



Innovar + Grupo·epm
Desafíos que transforman vidas 2021
23 al 27 de agosto

Eficiencia y desempeño económico de las unidades de generación de energía con base en los sistemas de refrigeración, para aumentar la **disponibilidad y la potencia generada.**

Andrés Felipe Ramírez Franco
Unidad Operaciones Zona Norte
25 agosto 2021



Contexto

Central Hidroeléctrica Guatapé

Propiedad: Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

Localizada: departamento de Antioquia a 110 Kilómetros al oriente de Medellín.

Tipo: Pelton – Subterránea.

8 unidades de generación de energía - 12 transformadores de potencia.

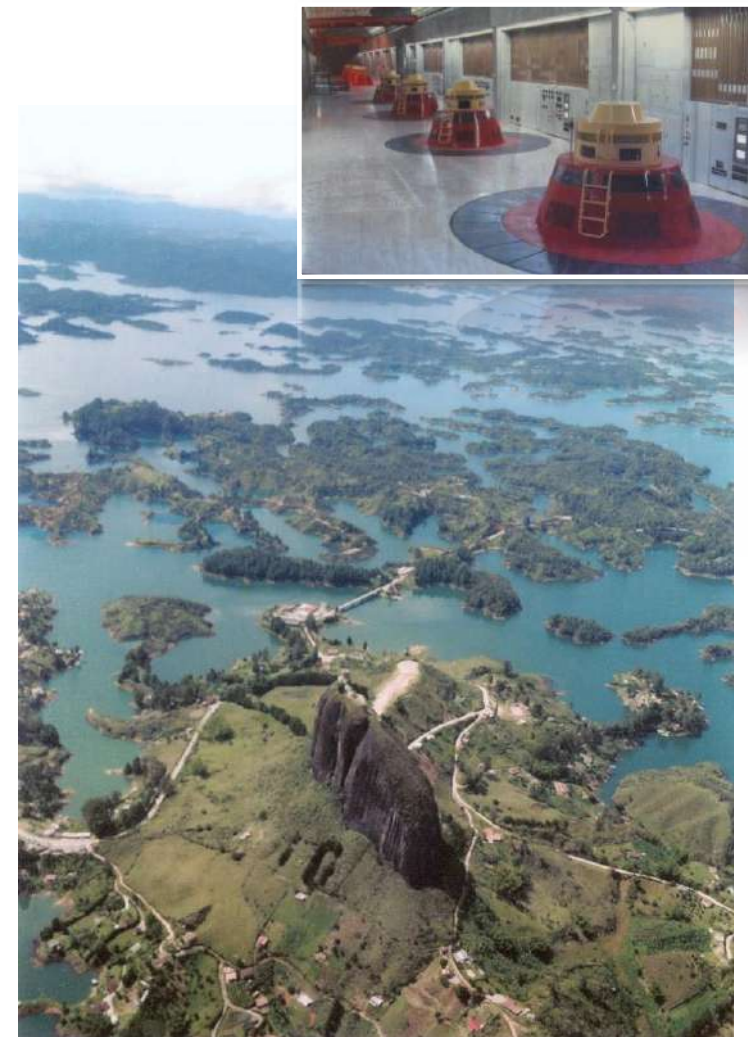
Sistema de refrigeración: tipo abierto.

Construcción: 2 etapas.

Primera etapa: inicio operación en julio de 1971 con 4 unidades de generación de energía de 70 MWh cada una.

Segunda etapa: inicio operación en febrero de 1979 con 4 unidades de generación de energía de 70 MWh cada una.

Total: 560 MWh.



Problemática

Las **altas temperaturas** en los devanados y núcleos de los generadores y de los transformadores de potencia, obligaba a realizar **paradas forzadas** en **promedio cada 5 días por 5 horas**, para cambiar los intercambiadores de calor agua-aire y agua-aceite. Se necesitan 6 personas de mantenimiento para esta actividad - cuadrilla esclava.

La **obstrucción por adhesión** de las altas concentraciones de sedimentos en las paredes de los tubos, **anula paulatinamente el funcionamiento** de todo el sistema de refrigeración abierto, extendiéndose hasta los cojinetes de carga y de turbina.

Daños: en los equipos mecánicos, eléctricos y electrónicos.

En algunas ocasiones, **obligó a desviarse** de los compromisos de la demanda de energía adquirida.



Problemática

3 diseños de 3 fabricantes diferentes:

Generadores.

U1-U2: origen japonés – Mitsubishi con 4 intercambiadores calor agua-aire por unidad.

U3-U4: origen alemán – AEG con 8 intercambiadores calor agua-aire por unidad.

U5-U6-U7-U8: origen brasilero – BBC con 6 intercambiadores calor agua-aire por unidad.

Total: 72. 48 operando + 24 de repuesto.

Transformadores.

12 operando + 1 Repuesto.

7 : origen japonés - Mitsubishi – 2 intercambiadores calor agua-aceite por transformador.

6: origen italiano – Italtrafo – 2 intercambiadores calor agua-aceite por transformador.

Total: 30. 24 operando + 6 repuesto.

La combinación de **diferentes diseños, áreas de transferencia y cantidades** de intercambiadores de calor agua-aire y agua-aceite presentes en el sistemas de refrigeración, no permitía igualar la capacidad de disipación térmica de las unidades de generación, ni de los transformadores de potencia.

No existía estandarización de los parámetros de diseño.



Problemática

Tubería **sin lavar**



Tubería **lavada**



Conceptualización

La fricción es una pérdida de presión al transportar fluidos en una tubería y se debe a la resistencia que ofrecen las paredes del tubo al pasar el fluido, así como también, de los accesorios que oponen resistencia al flujo. Esta resistencia depende de la velocidad a la que pasa el agua y de la rugosidad del tubo, entre más rugosa sea la pared mayor fricción y así mismo mayor pérdida de presión.

En la medida en que el sedimento se adhiere a las paredes de la tubería aumenta la fricción.

La cantidad de fluido que circula a través de una sección de un tubo, en un tiempo determinado, es el caudal.

Si se reduce la presión y la velocidad del fluido, el sedimento se adhiere y si se aumenta la temperatura se incrementa aún más la adhesión.

Tubo limpio



Tubo sucio con sedimento adherido



Problemática

A medida que el sistema de refrigeración disminuye paulatinamente su función de disipación térmica, aumenta la temperatura y se incrementa la adhesión de sedimentos, reduciendo el diámetro de la tubería y con ello disminuye la velocidad del fluido y la superficie interna se vuelve cada vez más rugosa y desigual, exigiendo más presión para que el fluido logre pasar.

Esta condición obligaba a realizar **paradas forzadas** de las unidades de generación y a reducir la **energía generada** hasta en un **5%** equivalente a 28 MWh.

La **cantidad, intensidad y frecuencia** de los picos de temperatura producidos en los generadores, transformadores de potencia, equipos eléctricos y electrónicos, **redujo su vida útil**.



Antecedentes

Se evidencia el **mal funcionamiento** del sistema refrigeración abierto **desde 1978**.

Luego de **prolongadas investigaciones** se **encontró** que el **agua del Embalse Santa Rita generaba incrustaciones** en los tubos de los intercambiadores de calor, en las tuberías y en los accesorios del sistema de refrigeración, ocasionando la **anulación de su función**.

A partir de la identificación del problema se intentaron **múltiples soluciones de diferente naturaleza**, entre las cuales se encuentran los **tratamientos físico-químicos** en el Embalse, en la conducción, en los fosos de bombas y en los túneles de descarga.



Antecedentes

Se construyó un proyecto el **15 diciembre 1991**.

Para dar solución a las deficiencias presentadas en el funcionamiento del sistema de refrigeración abierto de las unidades de generación de energía, ocasionado por la **acumulación de sedimentos en el agua** proveniente del Embalse Santa Rita.

La solución buscaba 2 propósitos:

- Superar de manera definitiva las deficiencias presentadas en el sistema de refrigeración abierto: **indisponibilidad**.
- Recuperar la **energía no generada**.



Antecedentes

Se realizaron **múltiples estudios y análisis técnicos** desde el **23 de mayo de 1978** con un enfoque inapropiado.

Ingenieros especializados.

Universidades nacionales e internacionales.

En Suecia – Universidad de Lund.

En Alemania – Bayer Químicas Unidas S.A.S.

Se **enfocaron en la calidad del agua** del Embalse Santa Rita.

Las **deficiencias** en el sistema de refrigeración aún se seguían presentando en el año **2013** con una:

Indisponibilidad promedio de **400 horas/año** (unidad).

Energía no generada de hasta un **5%** (28 MWh).



Solución

En el **año 2013** se realizó un **estudio técnico** que permitió encontrar la **solución**:

Se concluyó que el problema del mal funcionamiento del sistema de refrigeración no se encontraba en la calidad del agua del Embalse, sino principalmente en:

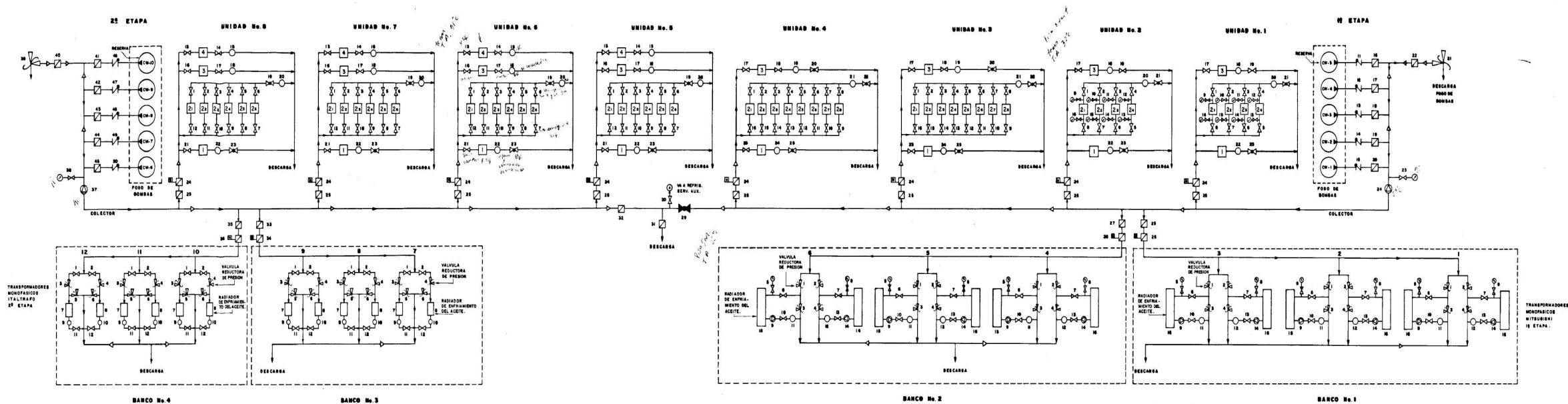
- En el **diseño** y en el **cálculo** de la **presión** y el **caudal** del agua cruda que alimentan el sistema de refrigeración.
- En la **desigualdad** de la capacidad de **disipación térmica** de los intercambiadores de calor agua-aire y agua-aceite, presentes en los **3 diseños de los 3 fabricantes diferentes**, de las 8 unidades de generación de energía eléctrica y de los 13 transformadores de potencia.



Diseño original

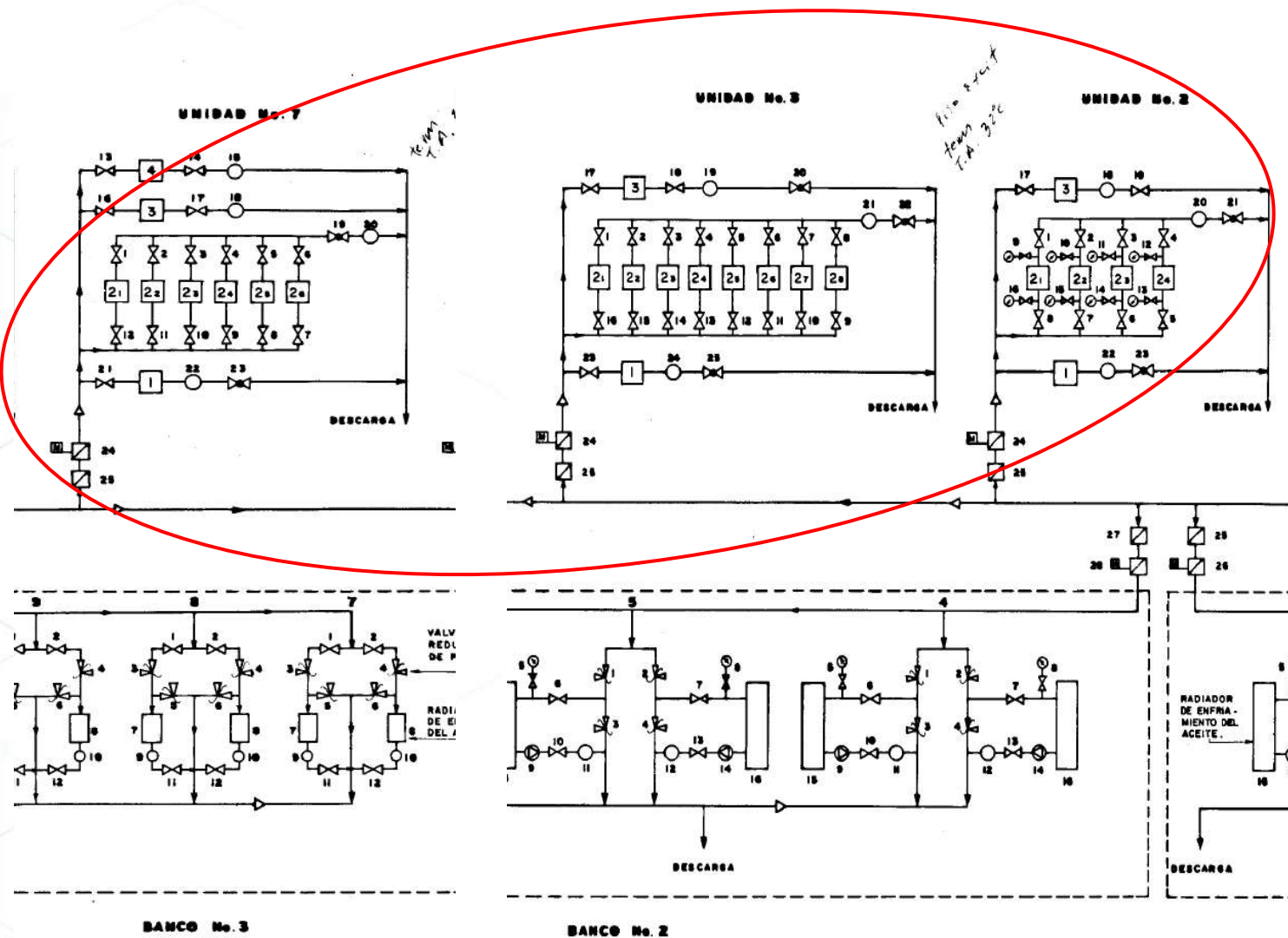
Sistema de refrigeración:

SISTEMA AGUA DE REFRIGERACION PARA GENERADORES, TURBINAS Y TRANSFORMADORES



Diseño original

Sistema de refrigeración:



Diseño implementado Inapropiado

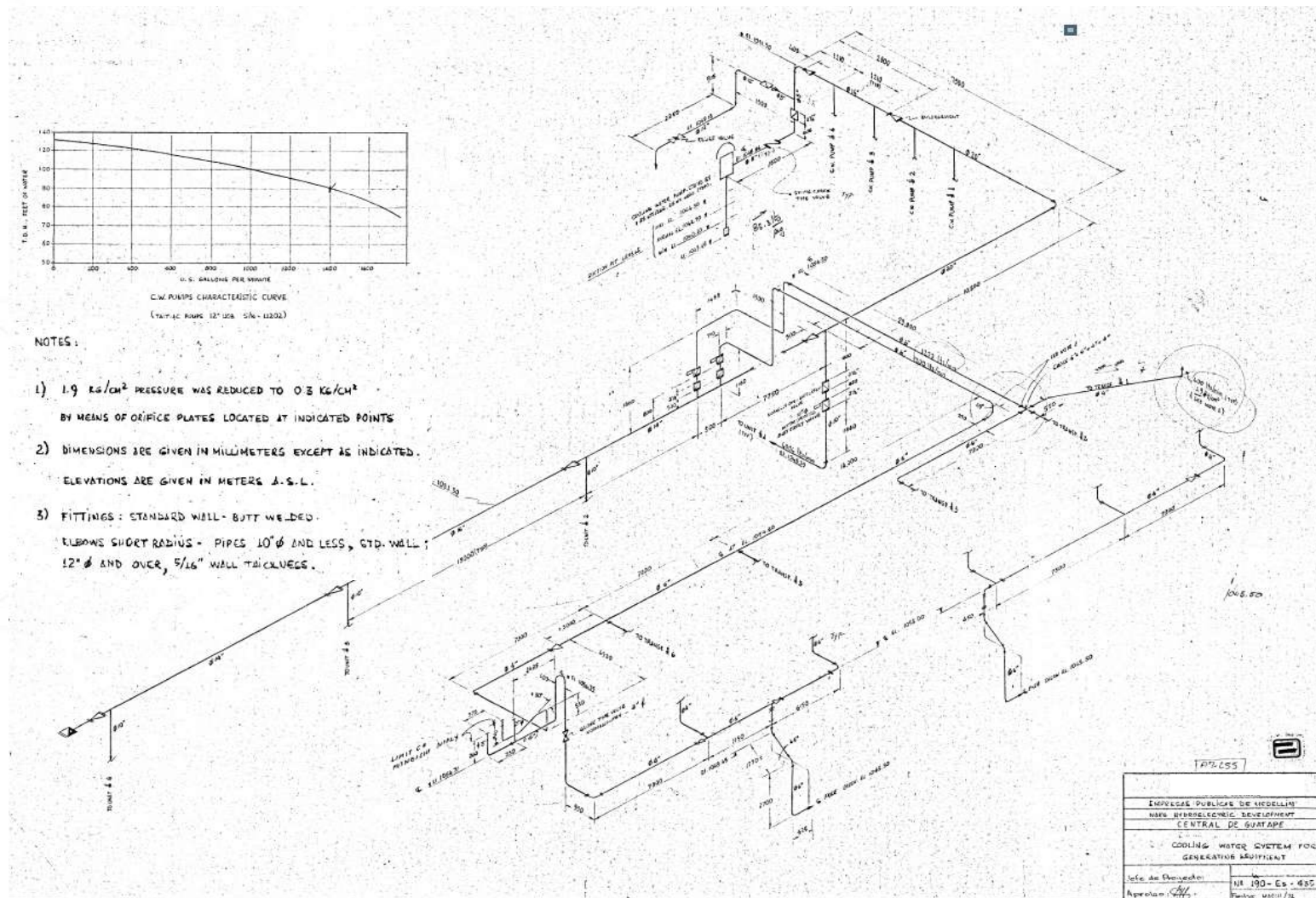
Sistema refrigeración:

Generadores

La presión del agua de refrigeración requerida con base en el diseño original según el plano de **marzo de 1972** fue de 1.86 bar, menos 0.29 bar por placas de orificio, igual **1.57 bar**.

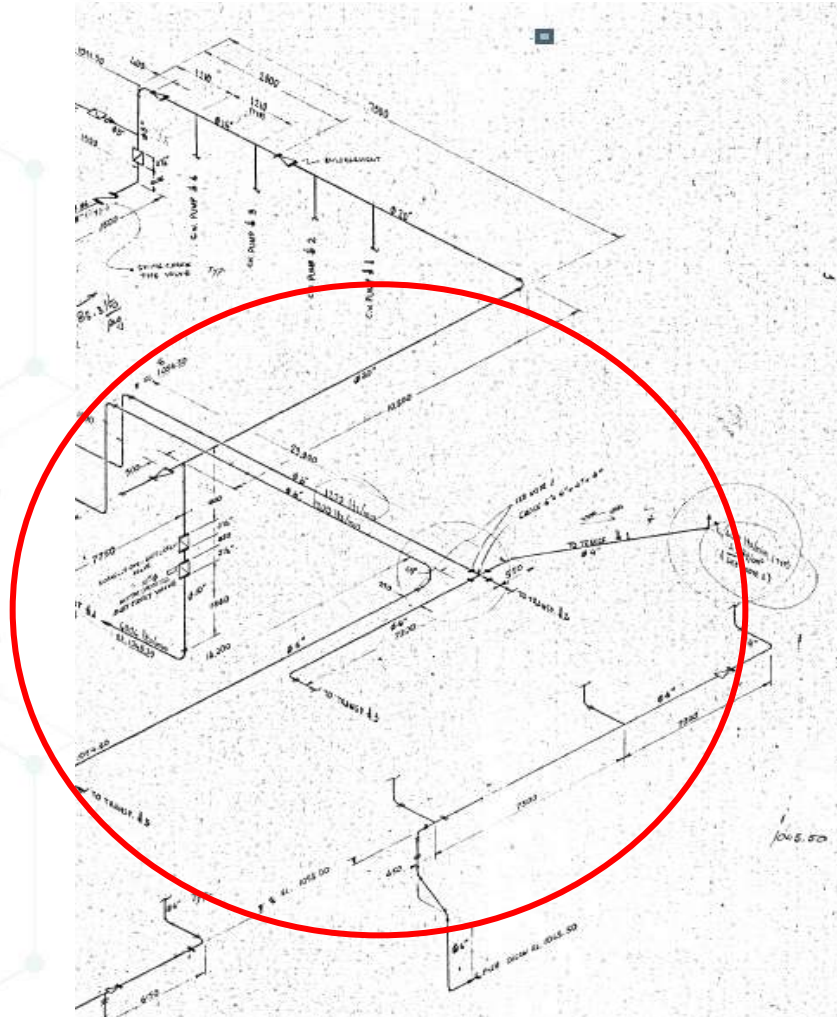
Entró en operación con **1.2 bar**, menos 0.29 bar por placas de orificio, igual a

0.91 bar.



Diseño implementado

Placas de orificio



Diseño original

Sistema refrigeración:

Transformadores de potencia

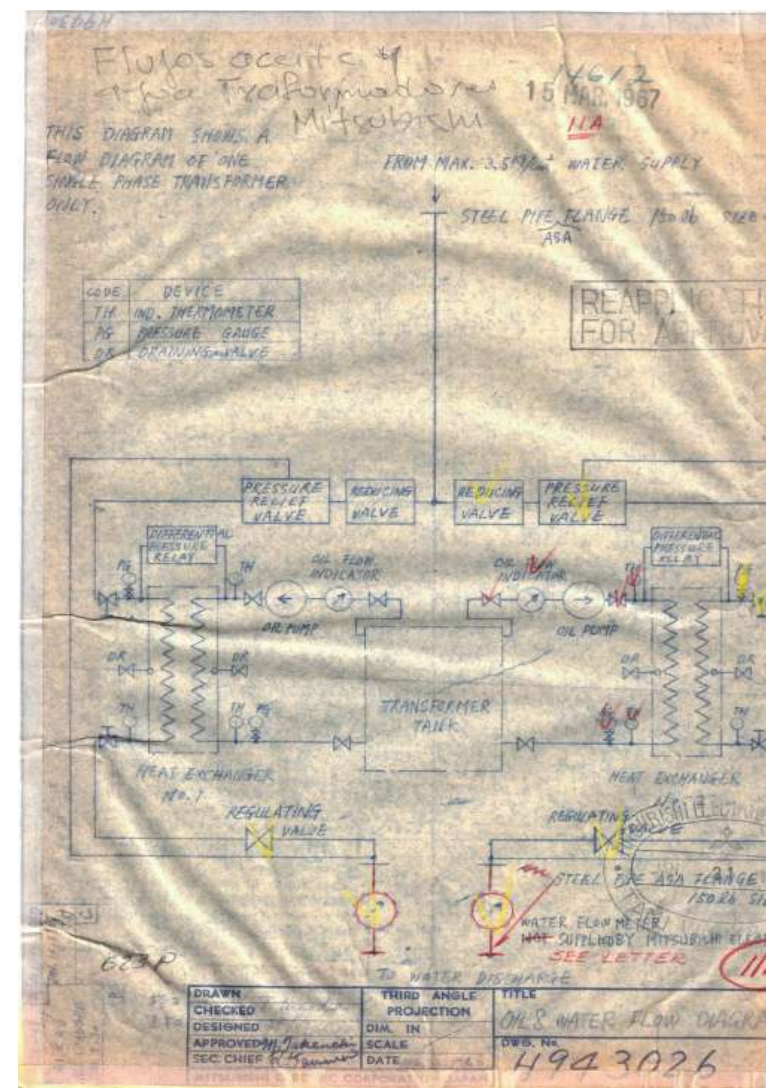
La presión del agua de refrigeración requerida con base en el diseño original según el plano japonés del **15 de marzo de 1967** antes de entrar al transformador de potencia: **máx. $3.5 \text{ kg/cm}^2 = 3.43 \text{ bar}$** .

En el **año 2013**, cuando se realizó el cálculo de la presión y del caudal del agua cruda para el nuevo diseño del sistema de refrigeración, se llegó a un valor de **presión requerida de 3.5 bar**.

En ese momento **no se tenía acceso a este plano**.

Velocidad del fluido: mínimo 0.5 m/s – 1.5 m/s .

Plano japonés



Diferencias entre fabricantes

Primera etapa:

Diámetro de la tubería 8"

5 bombas: 83 TDH.

Caudal: 1350 gpm.

Presión: 1.2 bar.

5 motores: 40 hp.

Cabezales: 2 impulsores.

Unidades: U1, U2. origen japonés.

4 intercambiadores de calor agua-aire.

Unidades: U3, U4. origen alemán.

8 intercambiadores de calor agua-aire.

Pérdida de eficiencia en bombas:

Presión: 0.9 bar.

Caudal: 700 gpm.

Segunda etapa:

Diámetro de la tubería 10"

5 bombas: 100 TDH.

Caudal: 1350 gpm.

Presión: 1.5 bar.

5 motores: 50 hp.

Cabezales: 3 impulsores.

Unidades: U5, U6, U7, U8. origen brasilero.

6 intercambiadores de calor agua-aire.

Válvulas tipo mariposa en la descarga.

Pérdida de eficiencia en bombas:

Presión: 1.0 bar.

Caudal: 900 gpm.

Necesidad

Motobombas – válvulas – accesorios – **fuera de servicio**



Estandarización

Parámetros estandarizados para las dos etapas:

10 motobombas centrífugas verticales de 3 impulsores.

Presión: 170 TDH – 3.5 bar en el sistema.

Caudal: 1700 gpm - 2200 gpm en el sistema.

10 motores: 100 hp.

Se corrigió la posición de las válvulas en las dos etapas estandarizando las distancias.

Se instalan instrumentación nueva en todo el sistema de refrigeración.

Se corrigió el trazado de la tubería.

Se cambiaron mas de 60 válvulas en todo el sistema de refrigeración.

Se instalaron válvulas reguladoras de presión en la descarga de las 8 unidades de generación.

Se instalaron válvulas reguladoras de presión entre los generadores y lo transformadores de potencia para mantener y regular la presión del agua de refrigeración antes de llegar a los 12 transformadores de potencia.



Estandarización

Se instalaron **sensores de vibración** en los rodamientos superior e inferior de los motores nuevos.

Se llevaron las señales a la sala de control, para ser monitoreadas e identificar el momento en que se presentan **trozos de madera** en la succión del agua del foso de bombas, esto ocasionaba la obstrucción de los filtros canasta, reventándolos y permitiendo que la madera pasara y se alojara entre los impulsores y las carcasas de las motobombas, produciendo desbalanceo y altas vibraciones.

Anteriormente **sin los sensores de vibración**, las 10 motobombas sufrían daños **sin detectarse a tiempo**, dejando las motobombas **fuera de servicio**.

Limpieza de los fosos de bombas.



Mejoras - Solución

Motobombas repotenciadas – nuevo diseño – curva de caudal y presión mejorada



28 Diferentes tipos de intercambiadores de calor agua-aire

U1–U2: origen japonés–Mitsubishi– 4 intercambiadores de calor agua-aire por unidad.

U3–U4: origen alemán–AEG– 8 intercambiadores de calor agua-aire por unidad.

U5–U6–U7–U8: origen Brasileiro–BBC– 6 intercambiadores de calor agua-aire por unidad.

Total: 72. 48 operando + 24 de repuesto.

Especificaciones técnicas **diferentes por cada tipo de fabricante**

Material de los tubos: cobre, aluminio y acero inoxidable.

Tipos de aletas: redonda, cuadrada y rectangular.

Diámetros de los tubos: media pulgada.

Diferentes espesores: hileras de tubos.

Alturas de las tapas: diferentes alturas.

Número de tubos: 60, 84 y 184.

Áreas de transferencia de calor.

Número de pasos: 2 y 4.



Nuevo diseño - Intercambiadores de calor agua-aire U1-U2

Tipo 1: **grande**. 4 intercambiadores de calor agua-aire por cada unidad de generación.

- Se aumentó la capacidad térmica de 179 a 276 kW = **97 kW** por cada intercambiador.
- 179 kW x 4 intercambiador de calor agua-aire = 716 kW diseño anterior.
- 276 kW x 4 intercambiadores de calor agua-aire = 1104 kW nuevo diseño.
- **97 kW** x 4 intercambiadores de calor agua-aire = **388 kW +**
- Se aumentó la capacidad térmica en un **54,18 %**.
- Se pasó de 184 tubos a 284 tubos. 100 tubos de más.
- Se aumentó el espesor con una hilera de tubos.
- Se redujo la temperatura: **20°C**.
- 4 pasos del agua cruda.



Nuevo diseño - Intercambiadores de calor agua-aire U3-U4

Tipo 2: **pequeño**. 8 intercambiadores de calor agua-aire por cada unidad de generación.

- Se aumentó la capacidad térmica de 149 a 216 kW = **67 kW** por cada intercambiador.
- 149 kW x 8 intercambiadores de calor agua-aire = 1192 kW diseño anterior.
- 216 kW x 8 intercambiadores de calor agua-aire = 1728 kW nuevo diseño.
- **67 kW** x 8 intercambiadores de calor agua-aire = **536 kW +**
- Se aumentó la capacidad térmica en un **44.96 %**.
- Se pasó de 48 tubos a 137 tubos. 89 tubos de más.
- Se aumentó el espesor con una hilera de tubos.
- Se redujo la temperatura: **23°C**.
- 4 pasos del agua cruda.



Nuevo diseño - Intercambiadores de calor agua-aire U5-U6-U7-U8

Tipo 3: mediano. 6 intercambiadores de calor agua-aire por cada unidad de generación.

- Se aumentó la capacidad térmica de 190 a 248 kW = 58 kW por cada intercambiador.
- 190 kW x 6 intercambiadores de calor agua-aire = 1140 kW diseño anterior.
- 248 kW x 6 intercambiadores de calor agua-aire = 1488 kW nuevo diseño.
- 58 kW x 6 intercambiadores de calor agua-aire = 348 kW +
- Se aumentó la capacidad térmica en un 30.52 %.
- Se pasó de 114 tubos a 210 tubos. 96 tubos de más.
- Se aumentó el espesor con una hilera de tubos.
- Se redujo la temperatura: 20°C.
- 4 pasos del agua cruda.



Nuevo diseño - Intercambiadores de calor agua-aceite:

Transformadores de potencia:

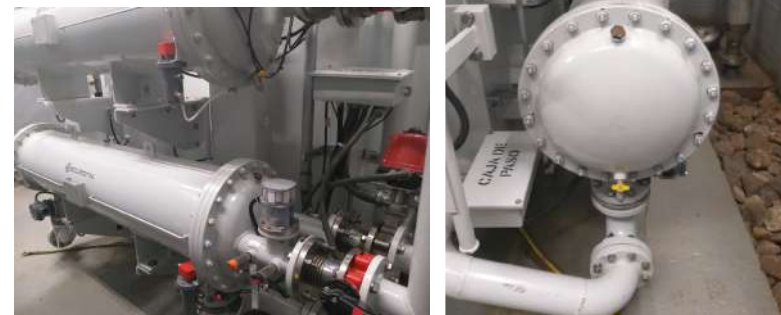
Diseño anterior:

6 Transformadores de potencia monofásicos, marca Mitsubishi, con 12 intercambiadores de calor agua-aceite operando y un transformador de potencia de repuesto.

6 Transformadores de potencia monofásicos, marca Italtrafo, con 12 intercambiadores de calor agua-aceite.

Nuevo diseño estandarizado:

26 intercambiadores de calor agua-aceite para 12 transformadores de potencia en operación y 1 de repuesto. Incorporando los nuevos parámetros técnicos mejorados en el diseño de fabrica.

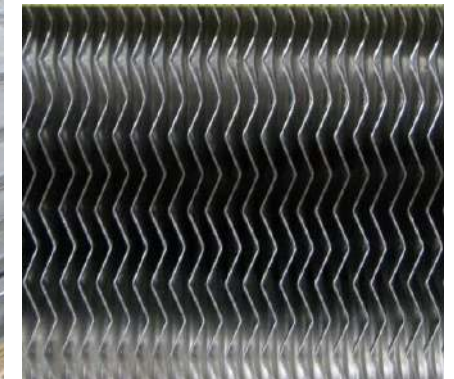


Estandarización - Mejoras en el diseño

Reto: estandarizar las especificaciones técnicas de tres tipos de fabricantes diferentes para obtener la mayor eficiencia en la capacidad de disipación térmica con la mejor tecnología.

72 Intercambiadores de calor agua-aire con el nuevo diseño estandarizado:

- Diámetro de los tubos: 3/4" tubos sin costura (código ASME sección II) SB111C 71500 (061)
- En promedio se aumentó la capacidad de disipación térmica en: 43.22%.
- Material de los tubos: cuproníquel 70/30, aleación cobre 70% - níquel 30%.
- Material de las aletas: SB209M 3003(O) (código ASME sección II)
- Tipo de aletas: rectangular extendida tipo DS 160.
- Número de aletas: 15 aletas por pulgada.
- Se aumentó el espesor con una hilera de tubos.
- Rejilla de protección en ambos lados.
- Espesor de las aletas: 0.2 mm.
- 4 pasos del agua cruda.
- Altura de las tapas.
- Estampe ASME U.



Estandarización

Estandarizar las especificaciones técnicas de tres tipos de fabricantes de origen diferente: **japonés, alemán y brasilero**, para obtener la mayor eficiencia en la capacidad de disipación térmica con la mejor tecnología en un nuevo diseño.

Intercambiadores de calor agua-aire nuevo diseño



Oportunidad

Se aprovechó el final de la vida útil de los 72 intercambiadores de calor agua-aire de los 8 generadores de energía y de los 30 intercambiadores de calor agua-aceite de los 13 transformadores de potencia existentes, para aumentar la capacidad de disipación térmica.

Nuevo diseño más eficiente en la disipación térmica.

Se aprovechó el final de la vida útil de las 10 motobombas centrifugas verticales, para aumentar la presión y el caudal del agua cruda del sistema de refrigeración abierto.

Nuevo diseño para mejorar la curva de desempeño de las 10 motobombas centrifugas verticales.

Se logra pasar de 5 días para el cambio de los intercambiadores de calor, a un máximo de 450 días.

Se rediseño todo el sistema de refrigeración abierto **sin filtros.**



Oportunidad

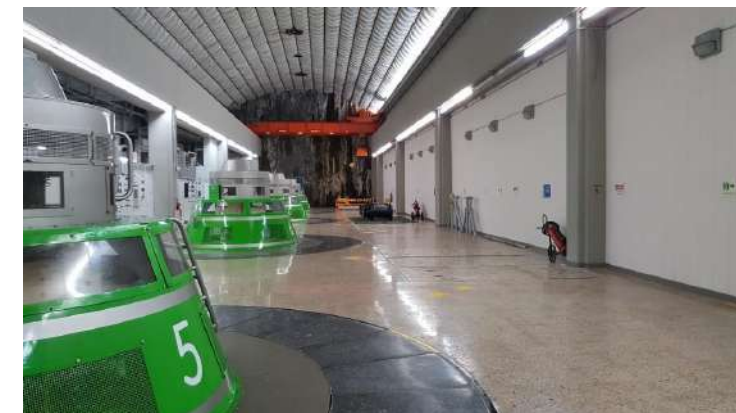
Se realizó el diseño y se pone a prueba un piloto para lavar en línea los intercambiadores de calor agua-aire cuando la unidad de generación esta operando. Este sistema de lavado en línea toma agua cruda de la válvula esférica de admisión, para conducirla a través de una tubería y reducir la presión antes de entrar a los intercambiadores de calor agua-aire. Este diseño también permite alimentar el sistema de refrigeración directamente desde la tubería de admisión de agua cruda del Embalse Santa Rita. **En pruebas.**



Oportunidad

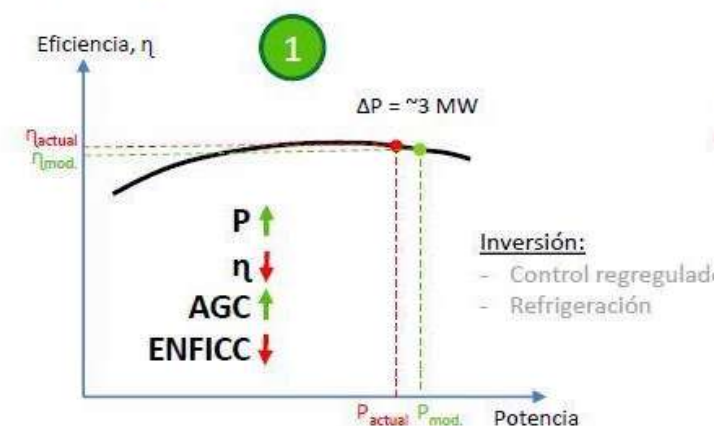
Con base en el estudio y análisis técnico realizado en el sistema de refrigeración, se puede concluir que la potencia producida por las 8 unidades de generación puede ser incrementada, porque estaba limitada, entre otros factores, a las altas temperaturas debidas al mal funcionamiento del sistema de refrigeración.

Se propuso realizar un estudio más detallado, con el fin de conocer la posibilidad de aumentar la potencia producida de hasta en 3 MWh por cada unidad, para un total de hasta 24 MWh adicionales, pasando de 560 MWh a 584 MWh.



Guatapé

Alternativas



Resultados de la estandarización

Temperaturas registradas de los 48 intercambiadores de calor agua- aire en operación con el nuevo diseño.

Registro de las 8 unidades de generación cuando se encontraban en 70MWh.

TEMPERATURAS RADIADORES Y COJINETES DE LAS UNIDADES								
Temperaturas	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Unidad 6	Unidad 7	Unidad 8
Aire Radiador No. 1	23.06 °C	26.68 °C	21.98 °C	22.27 °C	29.95 °C	26.02 °C	26.02 °C	28.92 °C
Aire Radiador No. 2	27.19 °C	27.38 °C	22.78 °C	21.84 °C	32.39 °C	29.11 °C	24.52 °C	29.86 °C
Aire Radiador No. 3	24.47 °C	25.78 °C	22.31 °C	22.22 °C	31.92 °C	25.64 °C	24.80 °C	31.78 °C
Aire Radiador No. 4	26.81 °C	25.97 °C	23.20 °C	22.20 °C	30.98 °C	25.41 °C	25.03 °C	29.30 °C
Aire Radiador No. 5			23.16 °C	22.79 °C	28.83 °C	27.42 °C	23.53 °C	28.50 °C
Aire Radiador No. 6			24.98 °C	21.61 °C	28.97 °C	28.08 °C	23.30 °C	29.67 °C
Aire Radiador No. 7			24.47 °C	23.88 °C				
Aire Radiador No. 8			21.80 °C	23.86 °C				

Unidad 3

Tendencias Radiadores

21.98 °C
22.78 °C
22.31 °C
23.20 °C
23.16 °C
24.98 °C
24.47 °C
21.80 °C

Resultados generales

- Ahorrar agua en el Embalse Santa Rita.
- Recuperar la energía no generada de hasta un 5%.
- Recuperar la disponibilidad en promedio de 400 horas al año.
- Liberar una cuadrilla de mantenimiento esclava de 6 personas.
- Disminuir el consumo energía en la planta y en los servicios auxiliares.
- Promover los estudios del posible aumento de la potencia producida de hasta 24 MWh.
- Garantizar la vida útil de los devanados y núcleos de los generadores y transformadores de potencia.
- Estandarizar el proceso y los equipos.



Lecciones aprendidas

Una **visión integral** en la que se encuentren tanto la **creatividad** como la **realidad**, exige **flexibilidad** para adaptarse a los cambios del entorno y a la **aparición de nuevas oportunidades**.

Tendemos a percibir primero la **consecuencia** y no la **causa** de los problemas, así mismo **solucionamos primero la consecuencia**, sin darnos cuenta que **nos devuelve nuevamente al problema**.

El **sentido común ahorra tiempo** en la búsqueda de **soluciones** y **evita la pérdida de oportunidades**.

La solución más simple es la correcta. Evitar buscar soluciones excesivamente complejas, entendiendo como simple la que tenga menos supuestos o implique menor complejidad para obtener la solución.

¡Gracias!
por ser parte de la
comunidad Innovar +



Grupo.epm