



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

---

Titulo del Trabajo:

*Cambio de cojinetes esféricos (rótulas) del mecanismo interno de movimiento de álabes del rodete de turbinas de la CHY*

Autor: Alfredo Daniel Arce Gómez

*Sector Mantenimiento/Área Mecánica  
Departamento Técnico  
Entidad Binacional Yacyretá*

Central Hidroeléctrica Yacyretá-Ayolas  
Teléfono: (072) 222149-Int. 3688  
Fax: (072) 222149 Int. 3667  
E-mail: [alfredo.arce@eby.gov.py](mailto:alfredo.arce@eby.gov.py)

**Resumen:**

Después de la puesta en servicio de las primeras unidades hidrogeneradoras de la Central Hidroeléctrica Yacyreta aparecieron fallas en las rótulas originales del mecanismo de movimiento de álabes del rodete debido a la falta de lubricación entre las partes de la rótula, que a pesar de trabajar sumergidas en aceite y tener un orificio de lubricación no podían lubricarse por las altas cargas, a la cual estaban solicitadas. Inicialmente el fabricante VOITH reemplazó el modelo original por un modelo de rótula auto lubricada con un revestimiento de un material denominado KARON V. De los mantenimientos programados se pudo evidenciar que la vida útil de estos recubrimientos en nuestras unidades esta entre 7 y 10 años de servicio. El trabajo se basó en la necesidad de sustituir estas piezas que están dentro de la cadena cinemática del rodete de turbina durante las Paradas Programadas para mantenimiento es decir realizarlo sin desarmar totalmente la Unidad y realizarlo con personal propio.

En esta presentación se mostrará el procedimiento paso a paso utilizado para lograr ese objetivo.

**PALABRAS CLAVES**

VOITH, Rótula, Rodete, KARON V

## 1 - Introducción

La Central Hidroeléctrica Yacyreta posee 20 unidades hidrogeneradoras con turbinas hidráulicas del tipo Kaplan, con las sges.

### CARACTERÍSTICAS ELECTROMECAÑICAS

KAPLAN de eje vertical acoplada directamente al generador	
CAUDAL Unidad – Mínimo	376 m <sup>3</sup> /s
CAUDAL Unidad – Máximo	830 m <sup>3</sup> /s
SALTO NETO NOMINAL	21,3 m
CAUDAL p/ Salto Nominal	794 m <sup>3</sup> /s
POTENCIA NOMINAL	154 MW
POTENCIA MÁXIMA	160 MW
VELOCIDAD ROTACIÓN	71,4 rpm
DIAMETRO RODETE	9,5 m
PESO RODETE	278 Tn
CANTIDAD DE ALABES	5
CANTIDAD DE PALETAS DEL DISTRIBUIDOR	24

El sistema de movimiento de álabes tiene una cadena cinemática compuesta básicamente por un servo motor hidráulico cuyo cilindro tiene acoplado en la punta inferior una cruceta, y un sistema de transmisión de movimiento a través de un conjunto de pernos de conexión y bielas conectadas al eje oscilante del álabe.

Las bielas, dos por álabe a su vez tienen dos rótulas o cojinetes esféricos que además de vincularlas al eje oscilante del álabe y al perno de conexión por medio de unos pernos (perno de biela), sirven para la alineación de las piezas durante los movimientos, ya que estas rótulas tienen dos grados de libertad.

Inicialmente estas piezas fueron rótulas convencionales de origen alemán con orificio y ranura de lubricación.

Dado que trabajan totalmente sumergidas en aceite hidráulico se esperaba que la lubricación funcionara correctamente, pero, después de la puesta en marcha a pocos años empezaron a colapsar.

Se estimó que las cargas actuantes en el sistema son de una magnitud tal que no permiten que el aceite se introduzca entre las pistas de la rótula para formar la película de aceite necesaria para la buena lubricación.

Al no formarse la película de aceite entran en contacto las dos superficies (metal-metal) y la fricción a la que se exponen hace que las piezas se rompan.

Este hecho se generó durante la vigencia de la garantía del contrato de provisión de las turbinas razón por la cual el fabricante cambió el diseño de las rótulas y adoptó un modelo auto lubricado que tiene origen en la industria aeroespacial. Se diseñaron para uso en los rotores de helicópteros.

Las rótulas elegidas son de fabricación norteamericana tienen un recubrimiento de un material denominado KARON V en las zonas de contacto con el perno (parte cilíndrica) y en la pista esférica de la parte fija de la pieza (anillo externo).

Estas rótulas fueron instaladas entre los años 1.999 y 2.000.

## **2 -Detección del problema**

Durante la vigencia de la garantía VOITH decidió cambiar el diseño del perno de conexión de álabe por un diseño más robusto y mejor diseñado desde el punto de vista del alivio de tensiones y se llevó a cabo este cambio a cargo del fabricante entre los años 2.006 al 2.008.

Para instalar los nuevos pernos de conexión de alabes se tuvo que retirar rótulas de los pernos de conexión de álabe viejos que se reinstalaron en los pernos de conexión de álabe nuevos.

Para ese efecto se aprovecharon las paradas de máquinas de 30.000 horas y se fueron inspeccionando todas las unidades.

Se verificó que en un porcentaje superior al 50% los revestimientos de las rótulas presentaban desgaste del KARON V y en un 20% el desgaste era total en algunas zonas es decir llegaron a trabajar metal-metal observándose incluso rozamientos bastantes severos.

### **2.1 Toma de decisión de cambio**

A la luz de estos datos a fines del año 2.008 la EBY tomó la decisión de cambiar la totalidad de las rótulas de las 20 unidades, para lo cual inició los trámites de compra de 200 rótulas en el año 2.009.

### **2.2 Dificultades detectadas en la programación**

#### **2.2.1 Adecuación de cronograma**

Una vez tomada la decisión de ejecutar los cambios se trabajó en la adecuación del cronograma de Parada Programada para realizar la tarea durante los mantenimientos de rutina ya establecidos y realizados a cada 30.000 horas de funcionamiento.

#### **2.2.2 Recursos propios o de terceros?**

En ese momento también se decide enfrentar la tarea con recursos propios es decir no tercerizar el servicio,

#### **2.2.3 Herramientas y dispositivos**

El personal de Mantenimiento Mecánico de la EBY no tenía experiencia en la tarea, hecho que dificultó el diseño de las herramientas y dispositivos necesarios y el plazo para el desarrollo de la tecnología necesaria fue muy corto.

#### **2.2.4 Ausencia de procedimiento**

No se disponía de un procedimiento normalizado para la ejecución del cambio.

### **3 Procedimiento**

Se adoptó como guía de desarme el procedimiento desarrollado por la EBY en los años 1.999 al 2.001 donde se realizaron la inspección de los 20 rodets de turbina por motivo del término de la garantía del fabricante y en el cual se llevaba a cabo la bajada del cono del rodete y la desvinculación de álabes para verificación de las chavetas guías de la cruceta del rodete.

#### **3.1 Paso a paso**

##### **Parada de máquina**

3.1.1 Parada de máquina con álabes en posición cerrado y montaje de plataforma de mantenimiento del rodete;

##### **Vaciado de aceite**

3.1.2 Vaciado de aceite del cubo y cono del rodete;

3.1.3 Apertura de escotilla paso de hombre y limpieza inicial del interior del cono;

##### **Fijación de álabes**

3.1.4 Soldadura de topes mecánicos en al cubo del rodete para fijar la posición de los álabes;

##### **Bajada del cono**

3.1.5 Soldadura de 3 pares de cáncamos en el lado externo del cubo y cono del rodete para la bajada del cono;

3.1.6 Retiro de la chapa cubre bulones de fijación del cono de rodete (corte arc air);

3.1.7 Soldadura de un par de cáncamos, uno en el cubo de rodete y otro en el revestimiento del tubo de aspiración para instalar un elemento que sirva como monorriel para el retiro de las piezas internas del cubo de rodete;

3.1.8 Bajada del cono con 3 aparejos y tornillos guías;

3.1.9 Limpieza profunda del interior del cubo y cono del rodete;

##### **Desvinculación de álabes**

3.1.10 Retiro de los pernos de biela inferiores. Peso aprox. 30 Kg. (cant. 5), estos tienen un espárrago M24 con tuercas y dos arandelas de aprox. 10 Kg de peso c/u.

3.1.11 Retiro de bielas. Peso aprox. 170 Kg. c/u (cant. 10);

3.1.12 Retiro de los pernos de biela superiores. Peso aprox. 30 Kg. (cant. 5), estos tienen un espárrago M24 con tuercas y dos arandelas de aprox. 10 Kg de peso c/u.

##### **Cambio de rótulas**

3.1.13 Retiro de rótulas inferiores (instaladas en perno de conexión de álabe) Peso aprox. 26 Kg c/u (Cant. 5);

3.1.14 Retiro de rótulas superiores (instaladas en eje oscilante de álabe) Peso aprox. 26 Kg c/u (Cant. 5);

3.1.15 Mecanizado (pulido) de alojamientos superiores (eje oscilante);

- 3.1.16 Mecanizado (pulido) de alojamientos inferiores (perno de conexión);
- 3.1.17 Inspección de eje oscilante por END, PM, LP y Ultrasonido;
- 3.1.18 Inspección de perno de conexión por END, PM, LP y Ultrasonido;
- 3.1.19 Pretensado de rótulas con dispositivo tipo abrazadera;
- 3.1.20 Enfriamiento de rótulas pretensadas con hielo seco obtenido a partir de tubos de CO<sub>2</sub>, Se enfrían hasta aprox. -31°C;
- 3.1.21 Montaje de rótulas inferiores;
- 3.1.22 Montaje de rótulas superiores;

#### **Vinculación de álabes**

- 3.1.23 Colocación de pernos de bielas superiores y bielas;
- 3.1.24 Colocación de pernos de biela inferiores;

#### **Izaje y cierre del cono de rodete**

- 3.1.25 Izaje del cono con aparejos y tornillos guía;
- 3.1.26 Torqueado de bulones de fijación del cono al cubo;
- 3.1.27 Prueba de estanqueidad con aire comprimido;
- 3.1.28 Soldadura de chapa cubre bulones;
- 3.1.29 Limpieza final del interior del cubo y cono del rodete;
- 3.1.30 Cierre de escotilla paso de hombre;
- 3.1.30 Prueba de sellado de escotilla con 5000 litros de aceite;
- 3.1.30 Alambrado de seguro de bulones de escotilla paso de hombre;

#### **Desmovilización**

- 3.1.31 Retiro de cáncamos del cubo y cono de rodete;
- 3.1.32 Retiro de cáncamo del revestimiento del TA;
- 3.1.33 Retiro de topes mecánicos de álabes;
- 3.1.34 Amolado, Tratamiento de superficie y aplicación de esquema de pintura en zonas soldadas en lado externo del cubo de rodete, cono de rodete y revestimiento del TA;
- 3.1.35 Retiro de plataforma de mantenimiento;

#### **Puesta en servicio**

- 3.1.36 Tareas finales
- 3.1.37 Puesta en servicio.

### **3.2 Dificultades enfrentadas durante la ejecución**

Durante la ejecución se encontraron algunas dificultades tales como

Montaje de las rótulas. La dificultad fue obtener la diferencia de temperatura ideal entre pieza contraída y dilatada que permita el montaje de manera adecuada sin que se crucen las rótulas ni exijan esfuerzos muy elevados para la inserción de la rótula en su alojamiento. Visto que la dilatación térmica es directamente proporcional al coeficiente del material y la diferencia de temperatura.

Inicialmente se intentó montar las rótulas enfriando en un freezer normal a -10°C y la contracción obtenida requería un montaje con excesiva interferencia, lo que llevaba a que las rótulas se crucen durante el proceso, esto representaba retirar y empezar de nuevo.

Como segunda alternativa se enfriaron las rótulas con hielo seco obtenido desde CO<sub>2</sub> en tubos a aprox. -30°C por aprox. 1 hora y al mismo tiempo se precalentaron los alojamientos hasta aprox. 38°C con reflectores de 1000 W. No resultó porque los

**IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

---

reflectores dilataban los alojamientos de manera ovalada de acuerdo a la incidencia del calor de la lámpara.

Como tercera alternativa se fabricó un dispositivo y se insertó una lámpara en el centro del alojamiento para intentar obtener una dilatación uniforme lo que se consiguió y ahí surgió un nuevo problema, pues el calor absorbido por las piezas a aprox. 32°C consumía casi inmediatamente el “frío” utilizado para la contracción de las rótulas debido a la diferencia de masa entre las piezas.

Finalmente se optó por enfriar las rótulas pretensadas con hielo seco a aprox. -34°C durante aprox. 15 horas lo que se logró fabricando el hielo seco directamente sobre las rótulas en un freezer común y no precalentar los alojamientos.

Ajuste de las rótulas al alojamiento. Por más que las rótulas sean nuevas, fabricadas bajo la misma especificación y de un solo fabricante al pretensarlas varían en centésimas y a veces en décimas en el diámetro lo que sumado a las deformaciones de los alojamientos dificultaba bastante el montaje. Solución adoptada: En un periodo fuera de las paradas programadas se fueron pretensando y midiendo el diámetro externo de las rótulas una a una de modo a comparar con el diámetro de los alojamientos para facilitar el ajuste con la interferencia requerida durante el montaje.

Fabricación de hielo seco. Las boquillas convencionales de los tubos que comercialmente son para extinguidores se congelan junto con el CO<sub>2</sub> y el hielo seco en escarcha se va formando dentro de la boquilla, para evitar esto se tiene que ir golpeando la boquilla de manera a que la escarcha vaya cayendo al freezer y no la tapone. Esa acción de golpear el plástico congelado hace que este se vaya rompiendo de manera que queda inutilizado. La solución adoptada fue fabricar en el taller boquillas de otro material, con un diseño más robusto y con el difusor más corto. El material adoptado fue el teflón.

Paralelo a eso se fabricaron bolsas de tejido jean con boca ajustable por un cordón, donde se fabrica la escarcha en un ambiente cerrado resultando esto en un mejor rendimiento del CO<sub>2</sub> disponible. En la primera unidad intervenida se utilizaron 390 Kg. de CO<sub>2</sub> y actualmente se utilizan alrededor de 230 Kg. por máquina.

Desarrollo de dispositivos y herramientas. Para sortear este inconveniente inicialmente se llegó a un acuerdo con la empresa CIE S.A. quien nos facilitó las herramientas y dispositivos que utilizaron anteriormente en ocasión de ejecutar este mismo trabajo para VOITH.

Si bien se iniciaron los trabajos con este material cedido por el CIE S.A. se fueron mejorando los dispositivos de extracción/instalación con herramientas hidráulicas adquiridas para el efecto, con el diseño y fabricación de nuevos equipos que faciliten la tarea aumentando el nivel de seguridad del personal en el manoseo de piezas pesadas y la adquisición de herramientas como aparejos y otros de capacidad suficiente, pero de dimensiones físicas menores de modo a reducir el peso y posibilitar una mejor movilidad en el reducido ambiente de trabajo que es el cubo del rodete.

Superposición de tareas incompatibles en el mismo recinto. Esta tarea se superpuso con la necesidad de reparación de daños por cavitación en los álabes del rodete. El amolado y la soldadura de los álabes tiene una alta emisión de partículas sólidas y gases que contamina el ambiente y hace difícil la convivencia con una tarea tan pesada y con ajustes de precisión como es el de desmontaje/montaje de los componentes del cubo de rodete. Para salvar esta situación se tomó la determinación de trabajar en



**IX SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

---

horarios diferenciados para ambas tareas y se creó un turno nocturno para las tareas de reparación de daños por cavitación en los álabes.

### **Conclusiones**

Sobre lo actuado se evidencia que la inspección periódica en la CHY es muy importante para el buen mantenimiento de los distintos componentes de las Unidades Hidrogeneradoras principalmente en una central que desde la puesta en marcha y hasta hoy 16 años después sigue generando con un salto inferior al nominal con todas las consecuencias que esta situación puede generar.

El diseño de rótula autolubricado se muestra bastante confiable dentro de un rango de vida útil razonable es decir la relación costo/beneficio de cambiar las rótulas a cada 10 años de servicio en una parada rutinaria de mantenimiento es altamente favorable visto que para el cambio no se pierde tiempo excesivo de generación y al realizarlo con personal propio el costo de reparación no se ve incrementado en el presupuesto de manera significativa.

### **Bibliografía**

-FUNDAMENTOS DE TRANSFÊNCIA DE CALOR E DE MASSA. Frank P. Incropera / David P. de Witt Editora LTC rio de Janeiro 1999

-YACYRETA HIDROGENERATING UNIT, OPERATION & MAINTENANCE MANUAL VOL 1. Voith and GE 1994

-KAMATICS KARON<sup>®</sup> Design Guide, KAMATICS Corporation, Bloomfield, Connecticut