

GO N° 231/2024

Santiago, 30 de diciembre de 2024

Señor

Rodrigo Espinoza V.

Gerente de Operación

Coordinador Eléctrico Nacional

Presente

Mat.: Responde requerimiento de información.

Ant.: Carta DE06365-24, de fecha 2 de diciembre de 2024.

De nuestra consideración,

Por medio de la presente, y encontrándonos dentro de plazo, damos respuesta al requerimiento de información formulado por este Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional ("**Coordinador**") en el Ant., emitido en el contexto de los hallazgos informados por mi representada mediante carta GO N°193/2024, obtenidos en el marco de la inspección en la caldera de la unidad de generación Nehuenco II durante el Mantenimiento Mayor realizado entre el 22 de septiembre y el 20 de noviembre del presente año.

Con el propósito de dar cumplimiento a lo prescrito, mediante la presente procedo a entregar al Coordinador la información indicada en el Ant., según el detalle que se indica a continuación:

i. Informe de los especialistas que realizaron la inspección del HRSG de Nehuenco II, incluyendo la totalidad de los hallazgos de "tubos rotos" (81), donde señale al menos el tipo de rotura para cada caso, incluido los registros fotográficos.

Se adjunta documento nominado "2024.10.17 Reporte Hallazgos y Reparaciones Caldera HRSG Nehuenco II", que da cuenta de la inspección de la caldera HRSG de Nehuenco II, realizado por nuestros especialistas. En el documento se indica la totalidad de los hallazgos de "tubos rotos", especificando tipo de rotura para cada caso e incluyendo los registros fotográficos respectivos.

Debemos precisar que, si bien en una primera oportunidad se reportaron 81 "tubos rotos", luego de efectuar los ensayos no destructivos con la empresa S-INTEC ¹ a estos se constató que el total de tubos afectados fueron **84 unidades** (equivalente al 12% del total de tubos de las etapas afectadas), conforme al siguiente detalle:

- **6** tubos rotos (se encontraron con grieta y ruptura del material) y **20** tubos con fisuras en el Sobrecalentador 2 de alta presión².
- **37** tubos en el Economizador de alta presión con indicaciones de fisuras³.

¹ Los ensayos fueron realizados por la empresa Inspecciones Técnicas S-Intec Limitada, contratista externo a Colbún que se desempeña en el área de inspecciones técnicas industriales, control de calidad, ensayos no destructivos y certificación de productos combustibles. En adjuntos se deja disponible un link a una carpeta con los informes entregados por S-INTEC de todas las partes en que se encontraron fallas. Estos Ensayos No Destructivos se hicieron antes y después de la reparación.

² 2024.10.17 Reporte Hallazgos y Reparaciones Caldera HRSG Nehuenco II, pp. 4 a 7.

³ 2024.10.17 Reporte Hallazgos y Reparaciones Caldera HRSG Nehuenco II, pp. 13 y 16.

- 3 tubos del Economizador de Media Presión con indicaciones de fisuras⁴.
- 18 tubos del Evaporador de Media Presión con indicaciones de fisuras⁵.

ii. Informe de reparación de los “tubos rotos”, indicando el estado del tubo, ubicación, tipo y características de la falla y el tipo de reparación efectuada (detallar claramente ubicación y número de tubos extraídos).

Se adjunta documento nominado “2024.10.17 Reporte Hallazgos y Reparaciones Caldera HRSG Nehuenco II”, que da cuenta de la reparación de los “tubos rotos”. En términos generales, las actividades de reparación consistieron en lo siguiente:

- Respecto de los 26 tubos rotos en el Sobrecalentador 2 de alta presión. La reparación consistió en cortar el tubo afectado unos 200 mm, mecanizar las áreas para soldar y unir los tubos al cabezal, efectuar tratamiento térmico y ensayos no destructivos para validar reparación⁶.
- Respecto de los 37 tubos en el Economizador de alta presión. Estos tubos presentaron indicaciones de grietas, es decir, son fisuras superficiales, las cuales fueron mecanizadas superficialmente para eliminarlas y luego aportar soldadura al material y realizar ensayos no destructivos para validar la reparación⁷.
- Respecto de los 3 tubos del Economizador de Media Presión. Estos tubos presentaron indicaciones de grietas, es decir, son fisuras superficiales, las cuales fueron mecanizadas superficialmente para eliminarlas y luego aportar soldadura al material y realizar ensayos no destructivos para validar la reparación⁸.
- 18 tubos del Evaporador de Media Presión. Estos tubos presentaron indicaciones de grietas, es decir, son fisuras superficiales, las cuales fueron mecanizadas superficialmente para eliminarlas y luego aportar soldadura al material y realizar ensayos no destructivos para validar la reparación⁹.

iii. Considerando la magnitud de los hallazgos en cuanto a la totalidad de tubos rotos informados, solicitamos indicar la razón para no requerir un mayor plazo en el Mantenimiento Mayor.

No fue requerida una extensión de plazo de la indisponibilidad programada de 60 días para realizar el Cambio del Sistema de Control Distribuido DCS y Mantenimiento del BOP de la unidad Nehuenco II, ya que los hallazgos en la Caldera HRSG fueron detectados al inicio de esta indisponibilidad. Asimismo, los hallazgos con grieta pasante fueron en 6 tubos y el daño en los otros 78 tubos restantes fue de menor magnitud, lo que significó una reparación dentro del período de indisponibilidad programada, sumado a que en el sitio se disponía del material de los tubos del Sobrecalentador 2.

⁴ Ídem.

⁵ Ídem.

⁶ 2024.10.17 Reporte Hallazgos y Reparaciones Caldera HRSG Nehuenco II, pp. 6 a 11.

⁷ 2024.10.17 Reporte Hallazgos y Reparaciones Caldera HRSG Nehuenco II, pp. 15 a 17.

⁸ Ídem.

⁹ Ídem.

- iv. **Informar conforme a los hallazgos, las características de las fallas y las razones técnicas o fenómeno metalúrgico que les permite indicar en cada caso, que estos fenómenos de falla pudieran corresponder, a una fatiga termo-mecánica asociada al mayor ciclado.**

De acuerdo con lo señalado en los reportes del DICTUC¹⁰ y del fabricante John Cockerill¹¹ de la Caldera de Nehuenco II, la falla de los tubos del Sobrecalentador 2 de alta presión se debe a los mecanismos de *creep* y fatiga y la combinación de éstos debido al envejecimiento térmico y los ciclos de carga, los que se intensifican por efecto del alto ciclado operativo.

Al respecto, el DICTUC procesó las piezas del Sobrecalentador 2 que se señalan a continuación para realizar diferentes análisis físico, químico y mecánicos, que dieron cuenta sobre el estado de envejecimiento actual, desde el punto de vista de materialidad. Cabe señalar que estas piezas fueron extraídas en octubre del año 2024, siendo removidas del sistema por la falla evidenciada durante el Mantenimiento Mayor.



Figura 18. Registro fotográfico inicial para muestras (a) T1-F4, (b) T2-F3, y (c) T2-F4 provenientes de NEH-2.

Así, el DICTUC realizó y obtuvo los siguientes análisis y resultados:

- **Inspección visual.** Las piezas fueron escaneadas mediante un perfilómetro óptico con el fin de observar su topografía superficial y características de fractura. Todas las piezas presentan una zona de fractura (indicadas con el rectángulo rojo en la

¹⁰ Véase el capítulo 6.3 de las páginas 24 y siguientes, y capítulos 7.3, 8 y 9 desde la página 40 hasta la página 61 del Informe titulado “Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque”, elaborado por DICTUC.

¹¹ Véase capítulo 2.2.2. de las páginas 26 y siguientes, y capítulos 4.0 y 5.0 de las páginas 41 a 43, todos del Informe titulado “Critical revamping and assessments – availability and reliability of Nehuenco HRSGs, elaborado por John Cockerill.

figura anterior) que corresponde a la unión de cada tubo con el colector principal del sistema.

- **Análisis de composición química elemental.** Se tomaron muestras en tres zonas aleatorias a lo largo de cada pieza. Las muestras fueron medidas por medio de un espectrómetro de emisión óptica por descarga luminiscente previamente calibrado para análisis de composición química de hierro. El material de todas las muestras difiere ligeramente en su contenido de cromo y molibdeno respecto a un grado P91 de acuerdo con lo que indica la norma ASTM A335/335M-24a.
- **Ensayo de tracción uniaxial.** Estos ensayos fueron realizados a una probeta de material desde la sección longitudinal de cada pieza. A partir de estos ensayos se obtuvo el límite de fluencia, resistencia a la tracción y alargamiento máximo en 50 mm para cada material. Se observa que *“no se cumplen los valores mínimos de tensión de fluencia para las muestras T1F4 y T2F4, presentado deficiencias del 36% y el 9% respecto a lo requerido, respectivamente. Asimismo, los valores mínimos de alargamiento no se alcanzan en el material de la muestra T1F4 con una reducción del 14%”*¹².
- **Análisis metalográfico.** Se busca observar la microestructura del metal. Se tomaron muestras aleatorias a lo largo de la pieza y se analizó la sección transversal de una muestra extraída desde el área de fractura de las piezas. *“A partir de las imágenes se observa en todos los casos la fase ferrita (áreas claras), típica para la microestructura del material, de un tamaño de grano de hasta 20 μ m, Adicionalmente, también es posible observar la presencia de carburos (puntos oscuros) dispersos en la matriz ferrítica, lo cual es consistente con la descomposición de la fase perlita en este tipo de aceros por envejecimiento térmico”*¹³. Adicionalmente, en todas las muestras extraídas del área de falla se observa la *“presencia de cavidades en el material consistente con un nivel 2 de creep en estas áreas, así como también, la presencia de ferrita y carburos presentes en los bordes de grano del material asociado a un envejecimiento térmico avanzado”*¹⁴, lo que puede explicar la causa de falla en esta zona.
- **Microdureza.** Se realizaron mediciones sobre un duplicado de las muestras preparadas para análisis metalográfico. Se observa que las muestras analizadas lejanas a las fracturas se encuentran dentro de lo requerido por la norma ASTM A335/335M-24a en términos de dureza. Sin embargo, aquellas extraídas desde la zona de fracturas otorgan resultados variables. *“Los valores de dureza en el caso de las muestras T1F4 y T2F4 son al menos un 10% menor en comparación al mismo material en una zona lejos de fractura, lo cual podría indicar un deterioro en las propiedades físicas del material”*¹⁵.

¹² Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque, elaborado por DICTUC, p. 47.

¹³ Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque, elaborado por DICTUC, p. 48.

¹⁴ Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque, elaborado por DICTUC, p. 50.

¹⁵ Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque, elaborado por DICTUC, p. 48.

En base a los análisis mencionados, y la información disponible, el DICTUC obtiene las siguientes conclusiones de relevancia para lo solicitado por el Coordinador:

- Desde su concepción, el diseño y los materiales de Nehuenco II limitan la unidad a un máximo de 25 ciclos de encendido por año, lo que refleja las limitaciones inherentes del material y su configuración estructural para resistir los efectos combinados de fatiga y envejecimiento térmico.
- Los resultados del análisis probabilístico realizado, junto con las fallas registradas en el año 2024, evidencian los efectos acumulativos del daño, especialmente *creep*, que ha generado concentradores de esfuerzos observados en los análisis de laboratorio.
- Los elementos críticos con mayor daño acumulado fueron los tubos del sobrecalentador identificados como los más susceptibles de fallas¹⁶.
- Cada ciclo adicional de operación (encendido/apagado) tiene un impacto acumulativo significativo, acelerando la tasa de daño de Nehuenco II¹⁷.

Por su parte, John Cockerill se refiere al aumento de los índices de reparación del Sobrecalentador 2 y el consumo de su vida útil a causa de *creep* y fatiga de la siguiente manera¹⁸:

Texto del informe	Traducción libre
<p><i>"In recent years, there has been a noticeable increase in repair rates for the HP superheater 2 and the economizers, primarily focused on addressing leaks at the tube-to-header connections. In total 81 tubes have been repaired and follow continuous survey. For the HP superheater 2 header, additional damages in the header itself have been reported (guides, supports, auxiliaries).</i></p> <p><i>A root cause analysis of these failures indicates an advanced state of creep in the material, characterized by extensive wear and a significantly reduced remaining lifespan.</i></p> <p><i>During the first year in base load, and in recent years during part load (high</i></p>	<p><i>"En los últimos años, se ha producido un notable aumento de los índices de reparación del sobrecalentador HP 2 y de los economizadores, centrado principalmente en solucionar las fugas en las conexiones tubo-cabezal. En total, se han reparado 81 tubos y se siguen inspeccionando continuamente. En el caso del cabezal del sobrecalentador HP 2, se han notificado daños adicionales en el propio cabezal (guías, soportes, auxiliares).</i></p> <p><i>Un análisis de las causas de estos fallos indica un avanzado estado de "creep" en el material, caracterizado por un gran desgaste y una reducción significativa de la vida útil restante. Durante el primer año en carga base, y en los últimos años durante el funcionamiento en carga parcial (alta temperatura), se ha</i></p>

¹⁶ Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque, elaborado por DICTUC, p. 56.

¹⁷ Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque, elaborado por DICTUC, p. 59.

¹⁸ Critical Revampings and Assessments - Availability and Reliability of Nehuenco HRSGs, emitido por John Cockerill, p. 26.

<i>temperature) operation, creep lifespan has been consumed. Now, due to creep-fatigue interaction, fatigue lifespan is considerably shorter, so further tube-to-header welding failures are expected due to shutdown cycles.</i>	<i>consumido la vida útil de “creep”. Ahora, debido a la interacción “creep”-fatiga, la vida útil a fatiga es considerablemente más corta, por lo que se esperan más fallos de soldadura tubo-cabezal debido a los ciclos de parada.”</i>
---	---

Adicionalmente, realizando proyecciones con una operación de alto ciclado, John Cockerill concluye que esta operación reduciría la vida útil técnica de la unidad Nehuenco II en un factor de 7,8 veces. Al respecto, el informe señala lo siguiente¹⁹:

Texto del informe	Traducción libre
<i>“In conclusion, operating with a very high number of starts considerably reduces the lifetime of the SHP outlet. We go from a lifetime of 2060 to 2023.”</i>	<i>“En conclusión, el funcionamiento con un número muy elevado de arranques reduce considerablemente la vida útil de la salida SHP. Pasamos de una vida útil de 2060 a 2023.”</i>

v. Se requiere el envío de los informes solicitados al DICTUC y a John Cockerill.

Se adjunta informe de DICTUC, titulado “Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque”, de fecha 13 de diciembre de 2024, e Informe de John Cockerill, titulado “Critical revamping and assessments – availability and reliability of Nehuenco HRSGs”, de fecha 11 de diciembre de 2024, y anexos de este último informe de fecha 12 de diciembre 2024.

vi. Informar el motivo por el cual se solicitó a John Cockerill, su pronunciamiento sólo del sobrecalentador de alta presión y no respecto a la totalidad de las roturas de tubos.

En una primera instancia sólo se solicitó a John Cockerill el pronunciamiento acerca de las fallas encontradas en el Sobrecalentador 2 de alta presión dado que los hallazgos eran críticos, ya que se encontraron tubos rotos y se requería con urgencia determinar el procedimiento de reparación de estos tubos y la búsqueda de material.

En una etapa posterior, se abordará el análisis de la causa de las fisuras superficiales encontradas en los tubos de los economizadores de alta y media presión y evaporador de media presión, ya que requerirá de mayor tiempo de análisis y de la obtención de muestras para ensayos de laboratorio. Cabe destacar que estas fallas también son nuevas en la Caldera y su causa preliminar estaría relacionada al fenómeno de estrés termomecánico por enfriamiento súbito de las partes que están con alta temperatura durante arranques-paradas frecuentes.

¹⁹ Critical Revampings and Assessments - Availability and Reliability of Nehuenco HRSGs, emitido por John Cockerill, pp. 37 y 38.

Ahora bien, dado que todos los tubos encontrados con fisuras superficiales fueron reparados y estas reparaciones no requirieron el corte de tubos, no fue posible extraer muestras para ejecutar ensayos en un laboratorio especializado, lo que se dejará para una próxima intervención programada de la Caldera, con un análisis de John Cockerill más avanzado.

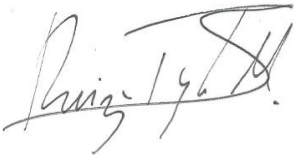
vii. Finalmente se solicita informar si se realizaron estudios en terreno de las fallas indicadas.

No se realizaron estudios en terreno de las fallas indicadas, ya que el proceso de determinación de las causas se dirige a empresas especializadas.

La empresa Inspecciones Técnicas S-Intec Limitada realizó en terreno las inspecciones y ensayos no destructivos, y sobre la base de esta información se solicitó a John Cockerill y al DICTUC, entidades de especialización técnica específica y experta, determinar el mecanismo de falla y sus causas.

En el caso del DICTUC, esta entidad realizó la visita a la Caldera de Nehuencho II para inspeccionar la zona afectada y comprender los aspectos relevantes del proceso de operación, realizando el análisis y emitiendo las conclusiones contenidas en informe titulado “Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque”, de fecha 13 de diciembre de 2024.

Sin otro particular, le saluda atentamente,



Sebastián Ruiz-Tagle Mena
Encargado Titular
COLBÚN S.A.

Adjuntos:

1. Documento nominado “2024.10.17 Reporte Hallazgos y Reparaciones Caldera HRSG Nehuencho II”, elaborado por Colbún S.A.
2. Informe titulado “Estudio en HRSG NEH-1 y NEH-2: Afectación de materiales de elementos críticos por modificación en ciclos de arranque”, de fecha 13 de diciembre de 2024, elaborado por DICTUC.
3. Informe titulado “Critical revamping and assessments – availability and reliability of Nehuencho HRSGs”, de fecha 11 de diciembre de 2024, y anexos de fecha 12 de diciembre 2024, elaborados por John Cockerill.
4. Link Informes de S-INTEC (disponible por 7 días): <https://we.tl/t-LjkC8n97ok>