

## CRITERIOS PARA EL SUMINISTRO Y ENSAMBLE DE ALABES DE ROTOR DE TURBINA DE VAPOR DE 300 MW BAJA PRESIÓN PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA

Galo Bertin  
Especialistas en Turbopartes, S.A. de C.V.  
Cuauhtémoc No. 3, Fracc. Industrial San  
Pedrito Peñuelas, México  
galobertin@hotmail.com  
+52 (442) 2206895

Jorge A. Felix  
Especialistas en Turbopartes, S.A. de C.V.  
Cuauhtémoc No. 3, Fracc. Industrial San  
Pedrito Peñuelas, México  
jorgefz@hotmail.com  
+52 (442) 2206895

Octavio Quijano  
Especialistas en Turbopartes, S.A. de C.V.  
Cuauhtémoc No. 3, Fracc. Industrial San  
Pedrito Peñuelas, México  
oqp8@hotmail.com  
+52 (442) 2206895

### RESUMEN

*Este trabajo presenta algunos de los criterios principales a considerar desde la inspección, desmontaje y montaje de alabes de diferentes tipos de raíz de un rotor de turbina de vapor de Generación eléctrica, teniendo como finalidad contar con un rotor confiable, cumpliendo con el diseño original del equipo y con normas y estándares internacionales.*

### ABSTRACT

*This work presents some of the main criteria to consider from the inspection, disassembling and assembly of blades of different types by root of steam turbine of the power plant, the principal proposal is to have a reliable rotor, fulfilling with the original design of the equipment and norms and international standards.*

### NOMENCLATURA

Turbina de vapor, Alabe, Raíz de alabe.

### 1. Introducción

La rehabilitación mayor de rotores de turbinas a vapor de plantas de generación termoeléctricas con capacidad de 300 mw, es una necesidad permanente en equipos de mas de 15 años de operación, donde los tiempos de rehabilitación y

costos representan, para las centrales, variables de peso al evaluar el detrimento del ingreso en la perdida de generación por falta de rotor de repuesto y altos presupuesto de mantenimiento.

La oportunidad de reducir costos y la falta de ingresos por generación, es evitando que los equipos viajen extra fronteras, sumando altos costos y tiempos, en transporte, embalaje, impuestos, precio internacional etc....

La rehabilitación local es la solución óptima. En México existen empresas que cuentan con la capacidad, competitividad, calidad y técnica para realizar este tipo de servicios.

Nuestro artículo presenta la rehabilitación mayor de un rotor de turbina a vapor de 300 MW de capacidad cuyo alcance consiste en el cambio de cinco hileras de alabes, la fabricación completa de alabes de la rueda 1-2, fabricación sellos interetapas, estudio de borosonia, realización de E.N.D. y fabricación de varias partes del ensamble del rotor de la turbina.

### 2. Desarrollo.

#### PRIMERA ETAPA

Reconocimiento de los daños que presenta el rotor y evaluación de los requerimientos de reparación solicitados por el cliente.

Se evaluaron en el proceso de inspección los daños ocasionados por desgaste, deformación geométrica del rotor, fatiga del material, falla de partes, etc....

### INSPECCION DIMENSIONAL DEL ROTOR

Medición de las principales partes de desgaste contra dimensiones de diseño, como son sellos interpasos (laminillas), bandas de alabes, dimensiones de ajustes importantes para la eficiencia térmica de la turbina.



El estado de un rotor de turbina es en gran medida el resultado de la correcta operación y cuidados en arranques, paros de maquina, correcta lubricación, vacío en la descarga, temperatura de vapor, calidad de vapor, velocidad de la maquina y la operación del sistema de

control. Cuando estos parámetros se encuentran fuera de control dejan huellas y las encontramos como **desgaste, deformación, fatiga de material y fallas de partes del ensamble.**



### LA DEFORMACION DEL CUERPO DE TURBINA

Se determina midiendo la deflexión a lo largo del rotor o concentricidad (run-out mecánico) y la perpendicularidad de las bridas de acoplamiento, el registro de estos valores se analizó y se determinó que cumplieran con valores permisibles.

### METALOGRAFIAS

Nuestra compañía realizó metalografías a lo largo y en varios puntos del cuerpo del rotor así como medición de dureza en áreas adyacentes con la finalidad de determinar si la condición de propiedades mecánicas en el cuerpo de la turbina hubiese cambiado, los reportes de estos ensayos arrojaron como resultado una matriz de martensita revenida en todos los puntos inspeccionados, cuya dureza es de 30-32 HRC de manera homogénea. No se detectaron microcracks.





### EXTRACCION DE HILERAS DE ALABES

La rueda de alabes 1-0, presentó la mayor dificultad para el desensamble, pues se encontraron cascarillas en los claros de ajuste de alabes, la cual consistía en aleación de óxido y sales del vapor, la cual presentó alta resistencia a la fractura en el esfuerzo de corte al empujar axialmente el pie del alabe sobre la guía de la rueda. Nuestro promedio diario en las primeras dos semanas fue de 1.5 alabes por día, lo que repercutiría en el programa dos meses. Se mejoró nuestra técnica debilitando la costra de unión, donde el costo de aprendizaje fue mayor al estimado.

La rueda de alabes 1-1 no dejó de presentar resistencia durante el proceso de deslizamiento, pero después de aplicar la técnica de debilitamiento de la cascarilla y siendo la raíz de esta etapa de menor área de recorrido, su extracción resultó muy cercana en tiempo contra lo planeado.





Finalmente para la rueda de alabes 1-2, el método de extracción fue completamente diferente, debido al reducido espacio de maniobra y se decidió utilizar el método de mayor seguridad, barrenando axialmente hasta cortarlos en su vertical, proceso lento y costoso, pero seguro, para no dañar la guía de alojamiento de alabes.

### INSPECCION BOROSÓNICA

La inspección borosónica tiene como objetivo detectar y localizar, circunferencial y axialmente, discontinuidades superficiales y volumétricas en al menos 100 mm de profundidad a partir de la superficie del barreno central y a lo largo del mismo. Para su realización se requiere de los siguientes equipos principales: computadora con programas especializados para el análisis estadístico de los datos recopilados, dispositivos para la generación y recepción de pulsos ultrasónicos, sonda automática de inspección con un cabezal de tres transductores ultrasónicos de inmersión y bomba peri-estática. la aplicación de esta inspección cumple con especificaciones particulares como son:

**ASTM-A-418-94** STÁNDAR TEST METOD FOR ULTRASONIC EXAMINATION OF TURBINE STEEL ROTOR FORGINGS

**ASTM E-214-01** STANDAR PRACTICE FOR IMMERSED ULTRASONIC EXAMINATION BY THE REFLECTION

METHOD USING PULSED LONGITUDINAL WAVES

**ASTM-A-939** STANDAR TEST METHOD FOR ULTRASONIC EXAMINATION FROM BORED SURFACES OF CILINDRICAL FORGINGS.

**ASTM E-1001-04** STANDAR PRACTICE FOR DETECTION AND EVALUATION OF DISCONTINUITIES BY IMMERSED PULSE-ECHO ULTRASONIC METHOD USING LONGITUDINAL WAVES.

Es requisito necesario remover el tapón central que se aloja en las bridas del acoplamiento, donde es necesario honear el barreno para la correcta lectura de los sensores en su trayectoria por el barreno.

Al termino de la inspección **EL ANALISIS CONCLUYÓ QUE EL ROTOR NO PRESENTABA NINGUNA INDICACIÓN RELEVANTE QUE NO LE PERMITIERA SEGUIR OPERANDO BAJO SUS CONDICIONES DE DISEÑO.**







### TERMINO DE LA EXTRACCION DE LAS CINCO HILERAS DE ALABES

Se procedió a limpieza y lavado con solventes. El departamento de calidad en su inspección de claros y ajustes de alabes de cada rueda reportó que las guías de las cinco ruedas tenían una gran área de incrustación de óxido y sales, el espesor 6 AL 9 DE NOVIEMBRE DE 2007, VERACRUZ, MÉXICO

tan fino como el claro de ajustes de los alabes permitía el ensamble forzado, pero realizable. La responsabilidad de aceptar el montaje en esta condición o la de remover la incrustación fue turnada al departamento de ingeniería. Se requirió de paciencia, herramienta especial y el ingenio de los mecánicos de piso, para remover las costras de las casi 500 guías de alabes.



### ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

E.N.D. en las guías porta alabes, alabes, remaches del bandaje de las hileras de alabes y en los platos de acoplamiento lado generador y lado turbina. Estos fueron realizados basados en las normas ASTM-E-165 (líquidos penetrantes), ASTM-E-709 (partículas magnéticas) y ASTM-E-114 (ultrasonido industrial), y fueron desarrolladas por personal calificado como nivel II de acuerdo a la práctica recomendada SNT-TC-1a para el desarrollo de ensayos no destructivos.

Las guías porta alabes y los alabes de un rotor de turbina son sometidas a esfuerzos durante la operación del equipo. Esta condición propicia que estas zonas sean susceptibles a fallas de tipo fisura o agrietamiento. En el caso de este rotor se realizó la inspección con partículas magnéticas visibles con la finalidad de descartar la presencia de fisuras previo al ensamble de los alabes de cambio. El espacio entre etapas del rotor era limitado y no facilitaba el uso de yugos o puntas de contacto, se construyó una bobina magnética elíptica para facilitar el acceso a las zonas de trabajo en la inspección. Previo a la inspección se verificó que el campo magnético tuviese la intensidad necesaria para formarse y que la dirección de flujo magnético fuese constante. Para ello se utilizó un verificador de campo magnético. Las guías porta alabes para los alabes de cambio fueron inspeccionadas utilizando un yugo magnético. El resultado de esta inspección fue satisfactorio, pues no se encontraron indicaciones relevantes.



**E.N.D. A TETONES** para el análisis volumétrico y determinación de fisuras del remachado de tetones se empleó la técnica de ultrasonido industrial, y el resultado de esta inspección fue que cada uno de los remaches generados se encontraba libre de fallas internas. La sanidad superficial de los tetones se verificó utilizando líquidos penetrantes visibles, lo cual también arrojó resultados satisfactorios.





**E.N.D A LAS BRIDAS DE ACOPLAMIENTO** lado generador y lado turbina. En este caso la inspección consistió en la aplicación de líquidos penetrantes visibles tanto en las caras axiales como en el cuello que les une al rotor. El objetivo de esta examinación fue el de determinar que el par torsor generado en los puntos de acoplamiento generador-turbina-turbina no hubiese propiciado la aparición de fracturas o degollamientos. La inspección determinó que este rotor no presentaba ninguna de las fallas anteriores.

#### **TERMINO PRIMERA ETAPA**

La reseña de las actividades descritas de la rehabilitación lo consideramos como el término de la primera fase, teniéndose contra el programa un retraso de 39 días. Reportando al cliente el estado del rotor de acuerdo al análisis de las inspecciones y reportes de los mismos, como se describe a continuación.

#### **1º ANALISIS DE DESGASTE**

La inspección visual reportó que el rotor presentaba

Desgaste normal de la operación en zona de sellos, en zona interetapas, zona chumaceras, platinas de las ruedas no contempladas para la rehabilitación y en los perfiles de los alabes restantes.

#### **2º ANALISIS DE DEFORMACION**

La inspección dimensional en deflexión (run-out mecánico) dejó ver que el equipo mantiene su concentricidad a lo largo y las bridas de acoplamiento se mantienen con la perpendicularidad aceptable.

#### **3º LAS INSPECCIONES DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS AL ROTOR**

REPORTARON UN ELEMENTO LIBRE DE FALLA, FATIGA O PERDIDA DE PROPIEDADES MECANICAS.

#### **4º EL REPORTE DE LA INSPECCIÓN BOROSÓNICA CONCLUYÓ QUE EL**

ROTOR NO PRESENTABA NINGUNA INDICACIÓN QUE NO LE

PERMITIERA SEGUIR OPERANDO BAJO SUS CONDICIONES DE DISEÑO.

La recomendación dictó que como el proceso de nucleación de fisuras se origina por la fatiga termomecánica y por el fenómeno de termofluencia lenta (creep), se recomienda volver a inspeccionar el rotor dentro de ocho años de operación.

Posiblemente en el inicio del artículo no expuse que dentro

Del alcance de rehabilitación se especificaba que si el rotor

Presentaba deformación se debería enderezar y presentar al cliente el método para su aprobación.

**¡LA TAREA SERÍA CASI IMPOSIBLE Y EL TIEMPO QUE TOMARÍA IMPREDECIBLE! FINALMENTE NO FUE NECESARIA EN BASE A LA INSPECCIÓN Y NOS SENTIMOS RECOMPENSADOS Y CON GRAN ANIMO DE RECUPERAR LA NOVATADA.**

#### **SEGUNDA ETAPA**

##### **ENSAMBLE ALABES RUEDAS L-0**

como punto importante en la operación del ensamble de alabes es el cumplimiento del balance de peso-momento en la rueda. Este cálculo se eliminaría si todos los alabes tuvieran el mismo peso, pero la manufactura de estos no es tan precisa y la diferencia en gramos debe ser equilibrada. La tarea de cálculo no fue necesaria, los alabes que nos proporcionó el cliente venían marcados con un orden determinado. Nuestro departamento de ingeniería determinó se registrarán los pesos de los alabes de acuerdo a la distribución para generar por nuestra cuenta el



cálculo y conocer el rango de equilibrio de peso-momento del fabricante.

El ensamble de alabes de la rueda 1-0 es por medio de la unión por soldadura, entre grupos de 10 alabes, como se aprecia en la imagen. Soldadores calificados y mecánicos de piso son los responsables de asegurar la alineación axial de alabes antes y posterior de la soldadura, así como de mantener el mismo arco (paso de alabes) en el ensamble



**RESONANCIA** en el diseño de las turbinas de vapor los alabes indudablemente podrían ser el tope de la lista de los componentes donde trabajan los mas expertos ingenieros. Existen gran cantidad de técnicas en análisis de alabes complementados con modelos matemáticos, evaluando los efectos combinados de esfuerzos alternativos y esfuerzos constantes en la operación. Los fabricantes de turbinas por requerimientos de códigos de diseño y estándares internacionales requieren de realizar el cálculo del nivel de resonancia de cada agrupación de alabes de cada rueda, asegurando que los rangos de velocidad de operación de la turbina están fuera de frecuencias naturales.

Determinamos que una vez ensamblados y agrupados los alabes se realizarían registros de resonancia física, excitaríamos los grupos en un alto rango de frecuencias registrando la respuesta de cada grupo en sus frecuencias para tener referencia en su futura operación.







**ENSAMBLE ALABES RUEDAS L-1**, las operaciones realizadas en esta rueda son técnicamente idénticas a excepción de:

- A) los alabes son de menor longitud.
  - B) la unión de grupos de alabes no se realiza con soldadura,
- Es por medio de platinas y ranuras espaciadas con precisión, evitando deformar los alabes.

Se fijan alabes y platinas por el proceso de remachado de los tetones de alabes consistente en la deformación del metal por medios mecánicos, con el fin de generar la silueta propia para cada alabe en específico. Debido a que durante este proceso es posible que se generen agrietamientos o desprendimientos en el material del alabe, es altamente recomendable verificar la sanidad interna de los tetones, así como la superficie resultante en el proceso de remachado. Para el análisis volumétrico de los remaches se empleó la técnica de ultrasonido industrial, y el resultado de esta inspección fue que cada uno de los remaches generados se encontraba libre de fallas internas. La sanidad superficial de los tetones se verificó utilizando líquidos penetrantes visibles, lo cual también arrojó resultados satisfactorios.

**FABRICACIÓN Y ENSAMBLE DE ALABES RUEDA L-2** la fabricación de los alabes de la rueda L-2 se realizó en base a los estándares de

diseño y manufactura propiedad de nuestra compañía. Describiremos los principales puntos en el desarrollo de ingeniería del alabe de esta etapa.

Análisis del material y estudio de propiedades mecánicas, determinando la especificación internacional de cumplimiento del material. Elaboración de dibujo de diseño con dimensionamiento del perfil tipo elipse a lo largo de la hoja, dimensionamiento del pie de alabe tipo pino con tolerancias para cumplimiento de ajustes en la guía de acuerdo al diseño original. Generación del modelo tridimensional del alabe en software de diseño.

Se realizó la manufactura de prototipo en centro de maquinado empleando el software de maquinado del modelo diseñado por el departamento de ingeniería. La fabricación de los 124 alabes fue realizada en dos centros de maquinado en 110 días.

Con respecto al programa de rehabilitación aprobado por el cliente al término de esta operación se había concluido el tiempo de entrega.

**FABRICACION DE PLATINAS DE ALABES L-2** al igual de la rueda L-1 los alabes se agrupan por platinas y se fijan por el proceso de remachado, la técnica, los pasos de realización y los puntos de cumplimiento son idénticos al descrito en la rueda L-1. Lo relevante en este proceso es la dificultad de manufactura de la platina, en su diseño la cara de contacto con el grupo de alabes es angulado y las caras de sello de la platina son radiales y en dos escalones. La volumetría de la platina en el software de modelaje reflejó mayores dimensiones que del material adquirido, debido a la falta de percepción del ingeniero de producción del volumen ocupado de la platina en el espacio al montaje. Finalmente se solucionó adicionando a la manufactura un proceso de forja.



### 3. Resultados

#### TERMINO DE REHABILITACION DE ROTOR DE TURBINA

El proceso final de la rehabilitación fue el maquinado de las laminillas de sello interpasos que se ensamblaron nuevas, de las tres bandas de



platinas ruedas 1-1 y rueda 1-2, la cara axial de los alabes 1-2 y caras axiales de platinas, el ensamble del tapón del barreno central y pulido de zonas de chumaceras.

#### REGISTROS DE LA REHABILITACION

Se realizaron más de 200 registros a lo largo de la realización de la rehabilitación, dando certeza de la calidad y el cumplimiento de los requisitos del cliente como del cumplimiento de los requisitos técnicos de normas, especificaciones, códigos y nuestros procedimientos internos, incluidos dentro de nuestro sistema de gestión de la calidad certificado en ISO 9000-2000.



#### TIEMPO DE ENTREGA

LA REALIZACIÓN DE LA COMPLETA REHABILITACIÓN DEL ROTOR CON LA INSPECCIÓN Y APROBACIÓN DEL

CLIENTE FUE DE 345 DÍAS LO QUE REFLEJO UN RETRAZO DE 45 DÍAS.

#### 4. Conclusiones

COMPROBAMOS QUE NUESTRO TRABAJO SE PUEDE CALIFICAR COMO EFICÁZ AL ENTREGAR EL ROTOR REHABILITADO CON EXCELENTE CALIDAD Y CON EL CONOCIMIENTO QUE, AL DÍA DE ESTA PRESENTACIÓN, LA TURBINA TIENE APROXIMADAMENTE 2 AÑOS INTERRUPTIDOS CON CONDICIONES DE OPERACIÓN ÓPTIMAS Y GENERANDO LA POTENCIA DE DISEÑO.

SE ADQUIRIÓ CONOCIMIENTO PARA REALIZAR LA PRÓXIMA REHABILITACIÓN NO SOLO CON EFICACIA SINO TAMBIEN CON EFICIENCIA.

LAS COMPAÑÍAS CON LA NECESIDAD DE REHABILITAR ROTORES HASTA DE 300 MW PODRÁN NACIONALMENTE TENER CERTIDUMBRE DE ADQUIRIR SERVICIOS CON COSTOS COMPETITIVOS Y MANTENER INGRESOS POR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA CON SEGURIDAD AL PROGRAMAR SUS MANTENIMIENTOS MAYORES DENTRO DE NUESTRA FRONTERA.



### Referencias

- [1] American Society for Testing and Materials, ASTM.
- [2] American Petroleum Institute, API.
- [3] Barrios Galo, Hernández Manuel, Cruz José. , Procedimientos internos de Especialistas en Turbopartes, S.A. de C.V., 1995.
- [4] International Standard ISO 1940/1-1986 e International Standard. ISO/FDIS 11342
- [5] International Standard ISO-9001:2000.

