térmico post-soldadura para evitar el agrietamiento debido a la generación de tensiones. Para realizar reparaciones en campo con material de soldadura austenítica son factibles, con un mínimo de precalentamiento y sin tratamiento térmico post-soldadura; sin embargo, el material depositado no tiene la misma resistencia mecánica que el CA6NM [2].

Para determinar la fiabilidad y factibilidad de un proyecto de reparación o recuperación de un elemento, componente, parte o zona deteriorada, se basa en el

estricto cumplimiento de un plan de control y aseguramiento de la calidad.

El área de Control de Calidad y Laboratorios del CIRT, ha desarrollado procedimientos que intervienen en todas las etapas de los proyectos de recuperación; la etapa inicial comprende la inspección mediante END como: macroataque, inspección visual VT, líquidos penetrantes PT, partículas magnéticas MT, ultrasonido convencional y con arreglo de fases UTPA, con lo que se logra identificar e interpretar las indicaciones relevantes para ser evaluadas si cumplen con los criterios de aceptación de normas y/o especificaciones técnicas, lo que conlleva a una definición preliminar de factibilidad del proyecto; etapas intermedias en donde se realiza la caracterización del material, mediante la prueba de espectrometría para determinar la composición química del material y el porcentaje de sus aleantes, así como la medición de la dureza superficial y la preparación metalográfica in-situ sobre la superficie del componente para analizar la microestructura, que revelará tratamientos mecánicos y térmicos, en esta etapa también se hace un control del procedimiento de soldadura WPS (*Welding Procedure Specification*), desbaste y pulido grueso; y una etapa final donde se hace un control dimensional y geométrico mediante plantillas, una nueva inspección con END, para continuar con el tratamiento térmico post-soldadura para el alivio de tensiones residuales y finalmente realizar un control del acabado superficial (rugosidad).

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. La Cavitación

Entre los principales problemas encontrados en los rodetes de las turbinas de reacción de las hidroeléctricas operan fuera del punto de eficiencia se encuentra el desgaste por cavitación (burbujas de vapor), que es un fenómeno físico no deseado, que provoca vibraciones, disminución de la eficiencia y rendimiento, inestabilidad operativa, producción de ruido y daños a la superficie del material de los componentes de las turbinas, especialmente en el lado de succión de los álabes del rodete, después de pocos años de operación.



Figura 1: Daños provocados por cavitación – picaduras “pitting” – erosión, en la superficie de los laberintos de un rodete Francis.

La cavitación es la formación y posterior colapso repentino (implosión) de burbujas de vapor (cavidades) en el seno de un líquido. Este fenómeno ocurre cuando la presión estática local en un fluido alcanza la presión de vapor del líquido a la temperatura local. En la zona de alta velocidad de una turbina, la presión puede bajar a un valor muy bajo formando pequeñas burbujas de vapor, que luego colapsan generándose la cavitación que conduce a picaduras de erosión en la superficie, como se puede apreciar en la Fig. 1.

Existen estudios [3], [4], [5] que dan cuenta que existen cuatro tipos de cavitaciones que pueden ocurrir en los rodetes de las turbinas Francis como son: 1) la cavitación en el borde de ataque por la separación del flujo en el lado de succión o de presión debido al ángulo de incidencia del flujo entrante; 2) la cavitación debido al desplazamiento de las burbujas que se generan en el lado de succión del rodete e implosionan cerca del borde de salida en condiciones de sobrecarga; 3) la cavitación debido a la formación de un remolino en el tubo de aspiración que se produce justo debajo del cono del rodete en el centro del tubo de aspiración, que puede no afectar a los álabes pero que causan fluctuaciones de presión provocando ruido y vibraciones; y 4) la cavitación de vórtice entre álabes que ocurre en condiciones de carga parcial debido a la separación del flujo en el borde de ataque que puede llegar al centro de los álabes y causar la erosión.

Algunos modelos [6], métodos y experimentos han sido desarrollados por varios autores para predecir y estimar los diferentes tipos de cavitación en los rodetes de una turbina Francis; induciendo altas frecuencias de vibración y emisiones acústicas [7]; usando el análisis de señales ultrasónicas en lugar de pulsos de alta frecuencia y la aplicación de máquinas de aprendizaje para la detección de la cavitación [8]; instalando punto de acceso visual a escala completa en el tubo de aspiración para observar el fenómeno de cavitación [9]; la inyección de aire sobre los álabes del rodete trabajando a cargas parciales, lo que reduce efectivamente las vibraciones [10].

2.2. Análisis Numérico de los Efectos de la Cavitación sobre el Rodete la Turbina Francis.

Para los diseñadores de turbinas es crítico identificar las regiones en las que se producen la cavitación para lograr un diseño óptimo del rodete bajo condiciones cambiantes y personalizadas. Un diseño eficiente consiste en considerar múltiples escenarios, el uso de softwares especializados para simulaciones es una alternativa para abordar estas necesidades de analizar condiciones de carga, efectos de eficiencia y cavitación.

Una de las formas de analizar los daños superficiales que causa la cavitación es realizando la simulación numérica de un modelo utilizando un software de

análisis de dinámica de fluido CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para analizar los efectos de la variación de la velocidad del fluido, carga y presión sobre las partes del rodete. Para que el modelo sea considerado válido, los resultados numéricos deben ser comparados con mediciones experimentales [11], [12], [13].

En la Fig. 2, se hace un análisis numérico de las presiones que actúan sobre el álabe del rodete y la evolución de la velocidad del flujo aguas abajo.

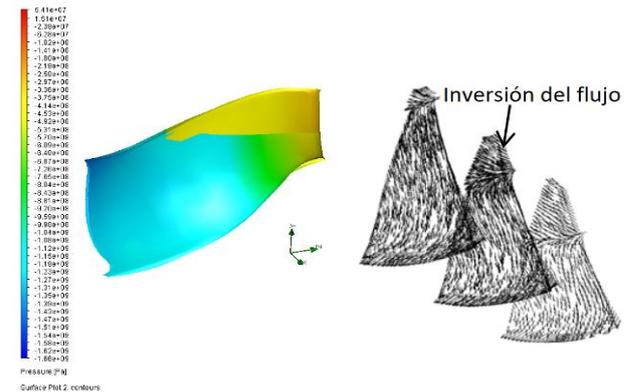


Figura 2: Distribución de la presión en el álabe del rodete y evolución de la velocidad del flujo aguas abajo.

3. METODOLOGÍA

3.1. Inspección de Daños y Desgaste en el Rodete

Un buen plan de reparación de los daños y desgaste ocasionados por picaduras de cavitación sobre los componentes de las turbinas, deben ser considerados en los mantenimientos programados de las centrales hidroeléctricas. Si estos daños se dejan de reparar o son reparados inapropiadamente, éstos se extenderán muy rápidamente, disminuyendo el rendimiento, la eficiencia y vida útil de la unidad. Cuando los daños por picaduras se aproximan al 20% del espesor de los álabes o 1/2” de profundidad, cualquiera que sea menor, entonces se deben tomar medidas correctivas de inmediato.

La aplicación de un correcto plan de mantenimiento puede efectivamente minimizar los problemas futuros, pero si se excede en la reparaciones puede conducir a un degrado y disminución de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales. Una aplicación de soldadura sin control sobre los álabes del rodete puede conducir a la distorsión del perfil hidráulico acelerando los daños por cavitación; además del apareamiento de esfuerzos residuales en el rodete cuyo resultado será el apareamiento de fisuras.

Las reparaciones en sitio deben ser realizadas de una manera lógica y metódica, cumpliendo algunos pasos: 1) Limpieza e inspección para reportar la integridad de componente; 2) Identificar las posibles causas de las



zonas afectadas por las picaduras; 3) Planificar un adecuado procedimiento para la reparación; 4) Realizar una reparación eficiente respetando estrictamente el procedimientos de soldadura e inspección con ensayos no destructivos. Durante la reparación debe considerar dos opciones; una es restaurar al componente al perfil original, y otra, modificar el perfil para eliminar o reducir las causas de los daños. En la Tabla 1, se presenta un resumen de los diversos métodos para reparar las áreas afectadas en una turbina Francis como: rellenar el área dañada con material de soldadura; rellenar el área dañada con materiales no fusionados (por ejemplo: sistemas poliméricos); soldadura de placas o refuerzos en las áreas afectadas; o mediante la sustitución de las secciones con material nuevo.

Tabla 1: Métodos de reparación por picaduras de cavitación

| | Reparación con soldadura | Material no fusionado | Soldadura de placas, refuerzos | Reemplazo secciones dañadas |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| - Álabes del rodete | x | | | x |
| - Corona | x | x | x | |
| - Banda | x | | | |
| - Álabes directrices | x | x | | |
| - Anillo de descarga | x | x | | x |
| - Tubo de succión | x | x | | x |

Excesivas intervenciones con procesos de soldadura e incluso una vez que se ha cumplido el ciclo de vida útil indicada por el fabricante, los rodetes deber ser retirados de las turbinas y sometidos a una recuperación integral. En la Fig. 3, se muestra un rodete, en donde las excesivas reparaciones de las fisuras de los álabes ocasionó la fatiga del material (alteración de la microestructura). La operación del rodete fuera del punto de diseño ocasionó una degradación excesiva de la superficie, en la misma figura se puede apreciar el desgaste por picaduras ocasionadas por la cavitación. Este es un caso práctico en donde el rodete ha sido desmontado de la turbina de la Central Hidroeléctrica San Francisco y sometido a labores de recuperación en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT.



Figura 3: Rodete Francis, con fisura en los álabes en el lado de salida y picaduras por cavitación – erosión en la banda.

3.2. Ingeniería Inversa para el Análisis Numérico

Para efectos de obtener información en forma precisa y eficiente del desgaste, daños superficiales, desviaciones en la geometría y dimensiones de rodete, se realiza ingeniería inversa digitalizando mediante un escáner 3D (*HandySCAN de Creaform*) Fig. 4, para obtener una nube de puntos, que posteriormente serán convertidos en un sólido a través de un software CAD poder realizar el estudio del diseño.



Figura 4: Ingeniería inversa, colocación de targets y escaneo sobre un rodete de la turbina Francis.

La digitalización de los componentes de la turbina utilizando el escáner 3D nos permite utilizar el diseño asistido por computador para obtener el sólido de las piezas, Fig. 5, que generalmente tienen diversas formas y variada complejidad, lo que permitirá recrear el diseño de la máquina hidráulica y realizar un análisis y simulación numérica de su comportamiento en variadas condiciones.

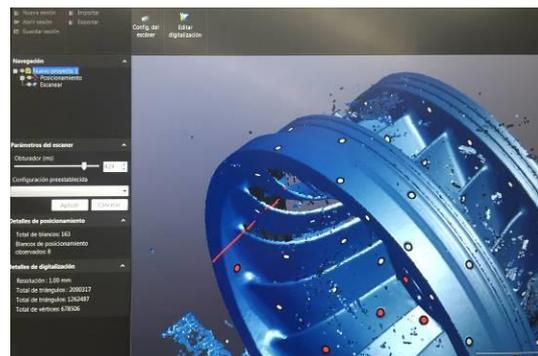


Figura 5: Ingeniería inversa, modelado en 3D (nube de puntos) para procesarlo en CAD y ser utilizado en simulación numérica.

En la Fig. 6, se observa un modelo escaneado en 3D de la turbina Francis ensamblado con sus componentes principales, sobre lo que se puede realizar la simulación numérica para calcular distintos parámetros, como velocidad del flujo, cargas, presiones, movimiento de partículas en cada componente, etc.

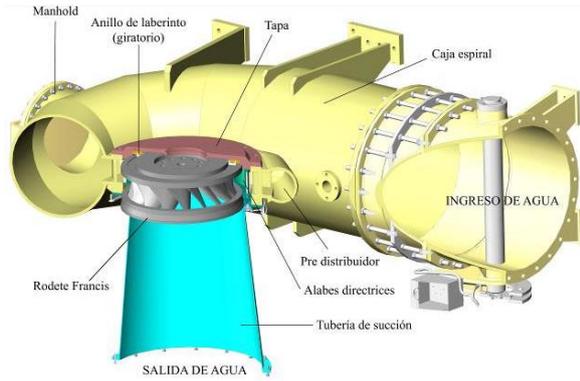


Figura 6: Ensamble de un modelo de turbina Francis

En la Fig. 7, se puede observar la simulación de la trayectoria y la velocidad del flujo, desde el ingreso del agua a la caja espiral simulado una cota (caída) de 213 metros y un caudal de 58 m³/s, pasa por la caja espiral a través de la válvula esférica, luego continua por el pre-distribuidor y álabes directrices, posteriormente el flujo ingresa al rodete Francis, cuya velocidad de rotación nominal es de 327 rpm para generar una potencia nominal de 115 MW, y finalmente llega a la tubería de succión, salida del agua. En la simulación numérica del fluido, se observa que a la salida del rodete se presenta una mayor velocidad de flujo del agua.

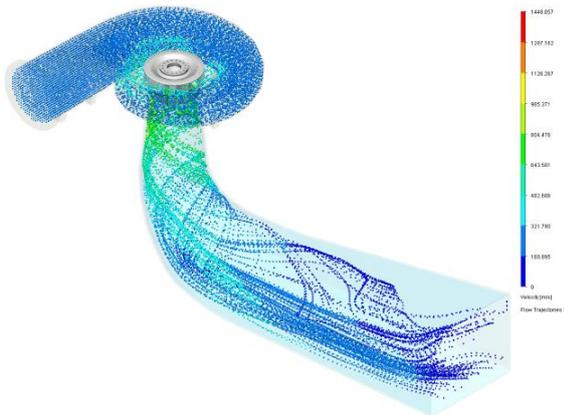


Figura 7: Simulación de la trayectoria del flujo en una turbina hidráulica Francis.

El paso del agua a través de la turbina, genera áreas que están sometidas a altas presiones, como se puede apreciar en la Fig. 8, en donde se realiza un análisis numérico estructural; estas áreas evidencian en donde se producen grandes esfuerzos durante el funcionamiento a plena carga y dan cuenta las zonas en donde se va a producir el fenómeno de la cavitación, debido al cambio de presiones.

La simulación numérica del fluido en el rodete indica que en borde de ataque y en los bordes de la corona y banda, existe una gran presión del fluido y que es una de las zonas donde se produce las picaduras por cavitación y erosión en forma real en un rodete de turbina Francis, como se evidencia en la Fig. 9.

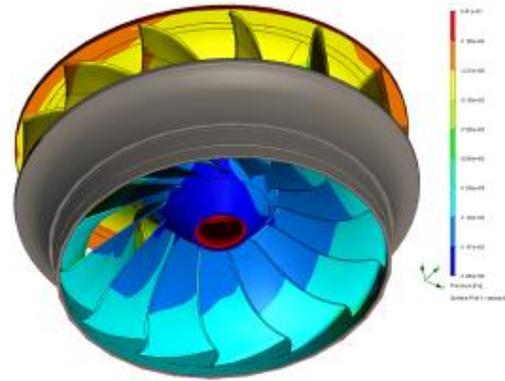


Figura 8: Localización de presiones en el rodete de la turbina Francis al atravesar el fluido a carga nominal.



Figura 9: Zona de desgaste por picaduras de cavitación – erosión.

3.3. Limpieza y Ensayos No Destructivos

Una de las etapas para la recuperación es realizar una limpieza exhaustiva y el control inicial del estado del rodete con END, mediante una inspección visual, tintas penetrantes PT Fig. 10, para encontrar defectología superficial; y ultrasonido por arreglo de fases UTPA Fig. 11, para defectos internos.



Figura 10: Ensayo de tintas penetrantes PT



Figura 11: Ensayo de ultrasonido con arreglo de fases UTPA.

Los defectos encontrados son inspeccionados, evaluados e interpretados mediante la especificación técnica de máquinas hidráulicas CCH 70-4 por un inspector nivel II o III calificado bajo la práctica recomendada SNT-TC-1A de la ASNT.

En la primera etapa en la que se realiza la limpieza e inspección con END, se determina la factibilidad de reparación de rodete y la sustitución del material fatigado de los 13 álabes, la sección cerca al borde de la salida que presentaron fisuras y defectos fuera de los criterios de aceptación en el lado de succión .

3.4. Caracterización del Material

Previo a iniciar con el proceso de soldadura para la recuperación de los álabes del rodete, se realiza la caracterización del material para determinar la composición química, dureza superficial, propiedades mecánicas, microestructura, etc.

En la Fig. 12, se muestra el análisis de la composición química del material de los álabes, utilizando un espectrómetro de emisión óptica, dando como resultado los componentes del acero así como sus porcentajes. Con la espectrometría se determinó que el material pertenece a un acero inoxidable ASTM A743 gr. CA6NM, indicado en la Tabla 2.



Figura 12: Espectrometría sobre la superficie de los álabes.

Tabla 2: Composición química de los álabes fatigados que corresponden a un acero ASTM A743 gr. CA6NM

| %C | %Mn | %Si | %P | %S | %Cr | %Ni | %Mo |
|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 0,05 | 0,76 | 0,43 | 0,02 | 0,01 | 12,48 | 3,80 | 0,43 |

Dentro de las pruebas de caracterización está la medición de la dureza superficial, Fig.13. Según la norma el acero ASTM A743 gr. CA6NM debe tener una dureza máxima de 285 HB. Sin embargo, la dureza medida estuvo en un rango de 295 a 325 HB, lo que da cuenta la afectación del material debido a la falta de tratamiento térmico y al uso de distintos materiales de aporte en varias reparaciones con soldadura.

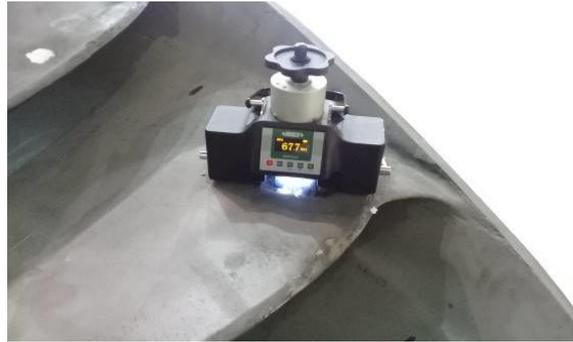


Figura 13: Medición de la dureza en los álabes fatigados.

La metalografía sobre la superficie de los álabes fatigados permite observar su microestructura y determinar la calidad del acero y la existencia de procesos de soldadura o tratamiento térmicos anteriores. En la Fig. 14, se observa la microestructura con la matriz martensítica (agujas) del acero inoxidable ASTM A743 gr. CA6NM.



Figura 14: Microestructura martensítica de los álabes del rodete.

3.5. Proceso de Recuperación por Soldadura de Insertos Nuevos

Los controles previos a la recuperación definen el área de corte de los álabes, siendo en este caso aproximadamente 1/3 de su ancho. Con los datos de la composición química, dureza y metalografía se definen las características de las nuevas secciones “insertos” que generalmente deben ser del mismo material.



Figura 15: Corte con plasma de las áreas afectadas de los álabes.

Definidas las secciones fatigadas, mediante una plantilla se cortan con plasma los álabes de forma

alternada de modo que no se provoque deformaciones geométricas; se deja una franja de 5 mm en el cono y la banda para evitar la afectación de la microestructura debido a la temperatura de corte, Fig.15.

Con anterioridad, los insertos que deben pasar por el proceso de forja son fabricados en plantas de fundición con similares características químicas, mecánicas y geométricas de los álabes. Sobre los insertos nuevos, se realiza un control de calidad con END, la caracterización del material y el levantamiento dimensional con el escaneo en 3D para contrastar la geometría del perfil hidráulico con el anterior. En la Fig. 16, se aprecia el escaneo de los insertos nuevos, luego de haber sido inspeccionados con END.



Figura 16: END y control dimensional de los insertos nuevos.

Los insertos son colocados en la misma posición de las secciones retiradas, controlando mediante los planos de fabricación el espaciamiento en puntos de control entre la banda y el cono para no afectar el diseño original, como se observa en la Fig. 17.



Figura 17: Posicionamiento y presentación de los insertos.



Figura 18: Proceso de soldadura de los insertos.

El proceso de soldadura de los insertos, Fig. 18, se realiza mediante un procedimiento calificado de soldadura WPS. El tipo de unión es una junta a tope con bisel doble V, el cordón de la raíz se realiza mediante el proceso SMAW con material de aporte E410NiMo-15, para los pases de relleno se realiza con el proceso GTAW con varillas ER410NiMo, finalmente la última capa o sobre monta se recubre con electrodo revestido E410NiMo-15.

El control de temperaturas es muy importante durante el proceso de soldadura, un control óptimo evitará el apareamiento de fisuras. Se debe controlar la temperatura de precalentamiento que debe estar entre 80°C a 120°C, la temperatura entre pases de los cordones debe ser máximo entre 80°C a 120°C como se muestra en la Fig. 19.



Figura 19: Control de temperaturas durante la soldadura.

Durante el proceso de soldadura se debe realizar controles intermedios con END para evitar dejar defectos en los cordones de soldadura, como se observa en la Fig. 20. Cuando se termine todos los pases de los cordones de soldadura, la inspección con ultrasonido asegurará la ausencia de defectos internos.



Figura 20: Control intermedios de la soldadura con END

Al finalizar la soldadura se unión de los insertos, un desbaste y pulido de los cordones es necesario. Para asegurar que el perfil hidráulico se realiza un control de la geometría mediante plantillas que son ubicados en distintos puntos de control. En el caso de desviaciones, se debe recuperar con soldadura en caso de que las medidas sean inferiores o retirar material con desbaste y pulido en el caso que las dimensiones sean superiores.

En la Fig. 21, se puede apreciar la ubicación de las plantillas sobre los álabes del rodete.

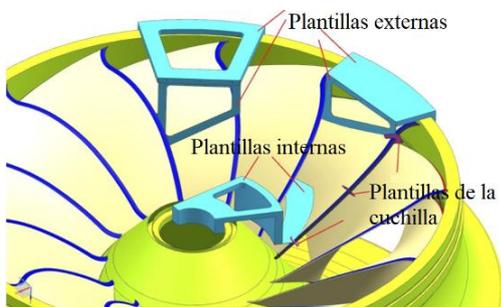


Figura 21: Control del perfil hidráulico mediante plantillas.

Una vez terminada la reparación se da un acabado superficial inferior a 12,5 µm, mediante un pulido fino; el acabado superficial es importante debido el agua debe encontrar la menor resistencia en la superficie de los álabes; posteriormente se debe dar un tratamiento térmico post-soldadura para el alivio de tensiones y evitar el apareamiento de fisuras. En la Fig. 22, se observa un rodete Francis sometido a un tratamiento térmico a una temperatura de 600°C, con un gradiente de temperatura de 50°C/h como máximo.



Figura 22: Tratamiento térmico post soldadura al rodete.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Aplicar un correcto plan de control y aseguramiento de la calidad bajo normas internacionales en la reparación de un rodete considerado como chatarra, además de garantizar que los trabajos realizados sean los más óptimos, se logra un ahorro económico del 70% al 80% en referencia al valor de un rodete nuevo.

Un rodete nuevo de las características técnicas de un rodete tipo Francis como el abordado en este trabajo tiene un valor aproximado en el mercado de USD. 2'000.000,00.

Los costos en la reparación de un rodete Francis en el exterior ascienden a USD. 1'228.200,00 mientras que los costos de la reparación en el Ecuador en el CIRT, la fuente de los datos fueron tomados del área financiera de la Unidad de Negocios Hidroagoyán, se recuperó el

rodete con un costo de USD. 493.724,60 como se muestra en la Fig. 23. El ahorro para el país fue de USD. 734.475,40.

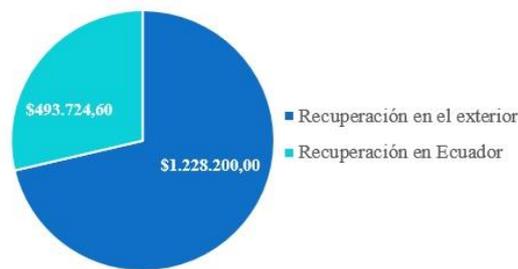


Figura 23: Costos de reparación de un rodete tipo Francis

5. RESUMEN DE RESULTADOS

- Con la ayuda de ingeniería inversa, se puede realizar una simulación numérica de los efectos del fluido sobre las turbinas, especialmente de las zonas que se encuentran sometidas a daños por efectos de la cavitación. En la Tabla 3, se puede resumir los daños, causas y posible solución para evitar y disminuir las consecuencias de la cavitación.

Tabla 3: Localización de cavitación, picaduras, erosión en un rodete de turbina Francis.

| Localización | Posibles causas | Posible solución |
|---|---|---|
| Lado de succión del álabe cerca de la banda y el borde posterior | - Presión general muy baja. | - Reducir la potencia de salida |
| Borde de ataque del álabe cerca de la banda en el lado de succión | - Contorno incorrecto del álabe | - Corregir el contorno |
| | - Operación en cotas mucho más altas que el diseño | - Modificar el perfil del borde de ataque |
| Borde de ataque del álabe cerca de la banda en el lado de presión | - Perfil de borde de ataque incorrecto | - Modificar el perfil del borde de ataque |
| | - Operación en cotas mucho más bajas que el diseño | - Modificar el perfil del borde de ataque |
| Borde posterior del álabe | - Contorno incorrecto del borde posterior | - Ajustar el contorno |
| Corona o borde de ataque del álabe cerca de la corona | - Operación por períodos prolongados con cargas bajas | - Reducir la operación de carga baja |
| En respiraderos de la corona | - Discontinuidad en la corona | |

Se implementó un plan de pruebas de inspección y control de calidad para ser utilizado durante la recuperación de los álabes de un rodete Francis, que pasa desde un control inicial con END para identificar los defectos y daños de la superficie y determinar la factibilidad de ejecución del proyecto de recuperación; una etapa de controles intermedios que permiten caracterizar el tipo de material, control sobre el proceso de soldadura, ejecución de END para evitar el

atrapamiento de discontinuidades en los cordones de soldadura y un control del perfil hidráulico para ajustar al diseño original; y un control final del acabado superficial y un tratamiento térmico para el alivio de tensiones y homogenización de la dureza en los cordones de soldadura.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Aplicar un correcto plan de control y aseguramiento de la calidad bajo normas internacionales en la reparación de un rodete, se recuperan rodetes considerados como chatarra, además se garantiza que los trabajos realizados sean los más óptimos; logrando un ahorro económico del 60% al 70% en referencia al valor de un rodete nuevo.
- Con estas experiencias e información adquirida se crea un precedente para desarrollar planes de control y aseguramiento de la calidad para turbinas Pelton y Kaplan que también se encuentran instaladas en las centrales hidroeléctricas del país.
- El CIRT contribuye al desarrollo tecnológico e investigación del sector eléctrico, además de romper la dependencia tecnológica y a convertirse en un referente nacional y de la región en cuanto a brindar servicios especializados de ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al CIRT, a la Unidad de Negocio Hidroagoyán - CELEC EP, en donde se realizó la reparación del rodete de la turbina Francis de la Central San Francisco, a sus especialistas quienes realizan ingeniería y han proporcionado la información para realizar el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM A743 / A743M - 06 Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application. West Conshohocken. ASTM International; 2010.
- [2] W. Duncan. Turbine Repair. Facilities instructions, standards, & techniques volume 2-5. September 2000. Denver Colorado.
- [3] K. Celebioglu, B. Altintaş, S. Aradag, Y. Tascioglu. (2017). Numerical research of cavitation on Francis turbine runners. International Journal of Hydrogen Energy.2017.
- [4] F. Avellan. Introduction to cavitation in hydraulic machinery. Proceedings of the 6th Int. Conf. On Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Timisoara, Romania, 2004.

- [5] G. Demirel, E. Ayli, K. Celebioglu, Y. Tascioglu, S. Aradag. Experimental Determination of Cavitation Characteristics of Hydraulic Turbines. WCE 2015, July 1-3, 2015, London, U.K.
- [6] M. Sanda, G. Dan, F. Avellan. Analysis of the Cavitating Draft Tube Vortex in a Francis Turbine Using Particle Image Velocimetry Measurements in Two-Phase Flow. Journal of Fluids Engineering. February 2008. Vol. 130.
- [7] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, M. Coussirat. (2006). Detection of cavitation in hydraulic turbines. Mech. Syst. Signal Proc. 20(4).
- [8] P. Gruber, P. Odermatt, M. Etterlin, T. Lerch, M. Frei, M. Farhat. The detection of cavitation in hydraulic machines by use of ultrasonic signal analysis (IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 22 052005). 2014.
- [9] X. Escaler, I. Vilberg, J. Ekanger, H. Francke, M. Kjeldsen. Assessment of remote cavitation detection methods with flow visualization in a full scale Francis turbine. Baltimore, USA: 14-16 May 2018: proceedings, 2018, p. 1-6.
- [10] H. M. Zhang and L. X. Zhang, "Numerical Simulation of Cavitating Turbulent Flow in a Francis Turbine with Draft Tube Natural Air Admission", Applied Mechanics and Materials, Vols. 291-294, pp. 1963-1968, 2013.
- [11] I. Kassanos, J. Anagnostopoulos, D. Papantonis. Numerical analysis of the effect of splitter blades on draft tube cavitation of a low specific speed Francis turbine. Ljubljana, Slovenia, 2015.
- [12] P. P. Gohil and R. P. Saini. Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 9, No. 1, pp. 357-365, 2016.
- [13] A. Laouari and A. Ghenaiet. Simulations of Steady Cavitating Flow in a Small Francis Turbine. Vol. 2016. Article ID 4851454, 15 pages.



Marcelo Toapanta Defaz. Nació en Saquisilí, Ecuador en 1984. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador en 2008; de Máster en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Politécnica de Madrid, España en 2014. Sus campos de investigación están relacionados con el sector eléctrico, a la reparación y recuperación de turbinas térmicas e hidráulicas, a la inspección con ensayos no destructivos para el control de la calidad y al análisis de los mecanismos de fallas y desgaste.