

## **REPARACIÓN, CENTRADO Y REDONDEO DEL ROTOR DE UN GENERADOR HIDROELÉCTRICO DE 111 MW.**

### RESUMEN

El presente trabajo pretende mostrar las tareas ejecutadas para recuperar a sus condiciones normales de operación un alternador hidroeléctrico de 111 MW.

En noviembre de 1999 se escucharon fuertes ruidos y se observaron oscilaciones en la carcasa del estator de la unidad.

Se realizaron consultas con el fabricante y en febrero del año 2000 se realizó un recentrado del eje del grupo turbina-alternador con respecto al centro del estator no lográndose los resultados esperados.

A la luz de los mismos el fabricante sugirió realizar un redondeo del rotor mediante cuñas con interferencia.

En ese período también aparecieron rotas piezas de transmisión del par mecánico de la rueda polar al anillo magnético del rotor del alternador, así como también diferentes componentes del cojinete guía superior, que dejaron indisponible a la unidad. Sin los elementos necesarios para poder realizar el redondeo sugerido, con un plazo de entrega de los mismos mayor a los seis meses, con la unidad indisponible por elementos mecánicos rotos, se tomó la decisión de realizar un rediseño y el centrando del anillo magnético con respecto al eje del grupo.

El trabajo se realizó, insumiendo aproximadamente un mes y medio de trabajo logrando disminuir las vibraciones.

A continuación se realizó un seguimiento de las vibraciones en el estator del alternador y en setiembre del año 2005 asociado a una época de baja hidraulicidad se observó un incremento de las vibraciones, pero a diferencia del año 2000 teniendo ahora los elementos para realizar el redondeo (adquiridos durante el año 2001) se decidió intervenir nuevamente sobre el alternador completando el procedimiento sugerido por el fabricante agregando al rotor cuñas con interferencia.

## 1.0 INTRODUCCIÓN

Se trata de un generador inaugurado en el año 1982, de eje vertical acoplado por manguito abulonado al de la respectiva turbina. Cuenta con un cojinete- guía bajo el rotor, lubricado en baño de aceite refrigerado por agua la cual circula por una serpentina sumergida en él.

### DATOS GENERALES DEL GENERADOR.

Potencia nominal 111 MVA.  
Factor de potencia 0.9.  
Tensión nominal 15 KV.  
Frecuencia nominal 50 Hz.  
Rotación nominal 88.2 RPM.  
Velocidad crítica del eje 360 RPM.  
Entrehierro nominal 19,05 mm.

#### Estator

Corriente de salida del alternador 4276.7 amp.  
Diámetro interno del núcleo 10883.9 mm.  
Diámetro externo del núcleo 11455.4 mm.  
Altura 1727 mm.  
Peso 170 Ton.

#### Rotor

Corriente de excitación 926 amp.  
Número de polos 68.  
Peso total de polos 113 Ton.  
Diámetro externo anillo magnético 10337.80 mm.  
Diámetro interno anillo magnético 9061.45 mm.  
Altura del paquete 1186 mm.  
Peso del anillo magnético 252 Ton  
Peso del rotor sin eje 430 Ton  
Carga total sobre el cojinete de empuje 486 Ton.  
 $GD^2$  39000 Ton/m<sup>2</sup>

El diseño del alternador prevé movimientos radiales del anillo magnético o sea permite que se dilate y que se contraiga, manteniendo su centro durante los arranques y paradas. No posee ningún elemento sensor capaz de detectar fenómenos vibratorios en la unidad. Desde el punto de vista eléctrico posee una amplia lista de protecciones.

En noviembre de 1999, apareció en el panel de alarma de la máquina 1, la alarma de tierra rotor, acompañada de ruidos fuertes similares a roces mecánicos y además de vibraciones del estator del alternador detectables a simple vista.

La alarma de tierra rotor, los ruidos y las vibraciones sólo aparecían cuando se excitaba el alternador, desapareciendo cuando se suprimía la misma.

A continuación se dejó la unidad indisponible realizándose una inspección visual de la totalidad del rotor, del estator (se retiraron 2 polos), se midió el entrehierro y se realizó un ensayo de alterna rotor. A excepción de los valores de entrehierro que dieron valores menores a los esperados, el resto de los valores obtenidos se encontraron dentro de lo normal. Por otro lado se desarmó para su inspección, la tapa de la cuba de aceite del cojinete guía superior y los patines encontrándose las luces mecánicas de los mismos fuera

del intervalo sugerido en los planos de montaje, a su vez presentando zonas de arrastre de metal blanco.

Para descartar problemas en la turbina se inspeccionaron los alabes del rodete no visualizándose nada anormal.

Posteriormente se procedió a realizar medidas de vibraciones en el cojinete guía superior y balanceo mecánico del rotor

El resultado de los ensayos mostró valores de vibraciones en el cojinete guía superior muy por encima de los valores máximos tolerables por la norma ISO 7919-5 y además mostraron que no había problemas de desbalanceo mecánico.

En enero del 2000 se realizó una consulta con el fabricante y en febrero con la participación de un supervisor del fabricante se realizó un relevamiento de medidas de vibraciones en la base del alternador, medidas de entrehierro e inspección visual del estator y rotor.

Luego de la inspección el fabricante envió las conclusiones y las recomendaciones, las que divide en medidas correctivas y medidas preventivas.

Dentro de las medidas correctivas sugirió:

- 1 Fase.

Centrado del cojinete guía en relación a la cruceta inferior.

Centrado de la cruceta y el rotor en relación al estator.

Limpieza de los patines.

Ajuste de las luces mecánicas del cojinete.

Balanceo mecánico del rotor.

- 2 Fase.

Redondeo del rotor.

Redondeo del estator

Alineación turbina- Alternador.

Dentro de las medidas preventivas:

Optimizar el régimen de operación (pocos arranques y paradas).

Optimizar intervalo de operación (Carga ideal por encima del 50 %).

Instalación de monitoreo de vibraciones.

El 23 de febrero dieron comienzo los trabajos para ejecutar la fase 1 y se terminaron el 1 de marzo. Ese día se puso en marcha la unidad realizándose nuevamente los ensayos de vibraciones. Estos ensayos mostraron que si bien había mejorado el nivel de vibraciones en el cojinete guía superior, las vibraciones radiales en el estator de la unidad se mantenían altas al excitar.

En marzo se instalaron dispositivos para medir la deformación radial del anillo magnético y en abril se recibió el informe del fabricante sugiriendo realizar los trabajos de la fase 2 para lo cuál se necesitaba la fabricación y suministro de un sistema de calentamiento del anillo magnético (resistencias), chavetas verticales para interferencia del anillo magnético/ armadura del rotor, chavetas de torque y bloques de respaldo.

Plazo de entrega de los suministros 6 semanas a partir de la orden de compra y 6 semanas más para ejecutar y terminar los trabajos en el rotor.

Casi simultáneamente con el informe recibido y en inspección realizada al rotor aparecieron piezas de torque fisuradas y rotas así como diferentes piezas del cojinete guía superior, quedando la unidad indisponible.

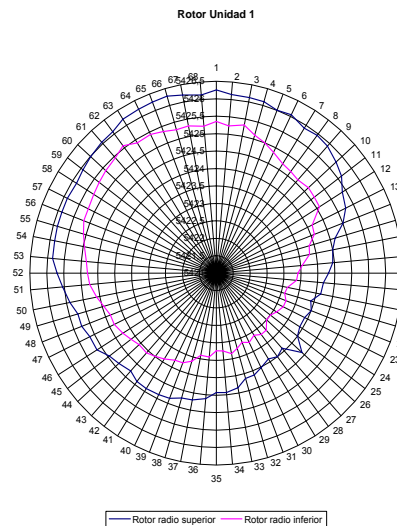
Se dimensionaron y se instalaron nuevas piezas de torque, y se centró el anillo magnético mediante procedimiento definido por personal Técnico de la Central Hidroeléctrica y avalado por la Gerencia, lográndose disminuir las vibraciones.

Se comenzó a realizar un seguimiento de las vibraciones en el estator del alternador y en setiembre del año 2005, asociado a una época de baja hidraulicidad y por ende de un número alto de arranques y paradas de la unidad, se observó un incremento de las vibraciones por lo cuál se decidió intervenir nuevamente sobre el alternador y completar el

procedimiento sugerido por el fabricante para la recuperación del rotor agregando cuñas con interferencia.

## 2.0 MEDIDAS DE ENTREHIERRO/ DEFORMACIÓN RADIAL DEL ANILLO MAGNÉTICO.

La medida de entrehierro del alternador se realiza centrando el eje de la turbina, ajustando los patines del cojinete guía superior y midiendo el hueco entre el estator y el rotor, haciendo una medida en la zona superior del alternador y una medida inferior. Para obtener la forma del rotor se toma un punto fijo del estator y se gira el rotor midiendo el entrehierro cada vez que uno de los polos se enfrenta al punto fijo. Para obtener la forma del estator se toma como referencia un polo y se gira realizando medidas entre el polo y el estator.



<b>Polo Fijo</b>	<b>Nro 1</b>		<b>Estator Fijo</b>	<b>Fijo</b>
<b>Medida Sup</b>	<b>Medida Inferior</b>	<b>Polo</b>	<b>Medida Sup</b>	<b>Medida Inferior</b>
17,1	18	<b>1</b>	17,1	18
17,2	17,7	<b>5</b>	17,3	18,3
17,2	17,6	<b>9</b>	17,2	18,5
18	18,1	<b>13</b>	17,7	18,8
19,2	19	<b>17</b>	18,3	19,2
18,6	19	<b>21</b>	18,7	19,5
18,4	18,8	<b>28</b>	18,6	19,4
17,4	18,1	<b>32</b>	18,5	19,4
17	17,8	<b>36</b>	18	19,2
16,7	17,3	<b>40</b>	17,8	18,9
17,2	16,7	<b>44</b>	17,8	18,6
17,3	17,4	<b>48</b>	17,4	18,3
17,7	18	<b>52</b>	17,1	18
17,8	18,6	<b>56</b>	17,1	17,7
17,9	18,5	<b>60</b>	17,1	17,7
17,4	19,1	<b>64</b>	17	17,8
17,2	18,2	<b>68</b>	17,2	18,1

Fue muy importante conocer también, cómo era el comportamiento del anillo magnético con la máquina en movimiento. Para ello se instalaron medidores de desplazamiento, los cuales permitieron realizar una estimación aproximada no sólo de la forma alcanzada sino también de los valores de excentricidad los cuales se acercaban al valor de 5 % valor máximo permitido por el fabricante. Se alcanzaron a medir desplazamientos del anillo entre 0.3 y 1 mm.



### 3.0 COJINETE GUÍA SUPERIOR

El cojinete guía superior consiste en 18 segmentos con superficies de deslizamiento revestidas en metal blanco. Estos segmentos, distribuidos alrededor del eje están soportados por un anillo fijado a una estructura integrada a la cuba de aceite en la cual se sumerge una serpentina por la que circula agua para enfriamiento del aceite.

El ajuste de la luz mecánica de cada segmento se realiza por medio de espárragos de ajustes con tuerca y contratuerca y debe mantenerse entre 0.18 y 0.28 mm. Durante los trabajos de recuperación del rotor del alternador, también se inspeccionó el cojinete guía.

De acuerdo a cálculos realizados se había estimado que debido al corrimiento del anillo magnético y a las medidas de entrehierro se habría desarrollado una fuerza de desbalanceo del orden de las 70 Ton, la cual se descargaba a través del cojinete. Una vez abierto se confirmó la existencia de fisuras en superficies de patines, fisuras en las placas posicionadoras de los segmentos y aplastamiento y fisuras circunferenciales en los espárragos de ajuste.



Las piezas rotas fueron sustituidas por piezas de repuesto y los segmentos fueron reparados retirando el metal blanco de la zona de la fisura con buriles pequeños y taladro tratando de hacer una cola de milano en el metal blanco de base para que el material de aporte se adhiriera mejor. Se soldó metal blanco con oxiacetilénica (pico 0) y llama carburante. La varilla de aporte está compuesta básicamente por estaño y algo de antimonio y cobre. Se quitó la sobremonta con rasqueta y se reiteró el ensayo de tintas penetrantes sobre la zona reparada y terminada.

### 4.0 MEDIDA DE VIBRACIONES.

Durante todo el proceso del problema y finalmente luego de ejecutados los trabajos de reparación se realizaron medidas de vibraciones en la tapa del cojinete guía superior utilizándose dos sensores desfasados 90° aproximadamente entre si y además en puntos de la periferia superior de la carcasa del alternador para diferentes estados de carga, como ser: Girando en vacío, girando excitada sin carga y finalmente con diferentes cargas.

Las medidas realizadas al inicio del problema nos permitieron afirmar que:

- Las vibraciones no provenían de un desbalanceo mecánico ni de un problema en la turbina.
- La frecuencia a la que se manifiesta el problema era a la frecuencia de giro de la unidad.
- Y además que el nivel de vibraciones descendía al aumentar la potencia activa.

Los valores de vibración medidos en la unidad eran superiores a lo indicado por la norma para un servicio continuo y 88.3 RPM. Para esas condiciones la norma ISO 7919-5 establece como límite aceptable de funcionamiento  $S_{\text{máximo}} = 270$  micras.

Los valores medidos fueron:

Mayores a 600 micras en vacío y excitada,

Y entre 300 y 400 micras a plena carga (111 MW).

Por otra parte los puntos de medida en la periferia de la carcasa del alternador marcaban valores entre 1 y 2 mm de amplitud en sentido radial.

## 5.0 REPARACIÓN DEL ROTOR – SUSTITUCIÓN DE PIEZAS DE TORQUE ORIGINALES-

En mayo de 2000 luego de encontrar algunas piezas de torque rotas, la tarea principal fue la de diseñar nuevas piezas y proyectar su instalación en la estructura soporte del anillo magnético.

El rotor está conformado básicamente de los siguientes elementos.

Armazón del rotor (o rueda polar).

Piezas “U” de torque

Guías radiales.

Anillos magnéticos.

Polos.

Las piezas “U” fabricadas en acero ASTM A36, junto con cuñas del mismo material tienen la función de transmitir el par del eje al anillo magnético. Estas piezas “U” van encastradas al armazón del rotor permitiendo una distribución simétrica del esfuerzo sobre la pieza.

Luego de constatada la rotura de las piezas U cabían dos posibilidades:

- 1.- Retirar las piezas U rotas, 17 en total, y sustituirlas por nuevas, en cuyo caso se necesita un desarme total del rotor, ya que el cambio no se puede hacer con el rotor instalado.
- 2.- Hacer un cambio de diseño.

Se optó por la segunda posibilidad, debido al alto ahorro económico que la misma implicaba, evitando un desarme de grandes características.

Para dimensionar las piezas se consideró el par máximo entregado por la turbina al anillo magnético.

$$W_t = 60 \times 10^3 \times P / \pi \times d \times n$$

$$(W_t) = \text{KN.}$$

$$(P) = \text{KW} = 113000.$$

$$(d) = \text{mm} = 9061.$$

$$(n) = \text{RPM} = 88.2$$

El esfuerzo máximo aplicado sobre cada pieza (U), tomando como modelo una viga empotrada resultó ser 8104 Kgf, un momento torsor de 706 Kgf m y un momento flector de 514,6 Kgf m. La tensión máxima calculada fue de 11,5 Kg/mm<sup>2</sup>. Las piezas se proyectaron soldadas por medio de soldadura de filetes, dimensionándose de forma tal que el cordón soportara los esfuerzos máximos calculados. El cordón obtenido fue de 7.1 mm de garganta y para su cálculo se consideró como modelo una línea sin espesor. Finalmente componiendo los diferentes esfuerzos (tensiones normales y rasantes) se obtuvo un valor máximo de 61,5 Kgf/mm.

Se instalaron 34 piezas de 5 x 5 x 7 in y se colocaron a ambos lados de las piezas de torque originales, pero a diferencia de las anteriores soldadas al armazón del rotor.

El espesor de la chapa del armazón del rotor es de 1 ½ in (38.1 mm). La U se apoyó contra la chapa, se precalentó la misma entre 65 y 70 °C manteniéndose esta temperatura hasta finalizar el trabajo. Se realizaron dos cordones radiales y uno tangencial usando electrodos revestidos AWS E-7018 de diámetro 2,5 mm y finalmente se dejaban cubiertas las piezas con manta de cuero para garantizar un enfriamiento lento.

A los aceros utilizados para la fabricación de las diferentes piezas tanto los almacenados en nuestros depósitos, como los adquiridos se les extrajo muestras para análisis químicos y metalográficos. Se realizaron pruebas por parte de una empresa contratada reconocida, a soldadores con probetas con diseño similar al trabajo a realizar, a fin calificarlos, y cada pieza soldada se ensayó mediante tintas penetrantes y ensayos por partículas magnéticas.



## 6.0 CENTRADO DEL ANILLO MAGNÉTICO

El paso siguiente en la reconstrucción del rotor, era lograr el centrado del anillo magnético respecto al armazón del rotor.

Para eso contábamos con la información obtenida de la última medida de entrehierro realizada. Ella nos mostraba un corrimiento del centro del anillo magnético 0.70 mm a 51° considerando como origen de las coordenadas polares la dirección del polo 1, y como valor de excentricidad 3.55 %.

La excentricidad se define como el cociente entre el corrimiento del anillo magnético y el entrehierro nominal por 100.

El procedimiento consistió en desvincular totalmente el anillo magnético de la rueda polar.

Usando los gatos de frenado de la unidad como gatos elevadores, se levantó el

conjunto aproximadamente 4 mm. Se colocaron apretados gatos mecánicos debajo del anillo magnético inferior. Se bajaron los gatos de "frenado" y en ese momento se desvinculó el anillo de la rueda. Se movió la rueda en la dirección previamente establecido, y se elevó nuevamente la rueda hasta vincularla nuevamente con los anillos. Se retiraron los gatos mecánicos y se bajó el conjunto nuevamente vinculado. Se realizó una medida del entrehierro y se observó el grado de éxito de la operación. Esta se repitió tantas veces como sea necesario. En nuestro caso luego de dos operaciones se obtuvieron los siguientes valores los que se dieron por buenos. El corrimiento del centro del anillo magnético quedo en 0.09 mm, 0° y excentricidad 0.51 %.



Finalmente se procedió a la instalación de todos los elementos que vinculan el anillo magnético con el armazón del rotor y por último se realizó un balanceo mecánico instalándose una contrapesa de 250 Kg.

## 7.0 REDONDEO DEL ROTOR DEL ALTERNADOR.

En el año 2005 se observó nuevamente un incremento en las vibraciones radiales del alternador medidas en su carcasa exterior. Esto motivó una nueva intervención mecánica en el rotor, tratando de evitar que ocurrieran fallas en los elementos mecánicos así como desplazamientos del anillo magnético.

Utilizando el procedimiento entregado por el fabricante decidimos instalar cuñas verticales entre los rayos de la rueda polar y el anillo magnético buscando evitar el corrimiento del centro del anillo magnético así como también de dotar de una forma cilíndrica regular al rotor.

El alternador posee 17 brazos que conforman la rueda polar. Se tomaron medidas de los huecos que quedan entre los brazos y el anillo en ese hueco. Se instalaron cada una de las cuñas construidas en acero ASTM A36 las cuales con anterioridad fueron maquinadas a medida. Las mismas poseen una inclinación de 0.0625 in x pie y 1500 mm de largo aproximadamente.

Para el proceso de calentamiento y dilatación del anillo magnético se instalaron 150 resistencias de 1000 Watt en paralelo. El proceso lleva entre 4 y 8 horas y la temperatura final alcanzada por el anillo fue de 10°C por encima de la temperatura ambiente.

Las cuñas se colocaron primero en frío, luego se marcó la profundidad a la cuál debían llegar para lograr la circularidad del anillo, se calentó el anillo y se insertaron las cuñas hasta la marca predeterminada. Se dejó enfriar y se realizó una medida de entrehierro.

Una vez finalizado el proceso se espera tener una interferencia de 0.6 mm en el radio.

Para finalizar se cortó el tramo de cuña que sobresale del anillo y se ajustaron y se montaron las cuñas en las piezas de torque y en las guías radiales.

Los valores finales obtenidos fueron:

Entrehierro: Promedio de la medida superior 17.2 mm y promedio de la medida inferior 18.2 mm.



	<b>Estator</b>	<b>Fijo</b>
	<b>Medida</b>	<b>Medida</b>
<b>Polos</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>
<b>1</b>	17,2	18,20
<b>5</b>	17,2	18,20
<b>9</b>	17,1	18,00
<b>13</b>	17,2	18,30
<b>21</b>	17,5	18,20
<b>25</b>	17,4	18,20

<b>29</b>	17,2	17,90
<b>33</b>	17,2	18,00
<b>37</b>	17,3	18,60
<b>41</b>	17,3	18,40
<b>45</b>	17,3	18,20
<b>49</b>	17,2	18,20
<b>53</b>	17,3	18,20
<b>61</b>	17,5	18,10
<b>65</b>	17,3	18,10

Corrimiento del centro y excentricidad del anillo magnético.

	<b>superior</b>	<b>inferior</b>
<b>Módulo</b>	0,076 mm	0,067 mm
<b>Ángulo</b>	42.17°	22.97°
<b>Excentricidad</b>	0.400	0.353

Vibraciones.

<b>Estado de Carga</b>	<b>Vibración S<sub>máximo</sub> (µm)</b>
Vacio sin excitar	115
Excitada sin carga	89
30 MW	134
50 MW	94
90 MW	99
111 MW	92

## 8.0 CONCLUSIÓN.

Los trabajos de recuperación del rotor utilizando un alto porcentaje de recursos materiales y humanos propios, lograron devolver al alternador a su condición normal de operación. La unidad se encuentra en servicio y libre de restricciones, la amplitud de las vibraciones medidas en la carcasa del alternador pasaron de 2 mm en el año 1999 a 0.10 mm.

Actualmente está en proceso de compra un sistema de monitoreo de entrehierro dinámico y un sistema de monitoreo de vibraciones de barras en el estator del alternador. Con el monitoreo en tiempo real pensamos obtener información que permita a nuestro personal de mantenimiento tomar decisiones con conocimiento de causa del estado del alternador, pudiendo planificar el mantenimiento según requerimiento; tratando de mejorar la disponibilidad por la reducción de los tiempos de parada de máquina y evitando las paradas forzadas.

## BIBLIOGRAFIA.

Diseño de elementos de máquinas V. M. FAIRES.

Diseño en ingeniería mecánica J. E. SHIGLEY.

Marks Manual del Ingeniero Mecánico.

## BIOGRAFIA DEL AUTOR.

Julio Pastorín es Ingeniero Industrial (Op. Mecánica) egresado en el año 1986 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Entre los años 1987 y 1992 ejerció los cargos de Jefe Mantenimiento Mecánico y Jefe Departamento Mantenimiento en la Central Hidroeléctrica "Rincón de Baygorria" y desde 1992 es Jefe de la Central Hidroeléctrica Constitución.

e-mail [jpastorin@ute.com.uy](mailto:jpastorin@ute.com.uy)

Tel: 099-560.405