



## REPARACIÓN DE LOS POLOS DEL GENERADOR GR-01, CENTRAL HIDROELÉCTRICA ACARAY

Ing. Félix Barrios<sup>1</sup>, Ing. Eduardo Fernández<sup>2</sup>, Ing. Delfin Benitez<sup>3</sup>, Pablo Duarte<sup>4</sup>.

Administración Nacional de Electricidad - ANDE

Hernandarias – Paraguay

### *Resumen*

Este trabajo pretende exponer el procedimiento realizado para la rehabilitación los polos afectados en un evento que dejó indisponible al generador GR-01 de la Central Hidroeléctrica Acaray (CH-ACY). Para poder interpretar el suceso, este texto presenta algunos conceptos básicos sobre el sistema hídrico, como también la función y partes de los elementos vinculados dentro de la instalación, comenta la hipótesis generada en el proceso, así como ensayos que se usaron para el contraste de las mismas. También se describe brevemente los ensayos realizados en la intervención como resistencia de aislación, impedancia, caída de tensión, resistencia óhmica, resistencia de contacto, termografía.

Mostrar el procedimiento aplicado para la reparación de la aislación de la bobina, los dispositivos y mecanismos implementados en las diferentes etapas.

Comentar las principales características eléctricas del polo y sus partes fundamentales, el peligro que implica un mal dimensionamiento de las mismas por el esfuerzo, debido a la aceleración centrífuga a la que está sometida normalmente. Cabe destacar que las reparaciones en los generadores por avería de los polos no son muy frecuentes, siendo ésta, la primera en su tipo realizada en el país.

### *Palabras clave*

Central Hidroeléctrica Acaray – Reparación de polos– Ensayos realizados– Características de los polos.

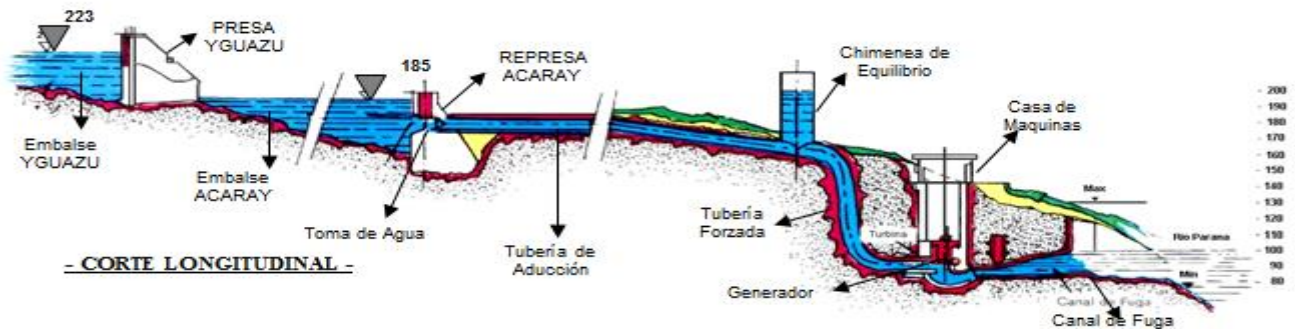
## 1. INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica Acaray (CH-ACY), pertenece en su totalidad al estado paraguayo y es administrado por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE).

La hidroeléctrica aprovecha el desnivel natural de 56 m existente entre los ríos Acaray (Aguas Arriba) y Paraná (Aguas abajo) que mediante una presa mixta de tierra y concreto se eleva a 80 m, logrando desviar de forma artificial el cauce natural del río para su aprovechamiento. En la margen derecha se halla el vertedero de evacuación de crecida, descargas de fondo y evacuación de flotantes en la margen izquierda, la toma de Agua dirige el caudal acumulado a las casas de máquinas ACARAY I y II, a través de las tuberías de aducción I y II, pasando por sus correspondientes chimeneas de equilibrio para luego ir a la tubería forzada donde cada una de las tuberías se vuelven a dividir, alimentando los rodetes de tipo Francis acoplada a un dispositivo donde mediante una conversión electromagnética en el generador, hace posible la transformación de energía mecánica a la eléctrica. **Figura 1** [1].

La casa de máquina Acaray I: cuenta con dos grupos generadores de 56 MVA (GR-01 y GR-02), inauguradas en 1968 que este 2018 están cumpliendo 50 años de servicio al país y la casa de máquinas Acaray II : con dos grupos generadores (GR-03 y GR-04), a la fecha, en proceso de repotenciación, al finalizar lo último tendrán una potencia de 75 MVA cada uno. En total la central tendrá una potencia instalada de 263 MVA.

El GR-01 es una máquina síncrona de eje vertical constituida por una parte estática (estator) y otra dinámica (rotor). El estator compuesta por una estructura de acero fijada directamente al hormigón y el núcleo magnético formado por un conjunto de chapas apiladas y prensadas de acero al silicio de granos no orientados de alta permeabilidad magnética que proporciona la trayectoria para el flujo magnético, con ranuras en la zona frontal, donde van alojadas las barras. El bobinado tiene la configuración de tipo imbricado con cuatro ramas en paralelo por fase y aislamiento de clase B, formando tres fases con conexión del neutro en estrella que se realiza externamente. El rotor es la parte dinámica, constituida por una estructura principal conocida como corona polar por la cual van ancladas los cuerpos polares y a su vez sobre el cual van montados los devanados polares de esta manera formando los polos del rotor que tienen por objetivo establecer un campo magnético constante por medio de una corriente DC que circule por su devanado. Por la corona polar o llanta se encuentra acoplado el rodete de la turbina por medio de un eje vertical.



**Figura 1: Sistema Hídrico de la Central Hidroeléctrica Acaray**

## 2. LOS POLOS DEL GRUPO GENERADOR GR-01

El rotor del GR-01 Cuenta con 28 polos salientes conectados en serie, su objetivo es establecer un campo magnético constante por medio de una corriente nominal de 1420 A y 156 VDC. que fluye a través de su devanado, debe atravesar los conductores del devanado del estator y se requiere variación de la densidad del campo magnético con respecto al tiempo para que se induzca una fuerza magneto motriz (f.e.m) en el devanado del estator. [2].

### 2.1 Parte constructiva de los polos

#### 2.1.1 Núcleo polar

Están contruidos con una alta resistencia estructural y mecánica debido a que este elemento se somete a elevadas fuerzas centrífugas debidas a la dinámica rotacional, ejerciendo en sus componentes grandes esfuerzos mecánicos de flexión y torsión, por lo cual deben estar muy bien diseñados y asegurados a la llanta polar a través de las ranuras en forma de **cola de milano**; el cuerpo polar está formado por una pila de chapas laminadas de acero que se mantienen unidas por tirantes, tornillos y placas en los extremos mantienen una que garantizan presión constante en las laminaciones. En la cara del polo se encuentra **la expansión polar** que está diseñada con un radio de curvatura con el fin de reducir el espacio de entrehierro, para tener una mayor densidad de flujo en este punto y onda de inducción con el menor número de armónicos. En ella se incorpora el **bobinado amortiguador** formado por 9 barras dispuestas axialmente y cortocircuitadas por pletinas en los extremos que se conectan al polo contiguo formando un devanado del tipo jaula de ardilla que sirve para atenuar los efectos de ciertas perturbaciones.

#### 2.1.2 Bobina polar

Formadas por pletinas de cobre arrolladas en 31 espiras aisladas entre sí con mica y barniz impregnada con aislamiento de clase B a excepción de los 3 polos reparados, que están aisladas con papel nomex y resina pre impregnada de clase F, también se encuentra aislada todo el perímetro interno del devanado, las caras de la primera y la última espira, separándola del cuerpo polar y así obstruyen el camino hacia la tierra. Los terminales del devanado son conexiones rígidas y se conectan directamente con el terminal del polo adyacente por medio de tres bulones y una capa de aleación de plata y cobre entre ellos para asegurar el contacto eléctrico y disminuir los puntos calientes por la corriente que lo atraviesa.

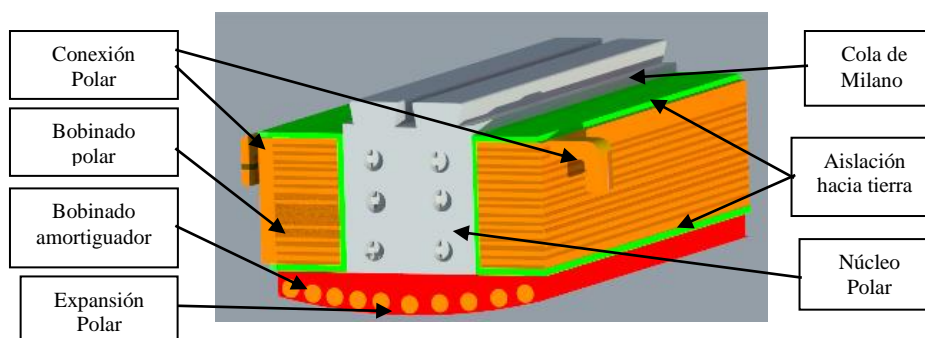


Figura 2: Las principales partes del polo.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA FALLA

#### 3.1 Falla por pérdida de las conexiones

La unidad Generadora GR-01 quedó fuera de servicio, debido a la apertura del interruptor 86 E, por una señal de bloqueo proveniente del regulador automático de tensión (RAT). Debido a una falla en el circuito de excitación.

Se realizó el seguimiento del circuito de excitación donde, un ensayo de continuidad eléctrica entre los anillos colectores, indicó una apertura del circuito, y la inspección visual confirmó la sospecha, siendo claramente visible la ausencia de las conexiones polares **figura (3) y (4)**, daños por impacto en los devanados polares, estáticos y en el núcleo del estator como también en algunas de la tapas guías de ventilación forzada, todo por efecto del desprendimiento de una parte del conector que quedó transitando durante el proceso de parada de la máquina tras el bloqueo. Después de una minuciosa inspección se pudo hallar uno de los tres bulones correspondiente a la conexión. Confirmándose así la desintegración total del conjunto de piezas restantes que forman dicha conexión.



Figura 3 y 4: se evidencia la envergadura del daño a los terminales.

#### 3.2 Falla por cortocircuito entre espiras.

Entre los trabajos realizados al rotor se encuentra algunas mediciones eléctricas tales como la de inyección de corriente AC y la de resistencia de aislación al conjunto de los polos en el pozo, extraído, antes y después de la limpieza donde se verificó una atenuación relativa de voltaje en el polo 9 en los diferentes escenarios con relación a las otros, siendo esta según la IEEE std 115-1995 un indicio de cortocircuito entre espiras. [3] Con este diagnóstico dicho polo se sumó a los polos contiguos que perdieron sus conexiones para su reparación. Gráfico I

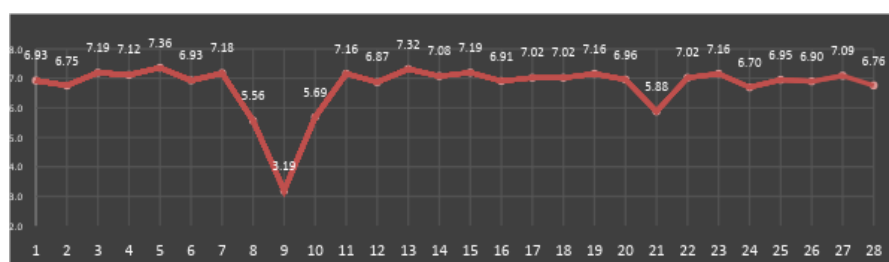


Gráfico I: Atenuación de voltaje en el polo N° 9 extraído y limpio.

## 4. FORMULACION DE LA HIPOTESIS

### 4.1 Falla por esfuerzo mecánico

Pérdida de unión firme y fatiga de los terminales debido a oscilaciones que generaron desplazamientos relativos entre polos debilitando así, tanto los componentes propiamente dichos como sus áreas de contacto. [4].

### 4.2 Falla por esfuerzo térmico.

La alta corriente que circula genera una gran cantidad de calor por efecto joule que podrían no disiparse adecuadamente en ciertas zonas sensibles propiciando el deterioro de aislación entre espiras y contribuir con el deterioro de los terminales.

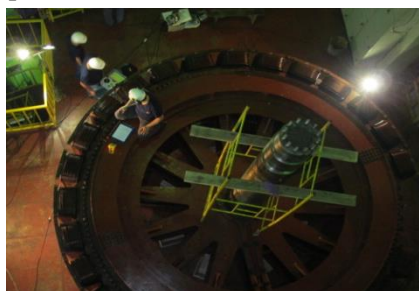
### 4.3 Conclusión

Luego de un exhaustivo análisis de los hechos, de las inspecciones visuales y los ensayos realizados se concluye que la falla fue ocasionada por una combinación de ambas, aunque el mayor contribuyente fue el esfuerzo térmico debido a que la temperatura tiene una fuerte influencia en las características físicas de los elementos vinculados.

## 5. EL ALCANCE DE LOS TRABAJOS PARA LA REHABILITACIÓN DE LOS POLOS

### 5.1 Primera etapa: Ensayos para contraste

- 5.1.1 Resistencia de aislación e Índice de absorción: Los valores registrados de los estados del aislante y los inmediatamente posteriores al evento permitieron determinar el alcance de la avería en el sistema de aislación y aislar los componentes afectados.
- 5.1.2 Resistencia óhmica e Impedancia: Los valores de las resistencias Óhmicas e Impedancias de cada polo fueron datos importantes en el momento de identificar los elementos con fallas entre espiras.
- 5.1.3 Caída de tensión: Este ensayo complementa los de resistencia e impedancia en el momento de identificar fallas entre espiras pero también permite aislar contactos precarios entre terminales cuyos resultados se contrastan con los valores obtenidos en el ensayo de resistencia de contacto.
- 5.1.4 Resistencia de contacto: Los valores obtenidos en esta medición permiten ubicar conexiones débiles los cuales son puntos de mayor probabilidad de falla similar al evento en cuestión.
- 5.1.5 Termografía: Se realizó en momentos de inyección de corriente para identificar puntos con conexión débil, resultados que se contrastan con las mediciones de resistencia de contacto.



**Figura: 5** Medición de caída de tensión realizada al conjunto del rotor

## 5.2 Segunda etapa: Desmontaje de los polos y preparación de las bobinas polares

- Desmontaje de los polos de la llanta: se han fabricados dispositivos mecánicos especiales en la CH-ACY para la extracción de los mismos, en consecuencia del agarrotamiento debido a la acumulación y compactación de partículas contaminantes en los intersticios de los elementos de fijación. **Figura (6 y 7).**
- Separar la bobina polar del núcleo polar: Para este fin se han tenido los mayores cuidados considerando que en el principio los materiales de aislación entre núcleo polar y devanado de campo serían re-aprovechados.
- Fabricar el dispositivo extensor de bobina. Habiendo determinado que la reparación de los polos debían de realizarse en la Central Acaray, se ha desarrollado un dispositivo extensor de bobinas, lo que permitió la accesibilidad a los espacios entre espiras.
- Extraer la vieja aislación de la bobina y el núcleo polar: Para este fin se ha utilizado el arenado considerando que este era el procedimiento más efectivo encontrado para la extracción de los materiales aislantes.
- Reposición de terminales: Se ha utilizado material de cobre macizo conforme al diseño original. Este fue repuesto por Soldadura Oxiacetilénica y para el material de aporte fue utilizado una aleación de plata y cobre.
- Determinación del tipo de aislación: Entre los tipos de aislación analizados que pudiéramos utilizar para la re-adequación de las bobinas polares, estuvieron: Papel DMD, NMN y Nomex (todas con resina líquida y catalizador) y Papel Nomex pre-impregnado, se ha determinado según ensayos de adherencia y tiempo de polimerización que teniendo en cuenta las condiciones físicas del devanado, lo último era lo más adecuado.
- Preparar el material aislante seleccionado: Una vez definido el tipo aislación a utilizar se procede a diseñar y obtener los dispositivos y equipos necesarios para dicha reparación entre los que se citan: fabricación de un horno eléctrico, obtención de resistencias, adecuación del dispositivo extensor de bobina, equipos de soldaduras para inyección de corriente, otros. Además se elaboran los procedimientos de mejor aprovechamiento del material.



Figura 6: Desmontaje del polo averiado



figura 7: Dispositivo de extracción de los polos

## 5.3 Tercera etapa: Re-aislación de bobinas polares.

- Se utilizaron dos capas para la aislación, siendo estas constituidas por segmentos que fueron determinados por la geometría del devanado; las discontinuidades de la primera capa eran compensadas por el solapado de la segunda.
- Durante el montaje de todos los papeles, se deberá resinar con un mínimo suficiente para anclaje, de manera a prevenir desplazamiento del material en el momento de replegado de la bobina.
- Posterior al replegado de la bobina se procede al montaje total del dispositivo de apriete con el cual se suministrara la presión necesaria en cada etapa del proceso de polimerización.



**Figura 8: devanado en proceso de replegado y montaje de la aislación.**

#### **5.4 Cuarta etapa: Procedimientos de cura de la aislación (Polimerización del aislante)**

Para la polimerización total del papel nomex con resina pre impregnada es necesaria la travesía por ciertas fases de temperatura en lapsos muy breves de tiempo, debido a las características físicas del bobinado esto solo se podría lograr con una fuente de alta capacidad térmica, según las investigaciones en la industria se utilizan normalmente grandes hornos en los cuales el calor se transfiere de una atmosfera al objetivo valiéndose tanto del fenómeno de convección como del de radiación.

Teniendo en cuenta los recursos disponibles el método que se utilizó difiere del anterior debido a que se aprovechó el fenómeno del Efecto Joule, siendo la fuente de calor el mismo objetivo. Para poder generar calor en la cantidad suficiente como para variar la temperatura de la bobina a la velocidad requerida por el aislante, se utilizó una fuente de corriente DC de capacidad considerable, la cual exigió una configuración de cuatro máquinas de soldar en paralelo.

En base a datos proveídos por el fabricante del papel aislante se realizó el siguiente procedimiento:

- De la temperatura ambiente calentar la bobina a una temperatura de 80 ° C. en menos de 30 min, para aliviar la tensión del metal.
- Extraer la bobina y aplicar una presión de 10 N / mm<sup>2</sup> y elevar la temperatura a 100 ° C en menos de 30 min.
- Elevar la temperatura a 160 ° C en menos de 30 min.
- Mantener entre 150° c y 160° C durante 2 horas.
- Transcurrido las dos horas desconectar la fuente de calor y reducir la temperatura gradualmente hasta obtener 50 ° C. [5].



**Figura 9: Apriete durante el proceso de curado.**



**Figura 10: resina escurrida y curada.**

---

### 5.5 Quinta etapa: Montaje de la bobina polar reparada al núcleo polar.

- Concluida la re-aislación de la bobina, se procede con su instalación sobre el núcleo polar para lo cual se han realizado todos los controles dimensionales.
- Se vuelven a realizar las mediciones de verificación de integridad del polo realizados inicialmente e indicados en el ítem 5.1 de este trabajo.
- Terminada las verificaciones finales de los polos reparados y habiendo constatado que la reparación fue satisfactoria se procede a montar nuevamente los polos sobre la llanta del rotor.



**Figura 11: Polo reparado listo para el montaje en la llanta.**

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Aprovechamiento hidroeléctrico integral del río Acaray/ ande año 1970
- [2] Generadores hidráulico de 56 mva/ ande pg 14 a 20
- [3] Ieee guide: test procedures for synchronous machines part i--acceptance and ... superseded by ieee std 115-2009 (revision of ieee std 115-1995)
- [4] Bill moore, p.e., “refurbishment solutions for various field pole problems”
- [5] Proceso de curado del papel nomex con resina pre impregnada/dmi aislantes eléctricos.