



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

---

## *Reparación del Rodete de la Turbina de la U06 de la Central Hidroeléctrica ITAIPU*

**Miguel A. Torales, Aldo M. Ramírez, João Marra**

**División de Ingeniería de Mantenimiento Mecánico – SMIM.DT**

**Itaipu Binacional**

**Central Hidroeléctrica de Itaipu, Hernandarias**

[mtorales@itaipu.gov.py](mailto:mtorales@itaipu.gov.py) - +595 61 5992485

[aldoman@itaipu.gov.py](mailto:aldoman@itaipu.gov.py) - +595 61 5992735

[marra@itaipu.gov.br](mailto:marra@itaipu.gov.br) - +595 61 5992690

### **Resumen:**

El objetivo de esta contribución técnica es mostrar los trabajos realizados para recomponer el rodete de la turbina de la U06 de la Central Hidroeléctrica de Itaipu después de haber encontrado durante una parada de mantenimiento programada en setiembre de 2010 dos fisuras, una localizada en el álabe N°11 y la otra en el anillo de desgaste rotativo inferior. La propuesta de solución adoptada para la no conformidad detectada en el anillo de desgaste rotativo inferior derivó en el desmontaje total del conjunto girante, principales piezas fijas y componentes de la Unidad Generadora. En forma complementaria, fueron realizadas reparaciones de áreas erosionadas por cavitación y correcciones en el perfil hidráulico del borde de salida de los álabes.

Después de analizar todas las alternativas técnicas posibles para la solución de la no conformidad en el anillo se optó por la sustitución del anillo fracturado por un anillo de reserva, y, consecuentemente, en el desmontaje de la Unidad Generadora para la remoción del rodete, decisión esta que, además de ser técnicamente adecuada, resultó en beneficios inestimables para la empresa, ya que los trabajos de desmontaje y montaje, realizados con mano de obra propia, se constituyeron en una oportunidad sin precedentes para capitalizar conocimientos y experiencias en el contexto de la gestión del conocimiento.

Los trabajos de reparación del álabe N°11 y los de cavitación fueron realizados por técnicas de soldadura con consumibles inoxidables austeníticos sin tratamiento térmico posterior. En todas las etapas de reparación los trabajos fueron acompañados de Ensayos No Destructivos. El servicio de reparación del rodete fue realizado totalmente en el área industrial de la Central por la empresa fabricante del componente (VOITH HYDRO SERVICE), bajo la supervisión de ITAIPU.

### **PALABRAS CLAVES**

turbina Francis, fisuras, soldadura, cavitación, reparación, anillo de desgaste superior, mantenimiento.

## 1. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

El 23/09/2010, en la parada de mantenimiento cuadrilateral de la U06 iniciada el 22/09/2010, durante la inspección de la turbina, fueron encontradas, respectivamente, dos fisuras en el rodete de la turbina, una en el álabe No 11 y otra en el anillo de desgaste rotativo inferior, en la región del vano entre los álabes No 10 y 11, mostrado de forma esquemática en la figura 1. En esta fecha, la unidad generadora se encontraba con 168.463 horas de operación, desde el inicio de su operación industrial el 31/07/1987, por tanto, después de 23 años de operación. La fisura en el álabe era pasante con longitud aproximada de 470mm en el lado de succión y aproximadamente 500mm en el lado de presión. La abertura máxima de la fisura no era mayor 1,0mm. Esta fisura se iniciaba en el borde de fuga, aproximadamente en la posición intermedia de esta arista, avanzando en dirección al interior del álabe, conforme muestran las figuras 1a y 1b. La fisura en el anillo de desgaste rotativo inferior de la turbina también era pasante, en toda la sección transversal de este anillo, es decir, 380mm en la dirección axial y 35mm en la dirección radial. La abertura máxima de la fisura era menor que 1,0mm. Las figuras 1c y 1d muestran, respectivamente, el local de la falla y una vista ampliada de la misma.

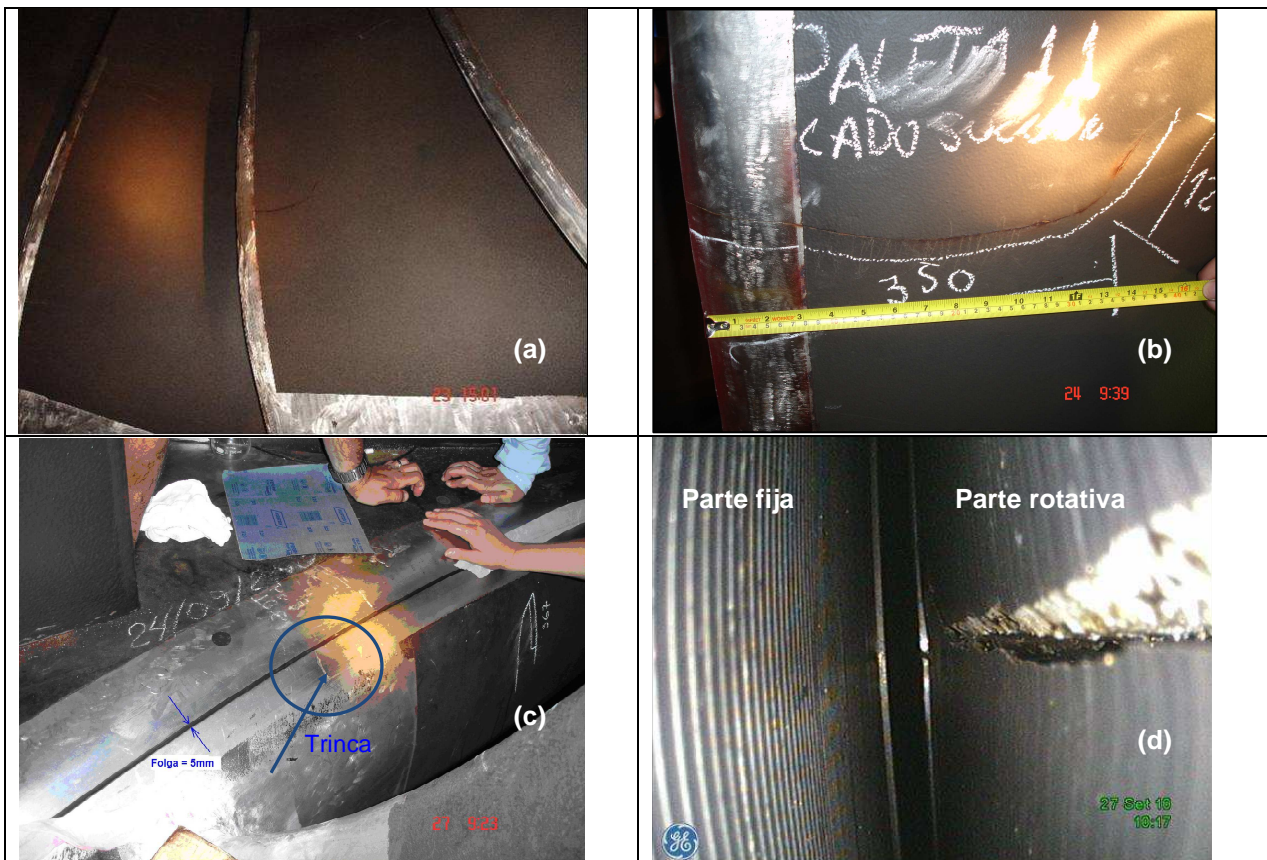


Figura 1 – (a) Fisura en el álabe N°11 del rodete de la turbina U06, (b) imagen ampliada de la fisura en el álabe N°11 (c) localización de la fisura en el anillo de desgaste de la turbina, (d) imagen ampliada de la fisura en el anillo en el sentido axial.



---

## 2. ACCIONES INMEDIATAS

De forma a certificarse de la extensión, el local de las fisuras y tomar las primeras determinaciones, fueron realizadas las siguientes acciones:

- a) Fisura en el álabe No 11: remoción de la pintura del álabe en las inmediaciones de la fisura para la realización de Ensayos No Destructivos (líquido penetrante y ultrasonido) para determinar la extensión de la fisura en ambos lados del álabe;
- b) Fisura en el Anillo de Desgaste Rotativo Inferior en la región del vano entre los álabes No 10 y 11: ataque con reactivo Nital al 3% en la región aparente de la fisura, revelando que la misma está localizada en una de las uniones soldadas de fabricación del anillo; inspección con fibroscopio a través del huelgo entre los anillos de desgaste estacionario y rotativo, revelando que la fisura se extiende a toda la altura del anillo; inspección por ultrasonido en la región de la fisura, revelando que la corona no fue afectada y que fisura termina en la interfaz anillo/corona.
- c) Convocatoria al fabricante de la turbina para evaluación preliminar del problema.

## 3. ACCIONES POSTERIORES

De manera a dar seguimiento al análisis de las posibles alternativas de solución, a las tentativas de diagnóstico y otras verificaciones, posteriormente se realizaron las siguientes acciones:

- a) Análisis de documentos relativos a la fabricación de la turbina U06 ("DataBooks"), con el objetivo de identificar eventuales anomalías que pudiesen estar relacionadas al problema en cuestión;
- b) Reunión con el fabricante del equipo (VOITH) para un análisis preliminar del problema;
- c) Consulta al especialista internacional en turbinas hidráulicas, Ing. John Gummer;
- e) Consulta al especialista en materiales de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Prof. Ing. Pedro Bernardini;
- g) Análisis de las alternativas de solución propuestas por el fabricante;
- f) Mediciones preliminares con presencia del supervisor del fabricante realizadas en la Unidad Generadora.

## 4. ALTERNATIVAS Y DELINEAMIENTOS PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La reparación de la fisura en el álabe N°11, desde el punto de vista de su localización, no revestía dificultad aparente, ya que, a través del montaje de plataformas y andamios sería posible acceder a la región de la misma y realizar la reparación. Sin embargo, toda la



---

problemática de la reparación del rodete de la turbina, giraba entorno a la fisura del anillo de desgaste rotativo inferior.

La reparación del anillo de desgaste rotativo inferior presentaba tres alternativas de solución a saber:

#### **4.1 Reparación de la fisura del anillo de desgaste inferior con el rodete en el local, sin el desmontaje de la unidad generadora.**

El fabricante VOITH consideró esta alternativa inviable en razón de la indisponibilidad actual, de procesos de soldadura y recursos que permitan su ejecución, principalmente debido a la dificultad de acceso a la fisura, por falta de espacio físico.

Definitivamente el acceso al área de la fisura es muy limitado e intentar realizar algún tipo de soldadura en esa configuración debería considerar los siguientes factores:

a) Materiales disimilares. El material del anillo de desgaste es acero inoxidable martensítico, el material de la corona del rodete es acero al carbono fundido. Para realizar algún tipo de soldadura confiable, primeramente, es necesaria la calificación de un procedimiento de soldadura adecuado.

b) Falta de acceso a la raíz de la soldadura. El proyecto del anillo establece una soldadura de penetración total. La falta de acceso al lado de la raíz de la junta, muda las condiciones de proyecto. La junta soldada resultante podría ser de penetración total, sin embargo, ambas piezas estarían vinculadas.

c) Vibración permanente del anillo de desgaste y corona del rodete y/o esfuerzos eventuales entre los mismos. En el caso de una eventual reparación en estas condiciones, la corona del rodete actuaría como respaldo ("backing") de la soldadura del anillo. En condiciones normales esto no sería problema desde que ambas piezas no estén sometidas a vibraciones y/o esfuerzos. Por otro lado, como fue mencionado anteriormente, esta situación no es una condición de proyecto, ya que entre el anillo de desgaste y la corona no están previstos puntos de anclaje o de engaste. En este caso en particular, en la raíz de la soldadura tendríamos puntos concentradores de tensión a lo largo de la soldadura que, eventualmente podrían nuclear fisuras que, por su vez, podrían propagarse nuevamente en el anillo o, en el peor de los casos, en el material de la corona.

d) Susceptibilidad de nucleación de fisuras inducidas por hidrógeno. La posibilidad de nucleación de fisuras inducidas por hidrógeno es bastante alta pues, en primer lugar, el material del anillo, ya posee una microestructura susceptible al surgimiento de este tipo de fisuras y, por otro lado, la masa de la corona debido a su tamaño, propicia una tasa de enfriamiento muy alta, condición necesaria y muy favorable para la nucleación de fisuras.

e) Control del ajuste anillo/corona. La reparación del anillo por soldadura realizada en el local, no permitiría conocer el ajuste final entre ambas piezas.



---

Cabe destacar que el consultor de la Itaipu Binacional, John Gummer, cuando cuestionado sobre la posibilidad de realizar la reparación en el local, también se reafirmo diciendo que no habría confiabilidad en la reparación, caso esta sea realizada de la forma mencionada.

#### **4.2 Reparación de la fisura del anillo de desgaste inferior con desmontaje parcial y levantamiento del conjunto girante.**

Entre las alternativas de solución también fue planteada la posibilidad de levantar el conjunto girante aproximadamente 500mm, por medio de los cilindros hidráulicos del freno del generador, de modo a exponer toda la fisura del anillo rotativo inferior en una condición mas favorable para la ejecución del reparo por soldadura. Esta alternativa presuponía el levantamiento de la tapa de la turbina dentro del pozo de la turbina en una altura compatible con el levantamiento del conjunto girante.

Después de análisis preliminares y una amplia discusión interna sobre el proceso de reparación a ser aplicado, el fabricante del equipo consideró esta solución técnicamente aceptable y viable, mas tampoco garantizaría que después de la reparación no surgiesen nuevas fisuras, debido a las restricciones existentes como por ejemplo, la falta de acceso para soldar la fisura del lado del diámetro interno (lado de la raíz de la soldadura).

El consultor J. Gummer también fue consultado sobre esa alternativa y, sobre el punto, relató que este procedimiento, si bien ya fue aplicado en otras usinas de menor porte, el mismo reviste gran dificultad y, que en el caso ITAIPU, la dificultad era todavía mayor. De cualquier forma, si realizado en estas condiciones, la soldadura del anillo continuaría sin las garantías necesarias, pues los problemas levantados en el ítem 4.1 continuarían.

#### **4.3 Reparación de la fisura del anillo de desgaste inferior con desmontaje total de la unidad, excepto el estator del generador, para la substitución del anillo.**

La tercera alternativa planteada y sugerida, tanto por el fabricante, como por el consultor J. Gummer, fue aquella consistente en el desmontaje total de la unidad, para la substitución del anillo de desgaste rotativo inferior del rodete de la turbina fue la condición mas indicada para la solución definitiva del problema.

Sin embargo fue alertado también que en cualquier desmontaje total de una unidad generadora que ya operó por un período semejante a esta unidad (23 Años), pueden ocurrir sorpresas que podrían comprometer el planeamiento y el cronograma inicial de ejecución de los trabajos y que esto debería ser llevado en consideración.

La ITAIPU, luego de analizar las alternativas posibles y en base a las recomendaciones del fabricante y especialistas, optó por realizar la reparación de la Unidad Generadora realizando el desmontaje del rodete, la substitución del anillo de desgaste rotativo inferior y la reparación de la fisura del álabe N°11.





---

El diagnóstico de las causas de las fisuras, fue realizado en paralelo y comprendió el análisis de los documentos, simulaciones del campo de tensiones mecánicas del rodete y del análisis de fractura de las fisuras, que por su vez, dependió de la retirada de muestras de materiales del álabe y del anillo de desgaste fracturados, siendo que las muestras de este último, solo fueron retiradas al final del desmontaje de la unidad generadora.

La Dirección Técnica de la ITAIPU con todos los datos y análisis obtenidos, considerando aun todos los riesgos oriundos de ese proceso, tomó las siguientes providencias:

- a) Desarrolló un plan de acción en que procuró minimizar los riesgos existentes, además del levantamiento de los probables imprevistos en el desmontaje total de la unidad.
- b) Elaboró un planeamiento para documentar y registrar todos los procedimientos a ser adoptados durante el proceso y revisión de la documentación técnica existente, para posibles repeticiones /aplicaciones en otras unidades generadoras.

## **5. ACTIVIDADES PREVIAS AL DESMONTAJE**

Durante el periodo de la elaboración de las Especificaciones Técnicas y Negociaciones de los Contratos, fueron realizados levantamientos para localizar, identificar y recuperar todos los Dispositivos necesarios para el Desmontaje y Montaje de la Unidad Generadora. Fueron adquiridas herramientas especiales e instrumentos de precisión para mediciones y control, para ser usados durante los trabajos de Desmontaje y Montaje.

Además con previo acuerdo con la VOITH, fue enviado a la Central Hidroeléctrica de ITAIPU, un Supervisor de la VOITH, que reunido con el Equipo Técnico de la ITAIPU, definieron y realizaron todas las mediciones necesarias antes del “Inicio del Desmontaje”.

## **6. PROCEDIMIENTO DE REPARO DEL ALABE N°11**

### **6.1 Remoción de la muestra para análisis de laboratorio**

Antes de la ejecución del reparo propiamente dicho, se procedió a la remoción de las muestras para posterior análisis de la ITAIPU / VOITH en los laboratorios de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC).

### **6.2 Procedimiento de reparación por soldadura**

La reparación de la fisura propiamente dicha fue realizada siguiendo el siguiente procedimiento:

- Eliminación de la fisura de un lado del álabe utilizando corte con grafito y esmerilado hasta 60% de espesor, manteniendo el ángulo para tener acceso a la junta;
- Esmerilado de las superficies grafitadas eliminando discontinuidades en la superficie.

La figura 2 muestra la remoción de parte de la fisura del lado presión, conforme procedimiento establecido.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

- Ejecución de ensayo por LP;
- Pre calentamiento de 80°C alrededor del área a soldar;
- Soldadura con proceso SMAW (electrodo revestido) conforme procedimiento de soldadura calificado conforme código ASME IX, utilizando electrodo E309 hasta un 50% de profundidad de la cavidad.

La figura 3 muestra la ejecución de la soldadura en su primera fase del lado presión.



Fig.2 – Remoción de la fisura lado presión - Fig 3 – Depósito parcial de soldadura lado presión del álabe N11

- Remoción de las indicaciones del lado succión a través de grafitado y esmerilado eliminando completamente la fisura, conforme mostrado en la figura 4



Fig.4– Limpieza de raíz lado succión - Fig.5 Ensayo de LP en la raíz lado succión

- 
- Realización de ensayo de LP para eliminación de cualquier indicación linear (figura 5);
  - Precalentamiento alrededor del área de la fisura a 80°C;
  - Soldadura de acuerdo al procedimiento, alternando el lado para controlar la deformación hasta llegar a 3mm de sobremetal, en ambos lados;
  - Todos los cordones de soldadura fueron realizados con filetes cortos para minimizar las tensiones causadas por el proceso de soldadura;
  - La verificación de temperatura de interpase se realizó utilizando lápiz térmico y medidor de temperatura infrarrojo. La temperatura de interpase máxima fue de 180°C;
  - Esmerilado del exceso de material de soldadura manteniendo el perfil hidráulico y pulir para la realización de Ensayos No Destructivos;
  - Realización de ensayo de Líquido Penetrante (LP) y Ultrasonido (US) para garantizar la eliminación completa de la fisura y cualquier indicación.

## **7. PROCEDIMIENTO DE SUBSTITUCIÓN DEL ANILLO DE DESGASTE ROTATIVO INFERIOR**

### **7.1 Procedimiento para remoción del anillo de desgaste fisurado**

La remoción del anillo de desgaste fisurado por su condición de tensionamiento, fue realizada conforme un procedimiento específico, tomándose todos los cuidados para evitar accidentes:

- Preparación y soldadura de soportes de apoyo y cáncamos de izaje, conforme figura 7;
- Ejecución de 3 cortes transversales, equidistantes en el anillo por proceso de corte (grafitado), usando como referencia la fisura real (90°, 180° e 270°), para facilitar la remoción del anillo de desgaste sin dañar la fisura que será removida para análisis posterior;
- Remoción por medio de corte con grafito de la soldadura de sello inferior;
- Cortar la soldadura de sello superior del anillo de desgaste, dejando aproximadamente 500mm de conexión soldada por razones de seguridad. Este procedimiento debe ser aplicado en los 4 segmentos de 90°
- Soldar cáncamos de izaje (8x) equidistantes en el anillo de desgaste para el transporte de las piezas cortadas;
- Con ayuda de puente grúa, fijar cabos en los cáncamos, realizar el corte final de los 500mm de soldadura de sello remanente por esmerilado y retirar los segmentos de anillos;
- Realizar las reparaciones en las áreas afectadas de la corona por esmerilado y soldadura.
- Realizar LP para eliminar posibles indicaciones lineares en las áreas reparadas.

### **7.2 Instalación del Anillo de Desgaste Rotativo Inferior**

Los anillos de desgaste son montados en el rotor normalmente por interferencia y por tanto es necesario un calentamiento para la dilatación del mismo y posterior montaje. La temperatura de calentamiento del anillo debe ser calculada conforme la siguiente formula



$$\Delta T = \frac{\Delta l + \delta}{l_0 \cdot \varepsilon}$$

$\Delta T$  = Temperatura de calentamiento del anillo de desgaste desde la temperatura ambiente;

$T_0$  = Temperatura ambiente (20°C)

$T_F$  = Temperatura de calentamiento;

$\delta$  = Huelgo diametral deseado (10mm)

$\Delta l$  = Interferencia del anillo de desgaste ( $\Delta d$ ) diferencia de diámetros anillo/rotor;

$l_0$  = Diámetro del rotor donde será montado el anillo de desgaste;

$\varepsilon$  = Coeficiente de dilatación lineal (para acero 0,000012).

Considerando las características dimensionales de este proyecto, una temperatura ambiente 20°C, considerando un huelgo diametral de 2mm y sabiendo que  $T_F = \Delta T + T_0$  obtendremos una temperatura de calentamiento  $T_F = 205$  °C siendo  $\Delta T = 185$  °C.

A pesar del proyecto definir la interferencia entre el anillo y el rotor, la fórmula para la determinación es de 1/1000. Por ejemplo, un diámetro de 1000 deberá tener una interferencia de 1mm. En el caso de Itaipu teóricamente para un diámetro de 8530mm debería existir una interferencia de 8.53mm.

En los diseños de fabricación la interferencia esta establecida entre 7.9mm hasta 8.9mm.

Las figuras 6a y 6b muestran la secuencia de montaje del anillo de desgaste.



Fig.6 a) Pre calentamiento del anillo de desgaste b) Transporte del anillo a la temperatura establecida



---

## **8. ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN DE LOS ÁLABES Y DEL ANILLO DE DESGASTE ROTATIVO SUPERIOR**

La reparación de la fisura del álabe N°11 y la substitución del anillo de desgaste rotativo inferior, no garantizan la integridad estructural del rodete que podría estar comprometido, por lo que fueron solicitados al fabricante del equipo, ensayos adicionales para verificar eventuales problemas derivados del siniestro.

En ese sentido, y por indicación del fabricante, fueron realizados ensayos no destructivos al anillo de desgaste rotativo superior y al borde de salida de todos los álabes del rodete.

### **8.1 Inspección del Anillo de Desgaste Rotativo Superior**

Para la inspección del anillo de desgaste superior fueron identificadas las regiones de soldadura a tope. Estas regiones, fueron ensayadas por LP.

Posteriormente fueron analizadas las soldaduras de sello, superior e inferior y, por último, fue realizado un control dimensional del mismo.

### **8.2 Inspección de los álabes del Rodete**

#### **8.2.1 Inspección Visual y Líquido Penetrante**

La primera etapa de la inspección visual del rotor consistió en el mapeo de las posibles regiones cavitadas. Fueron registrados el número de cada álabe y los defectos correspondientes, las áreas y formatos aproximados y la localización aproximada.

La segunda etapa es evaluar la condición general de la protección de epoxi alquitrán de hulla. Finalmente también fueron examinadas las regiones metálicas expuestas de las superficies hidráulicas y también del anillo de desgaste superior buscando la presencia de fisuras o poros

Las áreas identificadas defectuosas en la inspección visual fueron esmeriladas y ensayadas por LP, para luego rellenarlas con soldadura. Posteriormente, estas regiones fueron nuevamente sometidas a ensayos por LP.

#### **8.2.2 Inspección de Ondulación y Rugosidad**

En las regiones con revestimiento inoxidable y también luego de cualquier reparo por soldadura o por esmerilado de las superficies hidráulicas de los álabes, fueron verificadas la rugosidad y la ondulación máxima de acuerdo con lo especificado en el diseño de la turbina.

## **9. CONCLUSIÓN**

La decisión tomada de desmontar la Unidad Generadora para la reparación de las fisuras del rodete de la turbina, resultó satisfactoria.



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
19, 20 y 21 de Setiembre de 2012

---

Los trabajos de reparación del rodete de la turbina de la U06 fueron realizados con todo el rigor técnico y las buenas prácticas de ingeniería.

El delineamiento adoptado para los reparos otorgó nuevamente al equipamiento una alta confiabilidad

## 10. CONSIDERACIONES FINALES

El siniestro ocurrido en la U06 permitió la capacitación y entrenamiento del personal, principalmente de nuevos empleados (mas del 50% del equipo);

Por otro lado, fue realizada la adquisición equipos, dispositivos y herramientas necesarios para futuras intervenciones similares.

Así mismo, a través de la gestión del conocimiento implementada en el emprendimiento fue posible la creación de una biblioteca con mas de 20.000 fotografías y 35 horas de videos que están siendo utilizados en la revisión de los procedimientos de montaje.

## 11. BIBLIOGRAFIA.

- [1] J. Marra, M. Torales, G. Caballero, A. Ramírez. *Fisuras en el Rodete de la Turbina de la Unidad Generadora U06. Informe Técnico. Superintendencia de Mantenimiento. SM.DT. Central Hidroeléctrica de Itaipu, Hernandarias, 2010.*
- [2] J. Molina, M. Castella. *Recuperação de Trincas na Roda da Turbina da U06. Sumário Executivo. Superintendencia de Mantenimiento. SM.DT. Central Hidroeléctrica de Itaipu, Hernandarias, 2010.*
- [3] J. Gummer, *Itaipu Binacional Service Purchase Order CT/5009/05 Unit 6 Runner Cracking Report 12/10/10- October 12, 2010.* Victoria, Australia, 2010.
- [4] S. Gomes, F.Cunha. *Inspeção e Instalação de Anel de Desgaste Rotativo Sobressalente. Procedimento. Itaipu U06.* Voith Hydro. São Paulo, 2011.
- [5] T. Szabo, A. Bueno. *Procedimento para Reparo da Trinca na Pa 11. Itaipu U06.* Voith Hydro. São Paulo, 2011.
- [6] T. Szabo, A. Bueno. *Procedimento para Remoção do Aro de Desgaste da Coroa no Rotor da Itaipu Unidade 6. Itaipu U06.* Voith Hydro. São Paulo, 2011.