

MEDICIÓN DE EFICIENCIA GLOBAL DE INSTALACIÓN HIDROELECTRICA, INCLUYENDO TURBINA, GENERADOR, Y CIRCUITO HIDRAULICO

Camilo Andres Jaramillo Villarruel
Empresa de Energía del Pacífico E.S.P. S.A
Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali –Yumbo
E-mail: cjaramillo@celsia.com
Cali - Colombia

Francisco Jose Larrahondo Cobo
Empresa de Energía del Pacífico E.S.P. S.A
Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali –Yumbo
E-mail: flarrahondo@celsia.com
Cali – Colombia

Resumen

Una instalación hidroeléctrica aprovecha la variación abrupta del contenido energético del agua, definido por su posición, su velocidad y su temperatura, entre dos niveles diferentes, la toma y la descarga de la instalación. La eficiencia de los elementos existentes entre ambos puntos (tubería forzada, turbina y generador), dará la eficiencia global del aprovechamiento y, consecuentemente, el salto útil realmente aprovechable para la finalidad de generación eléctrica.

Si la instalación dispone de más de una unidad generadora, caso de la central hidroeléctrica Calima, la combinación del funcionamiento de las mismas, bien para operar a máxima potencia o para operar a máxima eficiencia, según la necesidad, definirá las curvas óptimas de operación de la instalación. Se aprecia que la operación de las unidades, el mantenimiento y la selección de los elementos involucrados, desde el punto de vista de su diseño y calidades, redundará en la maximización de la energía producida por la instalación.

El objeto de los ensayos de eficiencia efectuados sobre uno de los generadores, las cuatro turbinas y el circuito hidráulico de la central hidroeléctrica de Calima, es el

conocimiento de las prestaciones actuales, tanto de las unidades (turbina, generador y grupo), como de la instalación (circuito hidráulico más grupo) con vistas a determinar y definir concretamente las actuaciones más adecuadas que conlleven al incremento de la producción y eficiencia energética de la instalación.

Finalmente se presentará los resultados de eficiencia global de la instalación de la central hidroeléctrica Calima, la cual se puede definir como la relación entre la potencia eléctrica desarrollada por el generador y la potencia hidráulica del salto.

Introducción

La central hidroeléctrica de Calima, perteneciente y operada por la Empresa de Energía del Pacífico S.A E.S.P (EPSA), se encuentra situada en el municipio de Calima-El Darién, departamento de Valle del Cauca (Colombia), formando parte del aprovechamiento hidroeléctrico del río Calima. Se trata de una central a pie de presa cuya misión principal es la generación eléctrica y regulación al Sistema Interconectado Nacional (SIN). En su infraestructura cuenta con un circuito hidráulico con una caída total que oscila entre 201 metros y 229,5 metros, con un

promedio de 220 metros, contiene una bocatoma y una rama inclinada la cual bifurca a las cuatro unidades de generación, donde se tiene unidades Francis de eje vertical del fabricante Hitachi (Japón), con una capacidad de 38,8 MW que giran a 450 rpm, estas unidades poseen un generador del fabricante Toshiba, síncrono a 13,8 KV y una potencia de 37,5 MVA, con 16 polos en su rotor y un factor de potencia de 0,80. Para esta central hidráulica como parte de un proceso de optimización y mejora se ejecutaron ensayos de eficiencia, para el generador número 4, las turbinas 1,2,3, y 4, y la instalación (circuito hidráulico), adicional al proceso se logró la calibración del factor Winter Kennedy, el cual permite tener un valor de medición de caudal en línea, y a la vez tener un valor de eficiencia de la instalación o del grupo o en un caso específico el equipo (generador, turbina, circuito hidráulico).

Metodología

Para los ensayos que se ejecutaron en la central hidráulica Calima se basaron para la eficiencia calorimétrica del generador en tres normas: IEC 60034-1: 2010 Rotating electrical machines – Part 1: Rating and Performance, IEC 60034-2-1: 2014 Rotating electrical machines- Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), IEC 60034-2-2:2010 “Rotating electrical machines-Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests – Supplement to IEC 60034-2-1. En estas normas se define eficiencia como la relación existente entre la potencia de salida del generador y la potencia de entrada al mismo. La fórmula referente es:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{mech} + P_g - P_T}{P_{mech} + P_g} = \frac{P_{el}}{P_{el} + P_T} \quad [1]$$

η – Eficiencia generador

P_{el} – Potencia eléctrica salida bornes

P_{mech} – Potencia mecánica en el eje

P_T – Pérdidas totales generador

P_g – Potencia sistema excitación

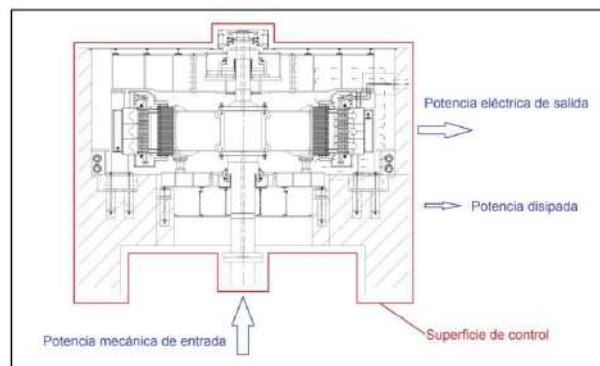


Imagen 1. Esquema simplificado de balance energético de un generador como el de CH Calima

Para las pruebas de eficiencia termodinámica en las turbinas se utilizó como base las siguientes normas: IEC 60041: 1991 “Field acceptance tests to determinate the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pumps turbines”. En esta norma se define el procedimiento a ejecutar para poder representar las prestaciones hidráulicas de una turbina bajo un método de medición directo, y para el caso de la CH Calima consta de una serie de pruebas en funcionamiento en carga de las unidades; con los datos de cada una de ellas se ha construido la curva de eficiencia de la turbina, en total para cada turbina se ejecutaron 14 pruebas en promedio, y el esquema para tener en cuenta se muestra en la imagen 2, para poder calcular la eficiencia de la turbina se utilizó la siguiente ecuación:

$$\eta_T = \frac{P}{P_h} = \frac{P}{E(\rho, Q)_1 \pm \Delta P_h} = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot Q_m \cdot H_n} \quad [2]$$

η_T – Eficiencia turbina

P – Potencia en el eje de la turbina

P_h – Potencia hidráulica del fluido

E – Energía hidráulica específica

ΔP_h – Corrección de la potencia hidráulica

ρ – Densidad del agua circulante

g – Aceleración de la gravedad

Q_m – Caudal activo turbinado

H_n – Salto neto

Por tanto entonces el método termodinámico mide la eficiencia de la turbina conociendo la diferencia de temperaturas entre dos secciones lo más cercanas posibles antes y después del rotor

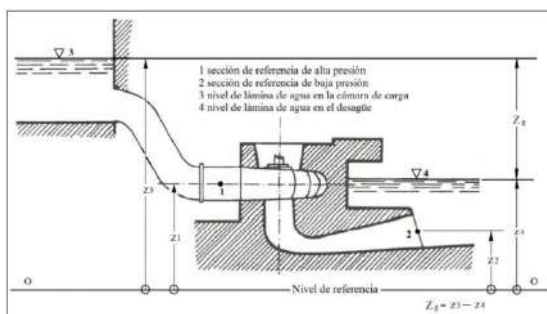


Imagen 2. Esquema de aprovechamiento hidroeléctrico (Fuente IEC 60041:1991)

Adicional durante la ejecución de la prueba de eficiencia termodinámica se utilizó el método diferencial de Winter-Kennedy, lo cual permite tener información tanto del caudal como de la eficiencia. El principio se basa en el hecho de que el caudal circulante por el caracol (Q_{sc}) es proporcional al n -ésimo exponente de la diferencia de presión (ΔP_{W-K}) existente entre dos tomas situadas en el caracol, conforme a las disposiciones dadas por la IEC 60041:1991. La ecuación que relaciona lo anteriormente mencionado es

$$Q_{sc} = K_{W-K} \cdot \Delta P_{W-K}^n [3]$$

Q_{sc} – Caudal circundante por el caracol
 ΔP_{W-K} – Presión diferencial leída en el transductor
 n – Exponente
 K_{W-K} – Constante de proporcionalidad Winter – Kennedy

Siguiendo las indicaciones de la IEC 60041:1991 la incertidumbre total en la eficiencia de la turbina se obtiene a partir de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertidumbres sistemáticas y aleatorias.

Para la medición de la eficiencia del circuito hidráulico en su totalidad, así como la

separación de pérdidas de carga en cada uno de sus elementos, se ha efectuado conjuntamente con las pruebas de eficiencia de cada una de las turbinas y, adicionalmente, se ha efectuado una prueba de funcionamiento secuencial para corroborar los cálculos y determinar, ya de forma experimental, las pérdidas de carga que se producen en la totalidad del circuito y cada una de sus partes constituyentes en las condiciones de operación habituales de la instalación. Al igual que en el caso de los ensayos termodinámicos la norma de referencia ha sido la IEC 60041:1991

$$\eta_c = \frac{H_n}{H_g} [4]$$

η_c – Eficiencia del circuito hidráulico
 H_n – Salto neto
 H_g – Salto bruto

Resultados

Grupo 1.

La curva de eficiencia de la turbina obtenida del ensayo del grupo n° 1 de CH Calima es la propia de una unidad concebida y adaptada para funcionar a máxima eficiencia conjunta del grupo turbina-generator, ya que la potencia máxima de trabajo del generador, donde su eficiencia es máxima, se produce prácticamente en la zona de máxima eficiencia de la turbina, la cual presenta una reserva importante de potencia que no puede utilizarse al estar condicionada por el generador.

Las ecuaciones obtenidas que definen las curvas principales de eficiencia de esta unidad, para las condiciones del ensayo (salto neto entre 223,40 m y 221,91 m), han sido las siguientes:

- Eficiencia de la turbina: $\eta_{t1} = -0,1424 \cdot Q_1^2 + 5,0826 \cdot Q_1 + 43,709$ con $R^2 = 0,997$
- Eficiencia del grupo: $\eta_{g1} = -0,1480 \cdot Q_1^2 + 5,3140 \cdot Q_1 + 39,635$ con $R^2 = 0,998$

- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i1} = -0,1497.Q_1^2 + 5,3171.Q_1 + 39,633$ con $R^2 = 0,998$
- Eficiencia del circuito: $\eta_{c1} = -0,001843.Q_1^2 + 0,004667.Q_1 + 99,962$ con $R^2 = 0,998$

Los máximos de dichas curvas, que se dan en una zona próxima pero fuera de la condición actual de operación limitada a 33.000 kW de potencia eléctrica activa, son los siguientes:

- Eficiencia de la turbina: $\eta_{t1}(\text{máx}) = 89,06 \pm 0,58\%$ para $Q_1 = 17,85 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Eficiencia del grupo: $\eta_{g1}(\text{máx}) = 87,32\%$ para $Q_1 \approx 17,95 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i1}(\text{máx}) = 86,85\%$ para $Q = 17,76 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ y, para este punto:
- Eficiencia del generador: $\eta_a = 98,04\%$
- Eficiencia del circuito: $\eta_c = 99,46\%$
- Potencia en bornas: $P_a = 33.681 \text{ kW}$
- Potencia mecánica en eje: $P = 34.349 \text{ kW}$
- Pérdidas de carga: $\Delta H = 1,20 \text{ m}$
-

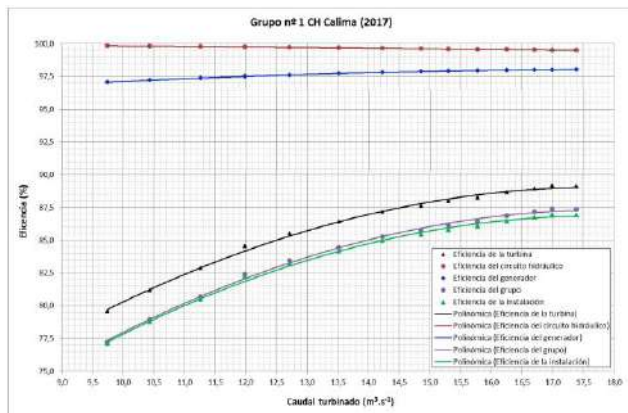


Imagen 3. Curvas de eficiencia de la unidad #1.

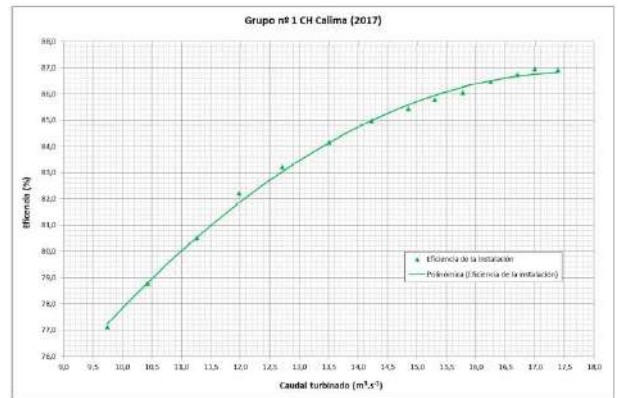


Imagen 4. Curvas de eficiencia global de la unidad #1.

Grupo 2.

La curva de eficiencia de la turbina obtenida del ensayo del grupo nº 2 de CH Calima es la propia de una unidad concebida y adaptada para funcionar a máxima eficiencia conjunta del grupo turbina-generator, ya que la potencia máxima de trabajo del generador, donde su eficiencia es máxima, se produce prácticamente en la zona de máxima eficiencia de la turbina, la cual presenta una reserva importante de potencia que no puede utilizarse al estar condicionada por el generador

Las ecuaciones obtenidas que definen las curvas principales de eficiencia de esta unidad, para las condiciones del ensayo (salto neto entre 223,31 m y 221,81 m), han sido las siguientes:

- Eficiencia de la turbina: $\eta_{t2} = -0,1392.Q_1^2 + 5,0330.Q_1 + 44,080$ con $R^2 = 1,0$
- Eficiencia del grupo: $\eta_{g2} = -0,1452.Q_1^2 + 5,2728.Q_1 + 39,950$ con $R^2 = 1,0$
- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i2} = -0,1465.Q_1^2 + 5,2672.Q_1 + 40,001$ con $R^2 = 1,0$
- Eficiencia del circuito: $\eta_{c2} = -0,001504.Q_1^2 - 0,004007.Q_1 + 100,012$ con $R^2 = 0,997$

Los máximos de dichas curvas, que se dan en una zona próxima pero fuera de la condición actual de operación limitada a 33.000 kW de potencia eléctrica activa, son los siguientes:

- Eficiencia de la turbina: $\eta_{t2}(\text{máx}) = 89,57 \pm 0,57\%$ para $Q_1 = 18,08 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

- Eficiencia del grupo: $\eta_{g2}(\text{máx}) = \text{para } Q_1 \approx 18,16 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i2}(\text{máx}) = 87,34 \%$ para $Q_1 \approx 17,98 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ y, para este punto:
- Eficiencia del generador: $\eta_a = 98,04 \%$
- Eficiencia del circuito: $\eta_c = 99,45 \%$
- Potencia en bornas: $P_a = 34.255 \text{ kW}$
- Potencia mecánica en eje: $P = 34.932 \text{ kW}$
- Pérdidas de carga: $\Delta H = 1,22 \text{ m}$

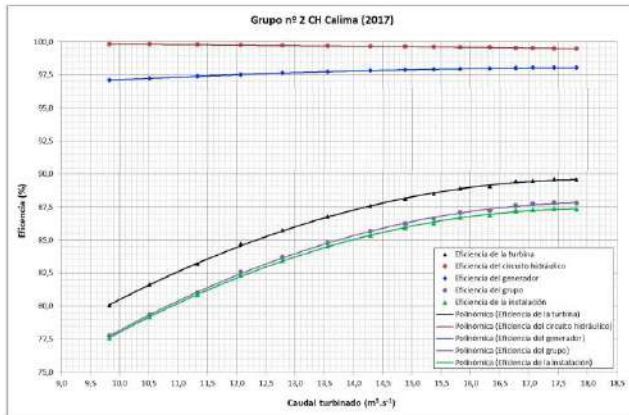


Imagen 5. Curvas de eficiencia de la unidad #2.

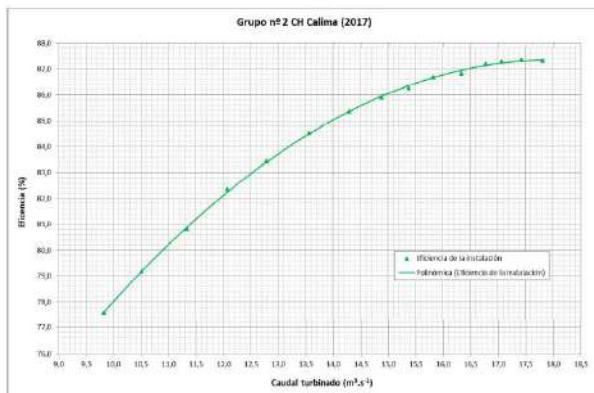


Imagen 6. Curvas de eficiencia global de la unidad #2.

Grupo 3.

La curva de eficiencia de la turbina obtenida del ensayo del grupo nº 3 de CH Calima es la propia de una unidad concebida y adaptada para funcionar a máxima eficiencia conjunta del grupo turbina-generador, ya que la potencia máxima de trabajo del generador, donde su eficiencia es máxima, se produce

prácticamente en la zona de máxima eficiencia de la turbina, la cual presenta una reserva importante de potencia que no puede utilizarse al estar condicionada por el generador.

Las ecuaciones obtenidas que definen las curvas principales de eficiencia de esta unidad, para las condiciones del ensayo (salto neto entre 223,26 m y 221,70 m), han sido las siguientes: Eficiencia de la turbina: $\eta_{t3} = -0,1218.Q_1^2 + 4,6037.Q_1 + 46,012$ con $R^2 \approx 1,0$

- Eficiencia del grupo: $\eta_{g3} = -0,1276.Q_1^2 + 4,8386.Q_1 + 41,9253$ con $R^2 \approx 1,0$
- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i3} = -0,1292.Q_1^2 + 4,8358.Q_1 + 41,9654$ con $R^2 \approx 1,0$
- Eficiencia del circuito: $\eta_{c3} = -0,001638.Q_1^2 - 0,005286.Q_1 + 100,026$ con $R^2 \approx 0,998$

Los máximos de dichas curvas, que se dan en una zona próxima pero fuera de la condición actual de operación limitada a 33.000 kW de potencia eléctrica activa, son los siguientes:

- Eficiencia de la turbina: $\eta_{t3}(\text{máx}) \approx 89,52 \pm 0,57\%$ para $Q_1 \approx 18,90 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Eficiencia del grupo: $\eta_{g3}(\text{máx}) \approx 87,79 \%$ para $Q_1 \approx 18,96 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i3}(\text{máx}) \approx 87,21 \%$ para $Q_1 \approx 18,71 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ y, para este punto:
- Eficiencia del generador: $\eta_a \approx 98,06 \%$
- Eficiencia del circuito: $\eta_c \approx 99,35 \%$
- Potencia en bornas: $P_a \approx 35.707 \text{ kW}$
- Potencia mecánica en eje: $P \approx 36.396 \text{ kW}$
- Pérdidas de carga: $\Delta H \approx 1,44 \text{ m}$

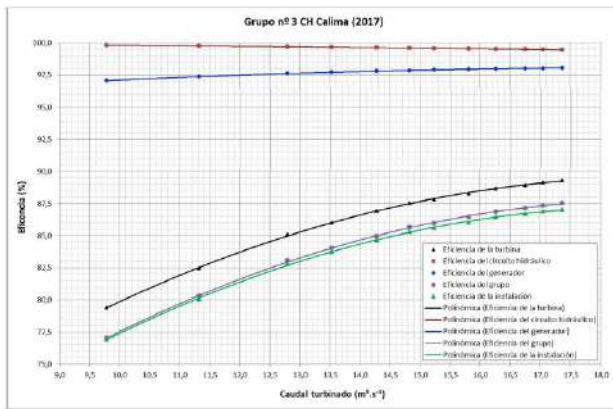


Imagen 7. Curvas de eficiencia de la unidad #3.

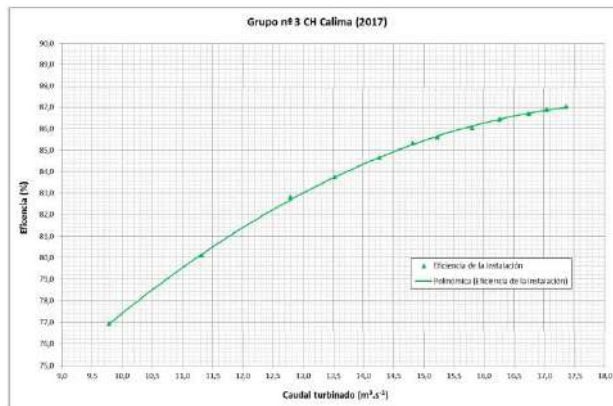


Imagen 8. Curvas de eficiencia global de la unidad #3.

Grupo 4.

La curva de eficiencia de la turbina obtenida del ensayo del grupo nº 4 de CH Calima es la propia de una unidad concebida y adaptada para funcionar a máxima eficiencia conjunta del grupo turbina-generador, ya que la potencia máxima de trabajo del generador, donde su eficiencia es máxima, se produce prácticamente en la zona de máxima eficiencia de la turbina, la cual presenta una reserva importante de potencia que no puede utilizarse al estar condicionada por el generador.

Las ecuaciones obtenidas que definen las curvas principales de eficiencia de esta unidad, para las condiciones del ensayo (salto neto entre 223,58 m y 222,05 m), han sido las siguientes:

- Eficiencia de la turbina: $\eta_{t4} = -0,1309.Q_1^2 + 4,8508.Q_1 + 44,354$ con $R^2 = 1,0$
- Eficiencia del grupo: $\eta_{g4} = -0,1369.Q_1^2 + 5,0912.Q_1 + 40,234$ con $R^2 = 1,0$
- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i4} = -0,1380.Q_1^2 + 5,0860.Q_1 + 40,298$ con $R^2 = 1,0$
- Eficiencia del circuito: $\eta_{c4} = -0,001156.Q_1^2 - 0,005211.Q_1 + 100,047$ con $R^2 = 0,998$

Los máximos de dichas curvas, que se dan en una zona próxima pero fuera de la condición actual de

operación limitada a 33.000 kW de potencia eléctrica activa, son los siguientes:

- Eficiencia de la turbina: $\eta_{t4}(\text{máx}) = 89,29 \pm 0,57\%$ para $Q_1 = 18,53 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Eficiencia del grupo: $\eta_{g4}(\text{máx}) = 87,56 \%$ para $Q_1 = 18,59 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
- Eficiencia de la instalación: $\eta_{i4}(\text{máx}) = 87,16 \%$ para $Q_1 \approx 18,43 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ y, para este punto:
- Eficiencia del generador: $\eta_a = 98,05 \%$
- Eficiencia del circuito: $\eta_c = 99,56 \%$
- Potencia en bornas: $P_a = 33.681 \text{ kW}$
- Potencia mecánica en eje: $P = 35.726 \text{ kW}$
- Pérdidas de carga: $\Delta H = 0,99 \text{ m}$

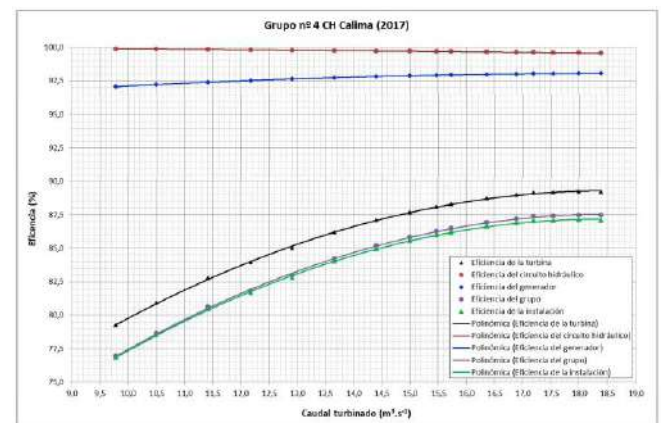


Imagen 9. Curvas de eficiencia de la unidad #4.



Imagen 10. Curvas de eficiencia global de la unidad #4.

Conclusión

El objeto de los ensayos ha sido conocer de forma precisa la eficiencia actual de los elementos principales de la instalación (turbinas, generador y circuito hidráulico) para efectuar el análisis de costos y beneficios de cada una de las posibilidades de actuación que conlleven al incremento de la producción energética de la central mediante su repotenciación en nivel superior o inferior en potencia, y la mejora en eficiencia, considerando:

- Actuaciones sobre el generador (devanados estáticos, núcleo magnético, etc.)
- Actuaciones sobre la turbina (rodete, distribuidor, cámara espiral, etc.)
- Actuaciones sobre el circuito hidráulico (tuberías, válvula de guarda, etc.)
- Exigencias medioambientales (caudal ecológico, calidad del agua, etc.)
- Reducción del riesgo de averías, de los costes de mantenimiento y operación
- Revalorización de los activos

Referencias bibliográficas

60041, U.-E. (Noviembre de 1998). Ensayos de recepción en central de las turbinas

hidráulicas, bombas de acumulación y turbinas bomba, para determinar sus prestaciones hidráulicas. Madrid, España.

- IEC. (1991). Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. Suiza.
- IEC. (2010). Rotating electrical machines . Suiza.
- IEEE. (1996). IEEE:Guide: Test procedures for synchronous machines. *Acceptance and performance testing*. New York, Estados Unidos.

Camilo Andres Jaramillo Ing. Mecánico. Líder Mantenimiento Mecánico Generación Hidráulica EPSA. Experiencia en operación y mantenimiento de Centrales Hidroeléctricas, Actualización tecnológica.

Tel: (57) (2) 321 0000 Ext: 52966

Celular: (57) 3104654444

Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali-Yumbo

E-mail: cjaramillo@celsia.com

Cali – Colombia

Francisco Jose Larrahondo M.Sc. Ing Mecánico. Líder Centrales Menores Generación Hidráulica EPSA.

Tel: (57) (2) 321 0000 Ext: 52621

Celular: (57) 3113397310

Calle 15 No. 29B-30 Autopista Cali-Yumbo

E-mail: flarrahondo@celsia.com

Cali – Colombia