

inodú

Flexibilización de Unidad 3 de Central Guacolda

Mínimo Técnico de Unidad 3
mediante operación con 1 molino

Abril
2024



GUACOLDA
energía

Flexibilización de Unidad 3
de Central Guacolda

inodú

Tabla de contenido

| | |
|---|-----------|
| <u>Resumen ejecutivo.....</u> | <u>5</u> |
| <u>1 Objetivo del documento.....</u> | <u>6</u> |
| <u>2 Caracterización de la Unidad 3 de Central Guacolda</u> | <u>7</u> |
| <u>3 Definición de objetivo de flexibilización de Unidad 3 de Central Guacolda.....</u> | <u>11</u> |
| 3.1 Requerimientos regulatorios asociados a la definición de mínimo técnico..... | 11 |
| 3.2 Mínimo técnico de unidades de Guacolda en el contexto nacional e internacional | 12 |
| 3.3 Modos de operación observados en central Guacolda | 13 |
| 3.4 Brechas y factores limitantes a una mayor flexibilización de la Unidad 3 de Central Guacolda..... | 17 |
| 3.5 Hoja de ruta para objetivos de reducción de mínimo técnico de Guacolda 3 | 19 |
| 3.6 Plan de pruebas de Guacolda 3 a mínimo técnico reducido con un molino..... | 21 |
| <u>4 Análisis de la operación observada durante la prueba de Mínimo Técnico</u> | <u>23</u> |
| 4.1 Documentación de referencia | 24 |
| 4.2 Análisis de la Prueba de Mínimo Técnico mediante Operación con 1 Molino | 25 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.1 | Estado inicial de la unidad al momento de desarrollar la prueba . | 25 |
| 4.2.2 | Cronología de la prueba | 26 |
| 4.2.3 | Factores observados durante la prueba..... | 27 |
| 5 | <u>Conclusión.....</u> | 55 |
| 5.1 | Factores limitantes identificados..... | 55 |
| 5.2 | Mínimo técnico revisado en condición de operación con un molino 60 | |
| 6 | <u>Anexos.....</u> | 62 |
| 6.1 | Anexo 1: Posición de registros de aire durante las pruebas de 05- 03-2024 | 62 |
| 6.2 | Anexo 2: Requerimientos de regulación ambiental asociados al complejo Guacolda..... | 63 |
| 6.3 | Anexo 3: Aspectos generales asociados a la disminución de mínimo técnico operando con un molino | 65 |
| 6.3.1 | Descripción general de la operación con un molino | 65 |
| 6.3.2 | Desafíos y limitaciones de la operación con un molino | 67 |
| 6.3.3 | Aspectos de la norma NFPA 85 asociados a la operación con un molino | 69 |
| 6.3.4 | Experiencias previas de operación con un molino..... | 70 |
| 6.4 | Anexo 4: Tipos de carbón utilizados en Guacolda | 77 |
| 6.5 | Bibliografía..... | 78 |

Resumen ejecutivo

Durante el año 2022 y 2023 se trabajó en desarrollar e implementar una estrategia de flexibilización para la Unidad 3 de Central Guacolda. Como resultado de este proceso, y luego de realizar durante el año 2024 distintos trabajos, pruebas, monitoreo, ajustes y sintonización, se ha validado la operación en un nuevo mínimo técnico de 38 MW. El nuevo mínimo técnico se logra mediante una nueva estrategia de operación, que a diferencia de la operación estándar a mínimo técnico, utiliza sólo 1 molino¹.

El nuevo mínimo técnico de 38 MW con un molino tiene también la intención de ser un punto de evaluación de esta nueva condición de operación, ya que se han identificado algunos aspectos que requieren ser analizados y abordados para minimizar el riesgo operacional de la unidad en el largo plazo.

Este reporte se estructura de la siguiente forma:

1. En el Capítulo 2 se sintetizan algunos aspectos técnicos de la unidad.
2. En el Capítulo 3 se contextualiza el mínimo técnico actual de las unidades de Guacolda junto al de otras unidades a carbón en Chile y EEUU. Además, se sintetiza un benchmark técnico realizado a las unidades y se definen objetivos de flexibilización. Respecto de este último punto, se presenta una hoja de ruta que se utilizó para evaluar e implementar el objetivo de reducción de mínimo técnico de la Unidad 3 de Central Guacolda.
3. En el Capítulo 4 se presenta el análisis de la prueba final realizada en la Unidad 3 de Central Guacolda. Esta prueba corresponde al hito que permitió validar la condición de operación con un molino en la unidad.
4. Finalmente, en el Capítulo 5 se presenta los factores limitantes identificados y las recomendaciones.

¹ Una práctica más estandarizada involucra la operación con dos molinos a mínimo técnico.

1 Objetivo del documento

El presente documento tiene como objetivo presentar parte del proceso para definir, implementar y validar un mínimo técnico reducido mediante operación con 1 molino en la Unidad 3 de Central Guacolda.

El alcance de la prueba documentada es verificar y validar la capacidad de operar a mínimo técnico de 38 MW mediante el uso de un molino. Dicha condición de operación difiere de la práctica de operación estándar a mínimo técnico de unidades a carbón, donde se utilizan 2 molinos.

Los objetivos específicos de las pruebas realizadas en la Unidad 3 de Central Guacolda fueron:

1. Verificar la aplicación de la lista de verificación² de sala de control de la Unidad 3 en condición de reducción y aumento de carga.
2. Monitorear la operación durante las transiciones de 2 a 1 molino y 1 a 2 molinos.
3. Monitorear la estabilidad de la operación de la Unidad 3 de Central Guacolda en operación a 38 MW mediante operación de 1 molino.
4. Identificar potenciales desafíos o brechas a partir de las pruebas y monitoreo que se ha realizado a la unidad.

² Corresponde a un listado que contiene las condiciones habilitantes y de verificación por parte del operador para realizar transiciones (apagado/encendido) de molinos en una condición de MT reducido.

2 Caracterización de la Unidad 3 de Central Guacolda

Central Guacolda está localizada en la región de Atacama, comuna de Huasco. El comisionamiento de sus 5 unidades se realizó entre los años 1995 y 2015. La Figura 1 ilustra el emplazamiento de las cinco unidades junto a las principales estructuras de soporte en la Isla de Guacolda. La central inyecta, mediante 2 líneas de transmisión (4 circuitos), su generación eléctrica en la subestación Maitencillo 220 kV.

Figura 1
Imagen aérea del Complejo Guacolda.
Fuente: Elaboración propia.



La Tabla 1 sintetiza las principales características de las cinco unidades. Se presentan también los sistemas de control de emisiones instalados, junto a sus eficiencias. A diferencia de las unidades 3, 4 y 5, las unidades 1 y 2 comparten chimenea.

Respecto del mínimo técnico indicado en la tabla, es importante indicar que la práctica estándar de operación a mínimo técnico considera dos pulverizadores (o molinos) en servicio³.

Tabla 1
Características generales de las unidades de central Guacolda.
Fuente: Elaboración propia.

| <i>Categoría</i> | <i>Guacolda 1</i> | <i>Guacolda 2</i> | <i>Guacolda 3</i> | <i>Guacolda 4</i> | <i>Guacolda 5</i> | <i>Fuente</i> |
|---|---|---|--|--|--|---|
| <i>Comisionamiento</i> | 1995 | 1996 | 2009 | 2010 | 2015 | Infotécnica Coordinador |
| <i>Capacidad nominal</i> | 154 MW | 145 MW | 154 MW | 154 MW | 156 MW | Infotécnica Coordinador |
| <i>Mínimo técnico</i> | 38 MW | 38 MW | 45 MW | 38 MW | 38 MW | Coordinador |
| <i>Proveedor caldera</i> | Mitsubishi – Alstom License | Mitsubishi – Alstom License | Mitsubishi – Alstom License | Mitsubishi – Alstom License | Mitsubishi – Alstom License | Datos de diseño MHI |
| <i>Tipo de caldera</i> | Water tube boiler | Water tube boiler | Water tube boiler | Water tube boiler | Water tube boiler | Datos de diseño MHI |
| <i>Tipo de presión</i> | Subcrítica | Subcrítica | Subcrítica | Subcrítica | Subcrítica | Datos de diseño MHI |
| <i>Quemadores</i> | Tangenciales – 4 niveles | Tangenciales – 4 niveles | Tangenciales – 4 niveles | Tangenciales – 4 niveles | Tangenciales – 4 niveles | Datos de diseño MHI |
| <i>Circulación</i> | Natural | Natural | Natural | Natural | Natural | Datos de diseño MHI |
| <i>Tipo de carbón</i> | Bituminoso y subbituminoso | Bituminoso y subbituminoso | Bituminoso y subbituminoso. | Bituminoso y subbituminoso | Bituminoso y subbituminoso | Datos de diseño MHI |
| <i>Pulverizadores</i> | 25.8 ton/hr modelo MVM21F. Clasificadores estándar con ajuste manual. | 25.8 ton/hr modelo MVM21F. Clasificadores estándar con ajuste manual. | 25.8 ton/hr modelo MVM21R. Clasificadores dinámicos. | 25.8 ton/hr modelo MVM21R. Clasificadores dinámicos. | 25.8 ton/hr modelo MVM21R. Clasificadores dinámicos. | Datos de diseño MHI |
| <i>Granulometría del carbón</i> | 75% - 85% a través de una malla de 200 | 75% - 85% a través de una malla de 200 | 75% - 85% a través de una malla de 200 | 75% - 85% a través de una malla de 200 | 75% - 85% a través de una malla de 200 | Datos de diseño MHI |
| <i>OFA⁴</i> | No | No | Si | Si | Si | Datos de diseño MHI |
| <i>Sistema de recirculación de gases</i> | Si | Si | Si | Si | Si | Información proporcionada por Guacolda |
| <i>Sistema de control de emisiones MP</i> | Filtro de mangas (99,85%, 610 km ³ N/h) | Filtro de mangas (99,85%, 610 km ³ N/h) | P. Electrostático (99,85%, 638 km ³ N/h) | Filtro de mangas (99,85%, 610 km ³ N/h) | P. Electrostático (99,85%, 617 km ³ N/h) | Ministerio de Energía 2018 ⁵ |
| <i>Sistema de control de emisiones SO₂</i> | FGD seco (91,0%, 610 km ³ N/h) | FGD seco (91,0%, 610 km ³ N/h) | FGD húmedo (90,5%*, 618 km ³ N/h) | FGD seco (87,5%, 610 km ³ N/h) | FGD húmedo (90,5%***, 572 km ³ N/h) | Ministerio de Energía 2018 |
| <i>Sistema de control de emisiones NO_x</i> | SCR (89,91%, 610 km ³ N/h) | - | Quemadores Low NO _x (30%**) | SCR (83%, 567 km ³ N/h) | SCR (83,30%, 463 km ³ N/h) | Ministerio de Energía 2018 |

* Valor garantizado de 10.8 t/d a la salida.

** Valor garantizado de 8.8 t/d a la salida.

*** Valor garantizado de 200 mg/m³N a la salida, base seca

SCR: Selective Catalyst Reduction

FGD: Flue Gas Desulphurization

Los sistemas principales de la unidad son la caldera y el grupo turbina – generador. El sistema caldera interactúa con varios subsistemas, por ejemplo, subsistemas asociados a la combustión; subsistemas de agua de alimentación, los subsistemas asociados al acondicionamiento del vapor, los subsistemas asociados al acondicionamiento de gases de la combustión, entre otros subsistemas de soporte.

Las especificaciones generales de la caldera se presentan en la Tabla 2.

⁴ Over Fire Air (OFA).

⁵ Estudio de variables ambientales y sociales que deben abordarse para el cierre o reconversión programada y gradual de generación eléctrica a carbón; desarrollado por Inodú.

Tabla 2
Especificaciones generales de la caldera de la Unidad 3 de central Guacolda.
Fuente: Elaboración propia.

| Type of boiler | Water Tube Boiler single drum, natural circulation radiant reheat (MB-RR), outdoor-type installation | |
|---|---|---|
| Steam Flow at BMCR | | |
| | S.H. outlet | 440 t/h |
| | R.H. outlet | 382,9 t/h |
| Steam Pressure at BMCR | | |
| <i>Design pressure</i> | S.H. outlet | 187 bar g |
| | R.H. outlet | 52 bar g |
| <i>Operating pressure</i> | S.H. outlet | 164,1 bar g |
| | R.H. outlet | 33,2 bar g |
| Steam temperature | | |
| | S.H. outlet | 540 °C |
| | R.H. outlet | 540 °C |
| Feed water temperature at BMCR | Economizer inlet | 243,8 °C |
| Firing method | Circular corner firing with low NOx combustion system | |
| Steam temperature control system | Main steam | Water spray |
| | Reheat steam | Water spray, Burner tilting and gas recirculation |

La especificación general de los pulverizadores se sintetiza en la Tabla 3. A partir de la documentación del fabricante, no se identifica un valor de *turndown ratio*⁶ para los pulverizadores de la Unidad 3. Para efectos de evaluar la carga de los pulverizadores en este informe, se utiliza como aproximación el antecedente de diseño de los pulverizadores de las unidades 1 y 2, dada la similitud en los modelos de pulverizadores entre unidades (U1, U2: MVM21F, U3: MVM21R). El *turndown ratio* es 2:1, lo que equivale a una capacidad mínima de 50%^{7, 8}.

Tabla 3
Especificaciones generales de los pulverizadores instalados en la Unidad 3 de central Guacolda.
Fuente: Elaboración propia.

| Type | Mitsubishi vertical mill (MVM21R) |
|---|---|
| <i>Number</i> | Four (4) sets |
| <i>Capacity per mill (wet base)</i> | |
| <i>Maximum</i> | 25.800 kg/h (HGI:38, total moisture less than 26% (ref.)) |
| <i>Raw coal size</i> | Max. 50 mm |
| <i>Pulverized coal fines</i> | 200 mesh pass 65% |
| <i>Mill turn down ratio</i> | NOT IDENTIFIED |
| <i>Primary air temperature at mill outlet</i> | Must not exceed 90 °C whether any kind of coal is used. |

⁶ Razón entre carga máxima y carga mínima.

⁷ Document NO. G1-11.02-MN0012, REV NO. 0

⁸ Se sugiere validar el valor con Guacolda y MHI.

La especificación general de los quemadores se sintetiza en la Tabla 4.

Tabla 4

Especificaciones generales de los quemadores de la Unidad 3 de central Guacolda.

Fuente: Elaboración propia.

| Tipo | Quemador de encendido angular Mitsubishi |
|--|---|
| Número | 4 sets de 4 quemadores cada uno |
| Combustible | Petróleo, carbón pulverizado |
| Accesorios | Sistema de inclinación del quemador Rango mecánico: 25° hacia abajo y 25° hacia arriba Rango mecánico óptimo: 15° hacia abajo y 15° hacia arriba Analizador de llama Agujero de observación |
| Capacidad por quemador (carbón) | 6500 kg/h |
| Capacidad por quemador (petróleo) | 2950 kg/h |
| Presión del vapor a chorro en el quemador | 5 bar g |

La especificación general de la turbina se sintetiza en la Tabla 5.

Tabla 5

Especificaciones generales de la turbina de la Unidad 3 de central Guacolda.

Fuente: Elaboración propia.

| Type | Condensing, reheat, two casting, double down exhaust Flow type, outdoor installation |
|---|---|
| Maximum continuous rating (at generator terminals) | 152.000 kW |
| Speed | 3000 rpm |
| Direction of rotation (View from gov. end) | Clockwise |
| Design steam condition | |
| Inlet steam pressure (MSV inlet) | 160 bar abs. |
| Reheat steam pressure (RSV inlet) | 32,8 bar abs. |
| Inlet steam temperature (MSV inlet) | 537 °C |
| Reheat steam temperature (RSV inlet) | 537,8 °C |
| Exhaust steam pressure (Exhaust mouth) | 0,0377 bar abs |

3 Definición de objetivo de flexibilización de Unidad 3 de Central Guacolda

En este capítulo se presenta una hoja de ruta para una mayor flexibilización - confiable - de Central Guacolda, particularmente de la Unidad 3 (Sección 3.5). Primero se sintetizan los requerimientos regulatorios asociados a la definición de mínimos técnicos de unidades de generación. Posteriormente, se contextualiza el mínimo técnico actual de las unidades de Guacolda en el contexto nacional y de unidades a carbón en EEUU. Previo a la definición de la hoja de ruta de flexibilización confiable, se presentan brechas y una síntesis de alto nivel de factores limitantes observados a una mayor flexibilización de la unidad.

3.1 Requerimientos regulatorios asociados a la definición de mínimo técnico

El Anexo Técnico de Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras⁹ define el mínimo técnico como la potencia activa bruta mínima con la cual una unidad puede operar en forma permanente, segura y estable inyectando energía al sistema interconectado en forma continua. También se indica que el valor de mínimo técnico debe obedecer sólo a restricciones técnicas de operación y no debe considerar restricciones medioambientales.

La definición de mínimo técnico tiene ciertas ambigüedades ya que no precisa el requerimiento asociado a las escalas de tiempo que deben ser utilizadas en la evaluación de las propiedades permanente, estable y continua. Lo anterior es crítico porque en la operación flexible de plantas térmicas se producen fenómenos de desgaste de distinta naturaleza, que comprometen la intención de operación permanente, estable y continua, en distintas escalas de tiempo.

El Anexo Técnico establece que, en casos justificados, se podrá actualizar el mínimo técnico de las unidades generadoras. Entre los motivos para actualizar el mínimo técnico se encuentra:

- Cambio de características de la unidad generadora producto de reparaciones.
- Cambio de las características de la unidad generadora producto de un mantenimiento mayor, que involucre detención de la unidad para el destape del turbogenerador y reemplazo de partes críticas.
- Implementación de mejoras o avances tecnológicos de las unidades generadoras o instalaciones que permitan ampliar el rango de potencia de operación de la unidad.
- Registro de problemas técnicos que impidan que la unidad pueda operar al nivel de mínimo técnico informado al Coordinador.

⁹ Versión 2019: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/DETERMINACIÓN-DE-MÍNIMOS-TÉCNICOS-EN-UNIDADES-GENERADORAS.pdf>

En el Artículo 8 del Anexo Técnico se indica que la empresa generadora debe proporcionar al Coordinador los antecedentes que respaldan el valor de mínimo técnico informado, incluyendo los supuestos y metodologías utilizadas para establecer dicho valor, los que deberán recoger las recomendaciones entregadas por el fabricante y antecedentes operativos que hayan sido registrados durante la operación de la respectiva unidad generadora.

3.2 Mínimo técnico de unidades de Guacolda en el contexto nacional e internacional

La Figura 2 contextualiza el mínimo técnico de todas las unidades a carbón en Chile en comparación con el mínimo técnico de unidades subcríticas de 100 a 400 MW en Estados Unidos. Del análisis de mínimos técnicos que se ha realizado, se infiere que comparativamente las unidades de Guacolda, tanto a nivel nacional como internacional, tienen un mínimo técnico que podría ser considerado entre el primer y segundo cuartil de la muestra observada.

El objetivo de reducción de emisiones; la necesidad de aumentar la flexibilidad del sistema; y el requerimiento de facilitar una operación más económica del sistema producen una presión por una mayor flexibilización de las unidades termoeléctricas e hidroeléctricas. En el contexto de este trabajo, se abordó la flexibilización mediante la evaluación de una mayor reducción del mínimo técnico de la Unidad 3 de central Guacolda.

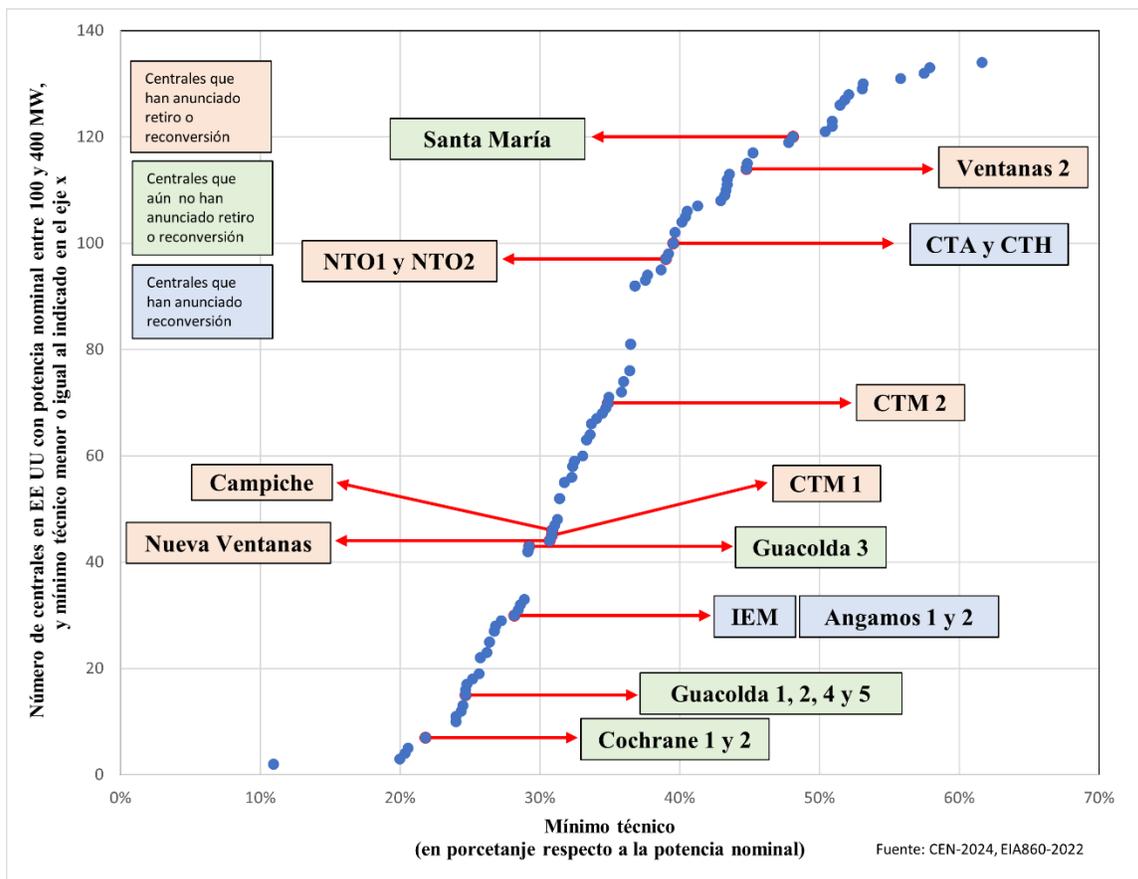
En la Figura 2 se observa que una minoría de unidades a carbón en EEUU han sido capaces de adaptar sus procesos para reducir el mínimo técnico bajo 25% de la potencia nominal¹⁰.

Es crítico distinguir entre la percepción de éxito en la reducción de mínimo técnico en el corto plazo y el desarrollo de la capacidad de operar a mínimo técnico reducido de manera confiable en el mediano y largo plazo, manteniendo la integridad de los activos de generación.

Para lograr una operación flexible confiable, se requiere de un enfoque sistémico que, mediante un proceso sistemático, no solo involucre al activo de generación en su estado actual, sino también su interacción con el ámbito de adaptación tecnológica, la estructuración de procesos, y la gestión de las personas que finalmente son responsables de definir y ejecutar los procesos en la organización.

¹⁰ Datos obtenidos de la EIA, formulario 860 - 2022.

Figura 2
 Benchmark de mínimo técnico en unidades a carbón entre 100 y 400 MW en EEUU y Chile.
 Fuente: Elaboración propia.



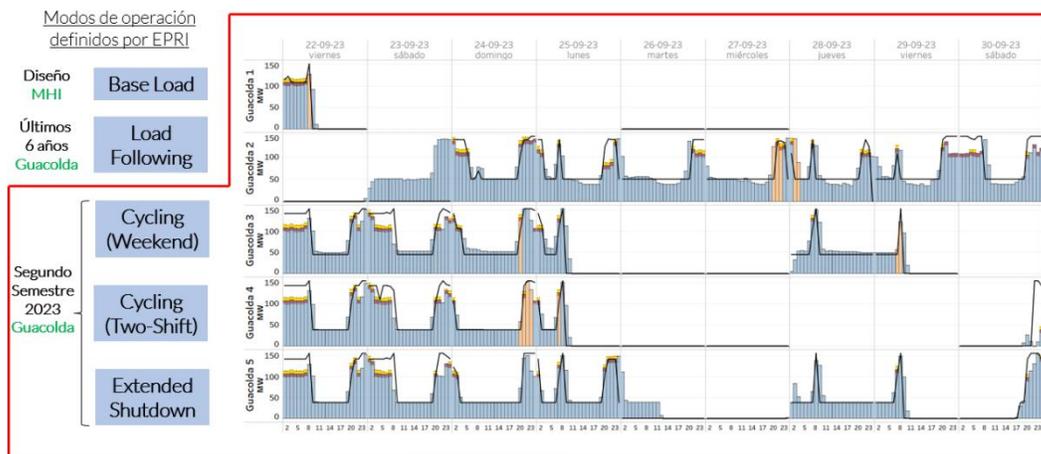
Los mínimos técnicos actuales de central Guacolda son producto de una evolución. En general, el mínimo técnico de las unidades de Guacolda ha estado dentro del rango observado para unidades en EEUU.

3.3 Modos de operación observados en central Guacolda

Central Guacolda actualmente está enfrentando distintos modos de operación en sus distintas unidades. La siguiente figura ilustra modos de operación observados en septiembre de 2023 para las distintas unidades de Guacolda¹¹, periodo en el que se observaron detenciones de distinta duración. Este tipo de operación plantea diversos desafíos desde el punto de vista de prácticas de mantenimiento, procedimientos de preservación, y objetivos de mantener operación confiable perdurable en el tiempo.

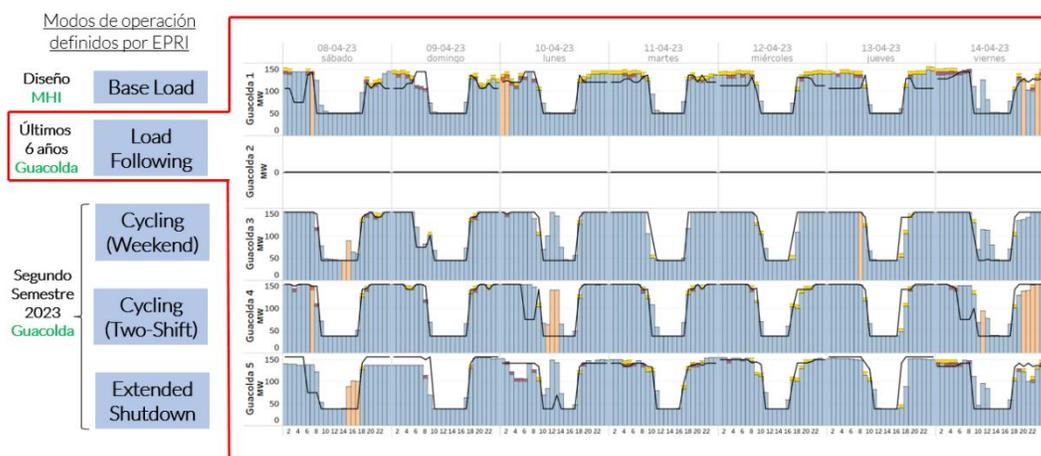
¹¹ En línea operación programada, en barra generación efectiva. El modo de operación Two-shift se puede observar en periodos anteriores, por ejemplo, la operación de Guacolda 3 en 03-11-2022, y Guacolda 4 en 01-11-2022 y 05-11-2022.

Figura 3
 Nuevos modos de operación que ha presentado Guacolda en septiembre 2023 (partidas y paradas frecuentes, con distintos periodos de detención).
 Fuente: Elaboración propia.



En la Figura 4 se observa el modo de operación de seguimiento de demanda neta, donde las unidades operan entre potencia nominal y mínimo técnico. Dicho modo de operación también enfrenta desafíos desde el punto de vista de ajuste de prácticas de mantenimiento y monitoreo de diversas condiciones para mantener la operación confiable en el tiempo, particularmente si a futuro se desea operar a cargas bajo 30% de la potencia nominal de la unidad.

Figura 4
 Modos de operación que ha presentado Guacolda en abril de 2023 (seguimiento de demanda neta).
 Fuente: Elaboración propia.



Nota: Guacolda 2 en mantenimiento desde 11-04-2023 hasta 30-04-2023 según PLP 04-04-2023

El menor tamaño, costo de partida y mínimo técnico de unidades de Guacolda respecto de otras unidades a carbón del sistema, junto a su ubicación en el sistema eléctrico, hacen que las unidades de Guacolda sean prioritarias ante una necesidad sistémica de ciclaje (arranque y detenciones frecuentes de centrales a carbón); lo que representa una condición poco equitativa

desde el punto de vista de la funcionalidad de activos térmicos a carbón en el sistema. Por ejemplo, recientemente las unidades de Guacolda han estado expuestas a distintos tipos de ciclaje - detención durante el fin de semana; detención extendida; y arranque y detención frecuente. En el siguiente cuadro se presentan algunos desafíos del ciclaje persistente en la operación confiable de plantas térmicas.

Cambios en los modos de operación flexible requieren adaptación de procesos y sistemas en las unidades para mitigar, en parte, los efectos en objetivos de mantener una operación confiable persistente en el tiempo.

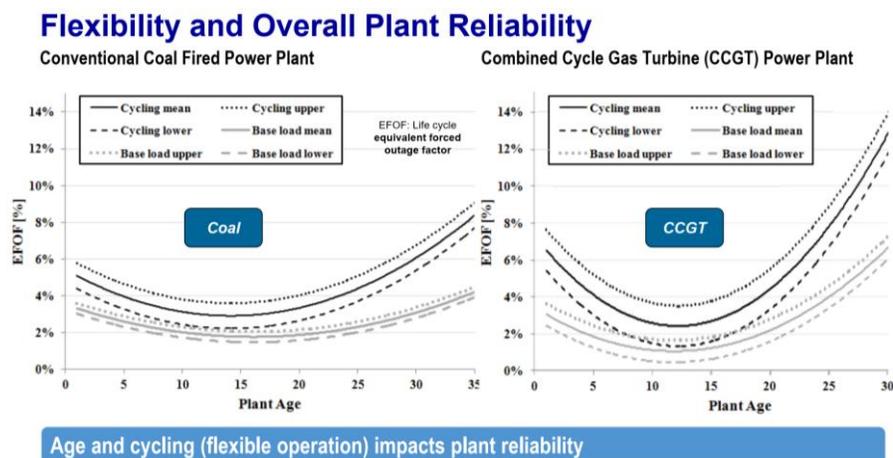
Respecto del impacto de ciclaje persistente en unidades a carbón y ciclos combinados

El efecto de partidas y paradas frecuentes persistentes puede afectar la disponibilidad de unidades térmicas producto de los efectos acumulativos en el deterioro de las máquinas. Según se presenta en la Figura 5, los efectos del ciclaje persistente han sido mayores en la medida que aumenta el periodo en que la unidad ha estado en servicio en dicha condición de operación. Una dinámica similar de aumento de indisponibilidades se puede observar en unidades en Chile (Figura 6).

Los efectos del ciclaje persistente pueden ser mitigados mediante cambios en prácticas de operación y mantenimiento, y el desarrollo de ciertas inversiones para mejorar la condición de la unidad; independiente de ello, en algún momento el ciclaje persistente producirá un aumento en las tasas de falla de las unidades.

En una primera instancia, en la medida que se avanza en la transición energética, la reducción del factor de planta de las unidades puede crear la percepción de que se puede reducir los presupuestos de mantenimiento, no obstante, en un contexto operacional más exigente, dicha estrategia afectará negativamente la disponibilidad de las unidades en el sistema.

Figura 5
Impacto de modo de operación flexible (ciclaje) en tasa de falla de unidades a carbón (imagen izquierda) y de ciclo combinado (imagen derecha).
Fuente: EPRI.

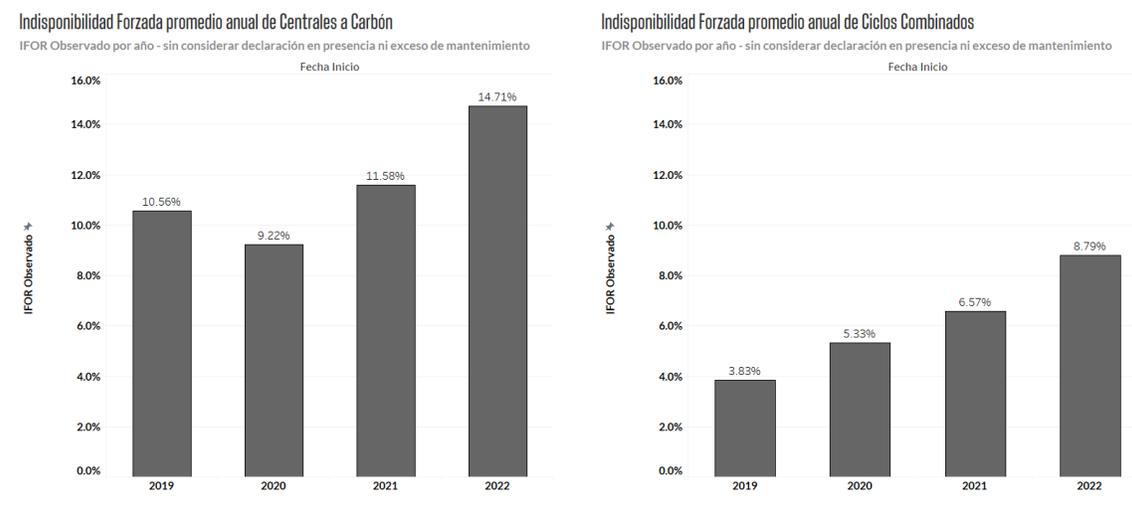


Los efectos acumulativos de desgaste producen indisponibilidades y mantenencias no planificadas que pueden ser de alto costo no solo para los operadores de las unidades, sino también para quienes realizan retiros de energía en el sistema.

En algunos casos, se ha estimado que las mantenencias no planificadas pueden significar alrededor de un 8% del costo de operación y mantenimiento no combustible planificado en unidades de ciclo combinado¹². En casos particulares, se pueden producir fallas de baja probabilidad que pueden producir un impacto importante^{13, 14}.

Una menor disponibilidad del parque térmico ha sido particularmente problemática para el sistema eléctrico en su conjunto (por ejemplo, en agosto de 2021). Durante el proceso de transición energética es crítico que las unidades que continúan en operación mantengan niveles altos de confiabilidad; de no ser así, el proceso de transición tendrá más dificultades y será más costoso para los clientes y operadores de activos.

Figura 6
Evolución del IFOR¹⁵ de unidades térmicas en Chile desde el año 2019. Centrales a carbón (imagen izquierda) y de ciclo combinado (imagen derecha).
Fuente: Elaboración propia.



¹² “Risk-based assessment of unplanned outage events and costs for combined-cycle plants”, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013. ASME.

¹³ “Portland General Electric Company - 2013 Annual Report” (pg. 45): “unplanned plant outages impact the plants’ availability and during the second half of 2013, three different plants had unplanned outages ranging from four weeks to six months as follows (...)” <https://investors.portlandgeneral.com/static-files/7b4a3752-7d34-4199-a26f-0ede9814041e>

¹⁴ “Alliant Energy’s Riverside power plant near Beloit needs \$25 million in repairs” https://madison.com/wsj/business/alliant-energys-riverside-power-plant-near-beloit-needs-25-million-in-repairs/article_3fa6a2b3-025c-5427-b57e-0b75adf7d175.html

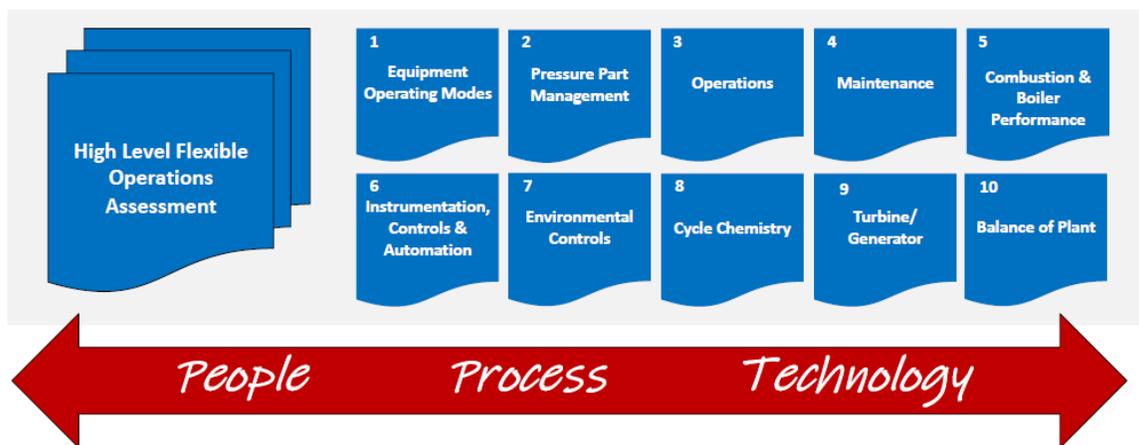
¹⁵ Promedio simple de IFOR de las unidades.

3.4 Brechas y factores limitantes a una mayor flexibilización de la Unidad 3 de Central Guacolda

A partir del segundo semestre del 2022, se procedió a desarrollar un benchmark técnico de flexibilidad a las unidades del complejo Guacolda. Se aplicó el *High-level flexibility assessment* desarrollado por el *Electric Power Research Institute* (EPRI), el cual es una guía estructurada para revisar 10 áreas o macro aspectos relacionados a la operación flexible de una central a carbón. De esta forma, no solo fue posible evaluar el estado de las unidades en términos de su operación flexible y el riesgo de su operación actual, sino también sus vulnerabilidades.

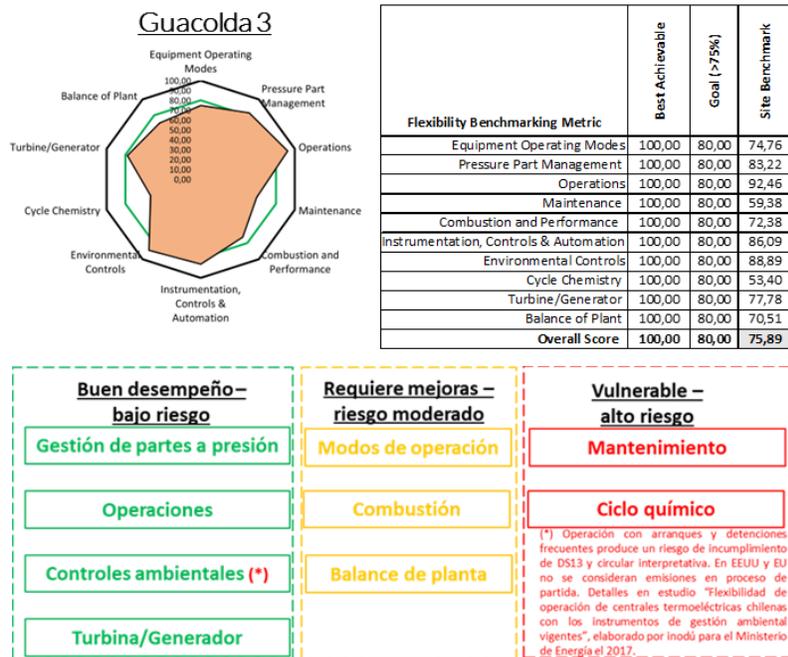
En conjunto con el equipo de Guacolda se analizaron más de 600 aspectos orientados a entender, bajo las nuevas exigencias de operación a las cuáles se ha visto sujeta la planta, no sólo los distintos sistemas y subsistemas, sino también los procesos asociados a la operación y mantenimiento que ejecutan los equipos de las plantas. Las áreas revisadas se indican en la Figura 7.

Figura 7
Áreas evaluadas como parte de la asesoría de flexibilidad.
Fuente: EPRI



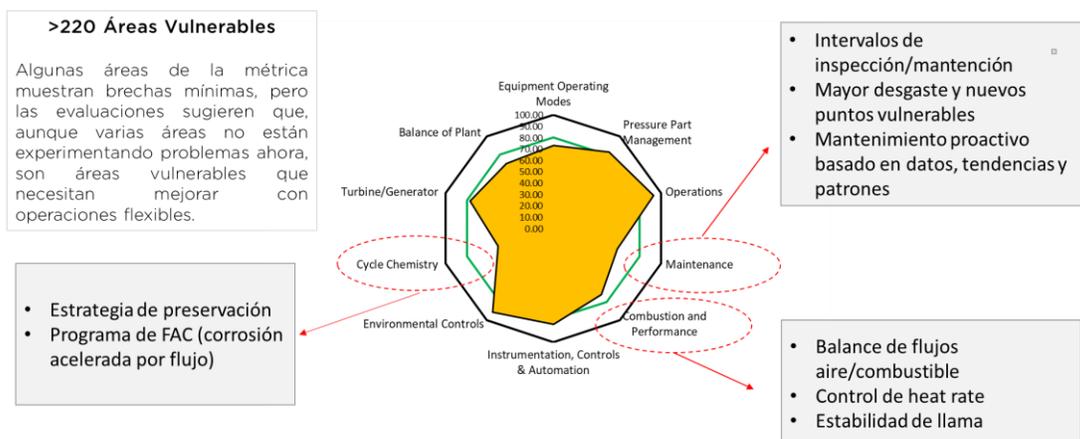
En términos generales, el proceso de benchmark de Guacolda 3 indica que, bajo los nuevos modos de operación flexible de la unidad, ilustrados en la Sección 3.3, es necesario poner atención en áreas o subsistemas que podrían verse fuertemente afectadas, producto de un cambio en el régimen de operación de una unidad que fue diseñada para operar en carga base. Si bien, la unidad ha sido adaptada para operar con un menor mínimo técnico al definido inicialmente, actualmente también tienen la exigencia de operar con partidas y paradas periódicas, con distintos periodos de detención.

Figura 8
 Síntesis de evaluación de flexibilidad de Central Guacolda - Unidad 3
 Fuente: Elaboración propia



Las vulnerabilidades identificadas en este proceso son elementos que deben ser tomados en consideración cuando se busca una mayor flexibilidad, correspondiendo así a puntos de mejora para conseguir el objetivo de operación confiable en nuevos modos de operación de la unidad. De esta forma, se procedió a analizar aquellas áreas de tensión en los equipos producto de los cambios en los modos de funcionamiento que se han observado recientemente.

Figura 9
 Algunos aspectos levantados en evaluación de flexibilidad de central Guacolda - Unidad 3
 Fuente: Elaboración propia

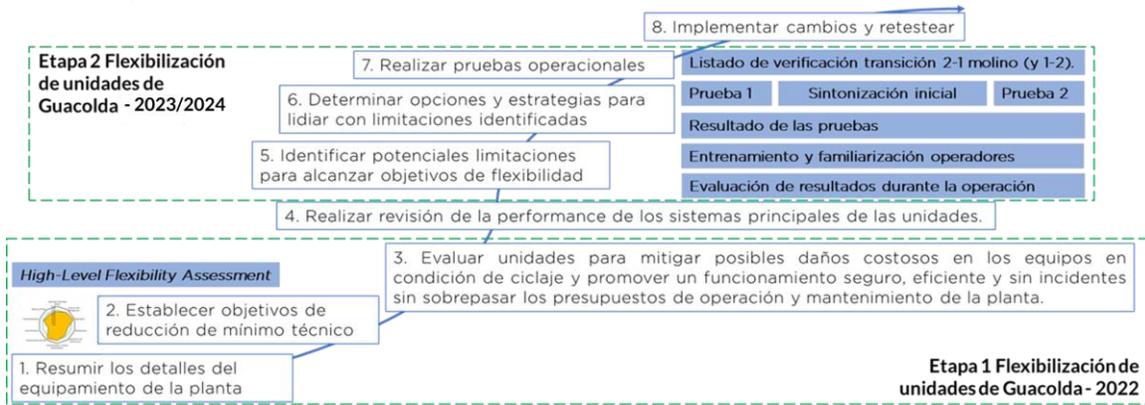


3.5 Hoja de ruta para objetivos de reducción de mínimo técnico de Guacolda 3

Teniendo como referencia el contexto regulatorio vigente y las necesidades levantadas, se ha trabajado en buscar alternativas para reducir el mínimo técnico de Guacolda 3. Actualmente, una mayor reducción de mínimo técnico está limitada, entre otros factores, por la operación a mínimo técnico con 2 molinos. Por este motivo, se exploró la viabilidad de lograr una operación confiable con 1 molino. En el Anexo 6.3 se detallan los principales aspectos asociados a la operación de una central a carbón con un molino en el contexto internacional.

Es importante notar que actualmente la operación con 1 molino no es una práctica estándar en la industria; por lo que representa una innovación importante en la filosofía de operación a mínimo técnico de unidades a carbón, que normalmente operan con 2 molinos en dicha condición. Para la implementación de la medida se ha definido una hoja de ruta que involucra distintos aspectos (Figura 10).

Figura 10
Hoja de ruta de reducción de mínimo técnico.
Fuente: Adaptado de EPRI



Actualmente la Unidad 3 de Guacolda opera a un mínimo técnico de 45 MW (29%), mediante el uso de dos molinos, alimentando dos niveles de quemadores. En primera etapa, la estrategia de mejora y pruebas ha estado enfocada en la reducción del mínimo técnico a 38 MW (26%) mediante la operación de 1 molino (Figura 11). Para ello, se desarrolló un trabajo sistemático para ajustar procesos y sistemas en la unidad y la sala de control.

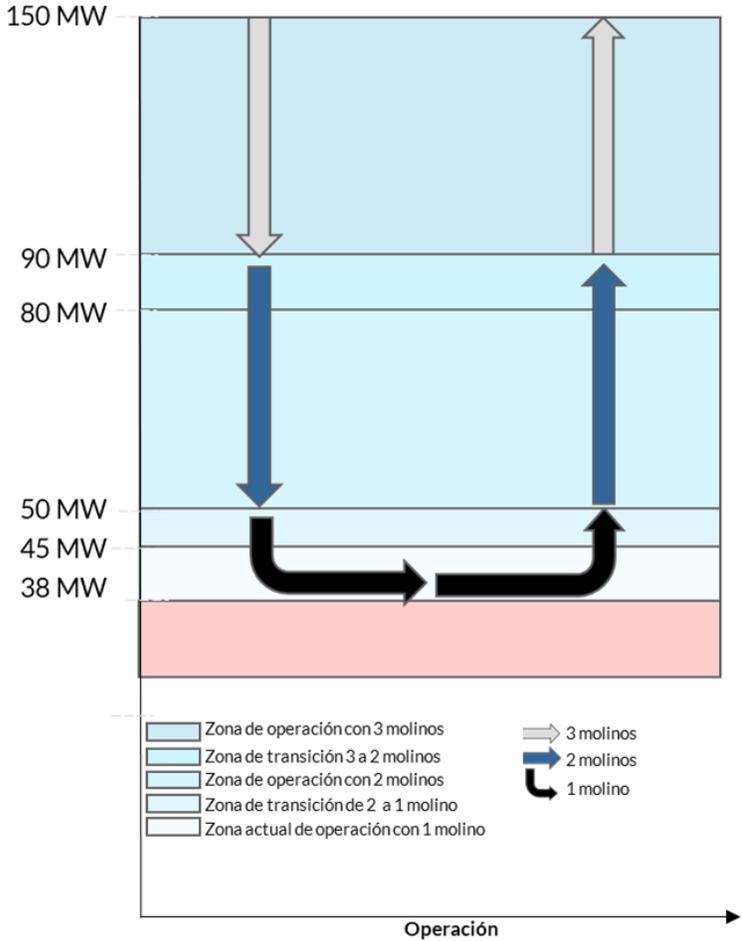
Desde el punto de vista operacional, la operación con un molino refleja una condición de mayor riesgo para la unidad en el sentido que una falla en algunos componentes puede llevar a la desconexión de la unidad del sistema. No obstante, por tratarse de operación a mínimo técnico reducido, dicha situación es de bajo riesgo para el sistema en su conjunto.

Es crítico notar que, generalmente, la reducción de mínimo técnico en el corto plazo puede ser exitosa; el desafío es mantener una operación confiable con mínimo técnico reducido de la unidad en el mediano y largo plazo. Luego, el mínimo técnico de 38 MW tiene la intención de ser un punto de evaluación de la nueva condición de operación e identificación de factores

limitantes que permita no sólo la evaluación de la sostenibilidad de dicha condición, sino también de eventuales opciones de mejora.

Como se verá más adelante en este reporte, dado el estado actual de la unidad, la operación a mínimo técnico reducido con 1 molino a 38 MW representa una serie de desafíos. En este contexto, es deseable una operación estable de la unidad de manera de poder evaluar apropiadamente la mejor forma de abordar los desafíos identificados.

Figura 11
Hoja de ruta de reducción de mínimo técnico.
Fuente: Elaboración propia



3.6 Plan de pruebas de Guacolda 3 a mínimo técnico reducido con un molino

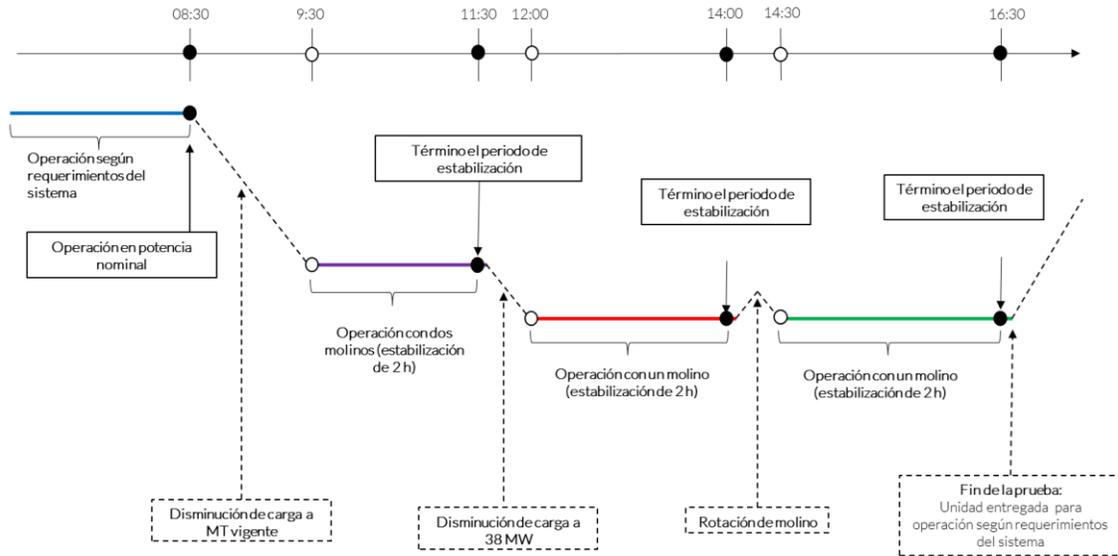
En la Tabla 6 se presenta el plan de pruebas propuesto para la Unidad 3.

Tabla 6
Plan de pruebas propuesto para Guacolda 3.
Fuente: Elaboración propia.

| # | Actividad | Descripción |
|---|--|---|
| 1 | Operación a capacidad nominal | Operar a potencia nominal durante la madrugada. Se deberán registrar los datos de las mediciones definidas durante 1 hora. |
| 2 | Reducción de carga a mínimo técnico actual con 2 molinos | Reducir carga desde potencia nominal hasta alcanzar mínimo técnico actual (45MW) con dos molinos. |
| 3 | Operación estable en mínimo técnico actual con 2 molinos | Estabilizar la operación durante dos horas. Las mediciones serán realizadas tras confirmar la operación estable de la unidad; se deberá registrar los datos de las mediciones definidas. |
| 4 | Reducción de carga a mínimo técnico objetivo con 1 molino (primer molino a evaluar) | Reducir carga gradualmente hasta operar a 38 MW con un molino. Seguir las directrices del listado de verificación de reducción de generación. |
| 5 | Operación estable en mínimo técnico con 1 molino (primer molino a evaluar) | Estabilizar la operación durante al menos dos horas. Las mediciones serán realizadas tras confirmar la operación estable de la unidad; se deberá registrar los datos de las mediciones definidas. |
| 6 | Aumento de carga hasta poner en servicio un segundo molino | Aumento gradual desde 38 MW hasta alcanzar el valor de carga que permita poner en servicio un segundo molino a evaluar y alcanzar una operación estable. Seguir las directrices del listado de verificación de aumento de generación. |
| 7 | Reducción de carga a mínimo técnico objetivo con 1 molino (segundo molino a evaluar) | Reducir carga gradualmente hasta operar a 38 MW con el segundo molino a evaluar. Seguir las directrices del listado de verificación de reducción de generación. |
| 8 | Operación estable en mínimo técnico con 1 molino (segundo molino a evaluar) | Estabilizar la operación durante al menos dos horas. Las mediciones deberán ser ejecutadas tras confirmar la operación estable de la unidad; se deben registrar los datos de las mediciones definidas. |
| 9 | Aumento de carga según exigencias del CEN. | Aumentar carga de acuerdo con instrucción del Coordinador. Se deberá registrar los datos de las mediciones definidas durante 1 hora. |

El esquema de la prueba propuesta se presenta a continuación. En las pruebas se utilizaron distintas combinaciones de molinos, sujeto a la disponibilidad de los equipos en la fecha de las pruebas.

Figura 12
 Esquema de las pruebas realizadas en Guacolda 3
 Fuente: Elaboración propia



4 Análisis de la operación observada durante la prueba de Mínimo Técnico

Posterior a la definición de la estrategia de flexibilización de la Unidad 3 de Central Guacolda, entre mayo de 2023 y marzo de 2024, se han realizado distintos trabajos de pruebas, monitoreo, ajustes y sintonización¹⁶ en la Unidad 3 de Central Guacolda.

En este Capítulo se sintetiza el resultado de la última prueba realizada el 5 de marzo de 2024, posterior al desarrollo de un proceso de sintonización de la unidad.

En la Sección 4.1 se indica parte de la documentación de referencia. En la Sección 4.2 analiza la prueba del 5 de marzo de 2024, posterior a la sintonización de la unidad.

El análisis de la prueba se organiza de la siguiente manera:

1. Cronología planificada de la prueba.
2. Estado inicial de la unidad al momento de desarrollar la prueba.
3. Factores observados durante el desarrollo de la prueba.
 - 3.1. Ensayos de granulometría y carbón utilizado.
 - 3.2. Respecto de la combustión.
 - 3.2.1. Detección de llama en operación a baja carga.
 - 3.2.2. Condiciones observadas en Aire Primario.
 - 3.2.3. Condiciones observadas en Aire Secundario.
 - 3.2.4. Operación de los pulverizadores.
 - 3.2.5. Dinámica de las transiciones de 1 a 2 molinos y de 2 a 1 molino.
 - 3.3. Condiciones de presión y temperatura de vapor.
 - 3.3.1. Condiciones en la entrada y salida del primer atemperador.
 - 3.3.2. Condiciones en la entrada y salida del segundo atemperador.
 - 3.3.3. Condiciones en la entrada y salida del tercer atemperador.
 - 3.3.4. Condiciones a la salida de la caldera.
 - 3.3.5. Condiciones en la entrada a la turbina.
 - 3.3.6. Condición de vapor de escape de la turbina.
 - 3.4. Expansión de la turbina.
 - 3.5. Verificación de cumplimiento de límite de emisiones (DS 13).

¹⁶ La sintonización de la unidad fue realizada por PTS.

- 3.5.1. Temperatura de los gases en la salida de la caldera.
- 3.5.2. Emisión de MP, NO_x, y SO₂.
- 3.6. Operación del sistema de agua de alimentación.
 - 3.6.1. Operación de la bomba de agua de alimentación.
- 3.7. Operación de los calentadores de alta presión.
- 3.8. Control químico.

4.1 Documentación de referencia

Como referencia para las pruebas en la Unidad 3, se utilizaron los siguientes documentos:

- Confirmation test procedure for reduction of minimum operating load, DWG. No. 92100-2082-3.
- Vertical Mill Instruction Manual, DWG No 32300-1067, REV 1.
- Operation and Maintenance Manual (Boiler), DWG No P6-011-452-M01, REV 1.
- Operation and Maintenance Manual (Boiler), DWG No P6-011-452-M02, REV 1.
- Operational & Maintenance Manual (Turbine and Auxiliary), M00-0103-1, Rev. 2
- Air and Fue Gas Flow Diagram (1/2). DWG, No P6-011-229, REV 6.
- Air and Fue Gas Flow Diagram (2/2). DWG, No P6-011-604, REV 3.
- Main Flow Diagram (1/3), DWG No P6-011-221, REV 7.
- Main Flow Diagram (2/3), DWG No P6-011-222, REV 9.
- Main Flow Diagram (3/3), DWG No P6-011-223, REV 7.

4.2 Análisis de la Prueba de Mínimo Técnico mediante Operación con 1 Molino

A continuación, se analiza la prueba del 5 de marzo de 2024, posterior a una sintonización de la Unidad 3 de Central Guacolda. Las nuevas lógicas de control se encuentran implementadas en el sistema de control; se opera en forma semi-automática¹⁷.

4.2.1 Estado inicial de la unidad al momento de desarrollar la prueba

A continuación, se presenta el listado de condiciones operacionales de la Unidad 3 durante la prueba:

- La unidad se encuentra con la lógica de control actualizada; ajustada para condiciones evaluadas en operación a mínimo técnico con 1 molino (detalles en Anexo 6.1).
- La lógica de control vigente utiliza los quemadores en dirección horizontal fija.

Respecto de la disponibilidad de equipos e instrumentos, debido a desafíos de mantenimiento, se identifican los siguientes aspectos:

- El Ventilador Recirculador de Gases (VRG) se encuentra disponible, pero no está en servicio durante la operación.
- La Unidad 3 tuvo 2 mantenimientos previos a las pruebas de mínimo técnico realizadas el 05-03-2024, el primero en noviembre de 2023 y el segundo en febrero de 2024.
- Los registros de aire del OFA¹⁸ poseen problemas de posicionamiento mecánico que no limitan el desarrollo de las pruebas.
- El ventilador de tiro inducido (VTI) presenta desafíos que no limitan el desarrollo de las pruebas.
- El precipitador electrostático presenta desafíos que no limitan el desarrollo de las pruebas.
- Se observan termocuplas que presentan desafíos que no limitan el desarrollo de las pruebas.

¹⁷ Transición de operación entre *2 y 1 molino - 1 y 2 molinos* se realiza de manera manual. Inyección transitoria de diésel en periodos de transición se realiza de manera manual.

¹⁸El problema se manifiesta para porcentaje de apertura entre 40-65% del Over Fire Air (OFA) - Esquina 1- Nivel 1. La apertura mecánica en terreno del registro de aire no se sincroniza respecto a la apertura indicada por DCS.

4.2.2 Cronología de la prueba

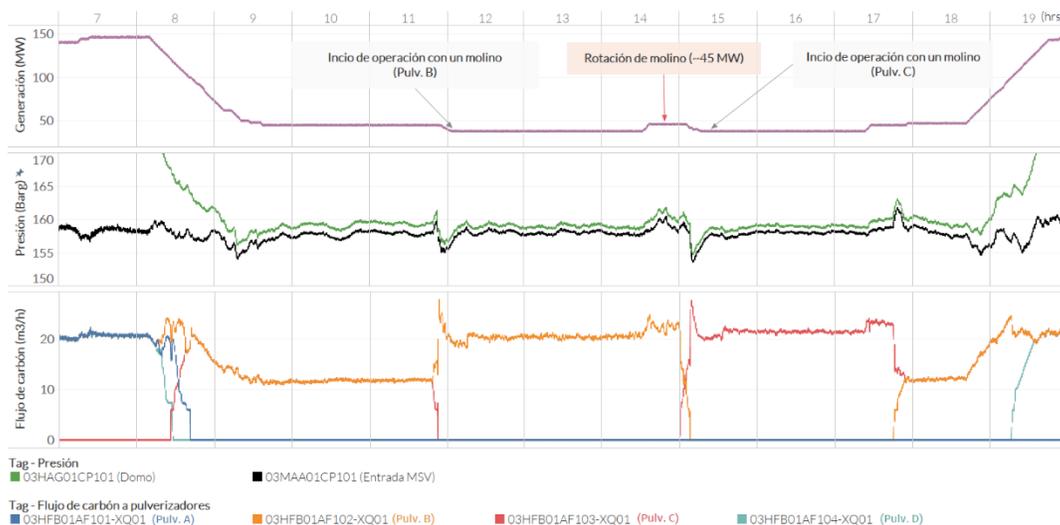
La cronología programada para la prueba se sintetiza en la siguiente tabla. Durante el desarrollo de la prueba se produjeron algunos cambios, no relevantes, en la cronología programada.

Tabla 7
Cronología de la prueba de 05-03-2024
Fuente: Elaboración propia.

| # | Hora aprox. de inicio | Hora aprox. de término | Actividad |
|----|-----------------------|------------------------|--|
| 1 | - | 08:30 | Operación según exigencias de despacho del CEN. |
| 2 | 08:30 | | Inicio de la prueba. |
| 3 | 08:30 | 09:30 | Reducción de carga a mínimo técnico actual (45 MW) con molino B y C. |
| 4 | 09:30 | 11:30 | Operación en mínimo técnico actual (45 MW) con molinos B y C. |
| 5 | 11:30 | 12:00 | Reducción de carga a mínimo técnico objetivo con 1 molino (B). |
| 6 | 12:00 | 14:00 | Operación estable en mínimo técnico con 1 molino (B). |
| 7 | 14:00 | 14:30 | Rotación de molino (B a C). |
| 8 | 14:30 | 16:30 | Operación estable en mínimo técnico con 1 molino (C). |
| 9 | 16:30 | 17:00 | Retorno a operación con dos molinos (B y C) y aumento de carga hasta mínimo técnico. |
| 10 | 17:00 | - | Aumento de carga según exigencias de despacho del CEN. |
| 11 | 17:00 | | Término de la prueba. |

La Figura 13 sintetiza el desarrollo de la prueba. Se presenta la generación de la Unidad 3 (gráfica superior); la presión en el domo y presión de vapor principal (gráfica central); y el flujo de carbón en los pulverizadores (gráfica inferior).

Figura 13
Cronología de 05-03-2024; Generación (imagen superior), presión en el domo y presión de vapor (imagen central), y flujo de carbón a pulverizadores (imagen inferior).
Fuente: Elaboración propia.



En la Figura 13, al relacionar la potencia de la unidad y el flujo de carbón en los molinos, se puede observar hasta las 8:15 am, la operación con tres molinos (A, B y D) a potencia cercana a valores nominales. Luego se observa la reducción de generación hasta mínimo técnico con dos molinos (el molino A y D salen de servicio, y los molinos B y C quedan en operación). Posteriormente, se tiene el primer periodo de operación a mínimo técnico con 1 molino (molino B), donde este incrementa su carga y sale de operación el molino C. Finalmente, se realiza un aumento de generación para realizar el cambio de molino (el molino B sale de servicio y entra el molino C), para posteriormente volver a reducir la generación sólo con el molino C.

Durante las transiciones se deben observar, entre otras cosas, la presión de vapor principal y las emisiones. En la Figura 13 es importante notar los periodos de transición de operación con 2 molinos a operación con 1 molino, donde uno de los molinos sale o entra en servicio. Una de las variables críticas que se monitorea durante la operación es la estabilidad de la presión del vapor principal y MSV. Actualmente, por política de control, se acepta una variación de ± 4 barg respecto del set point¹⁹. En general, durante los periodos de transición, se produce una oscilación que debe ser cuidadosamente monitoreada y controlada.

Además, en la transición de 2 a 1 molino también se produce una oscilación en el flujo de carbón en el molino que queda en operación. Producto de ello, se monitorean distintas variables en la operación del molino (corriente, flujo, vibración, presión de descarga, presión de diferencial de mesa, presión de aire seco, flujo de aire seco, entre otras).

Cuando se enciende un molino para pasar de 1 a 2 molinos o cuando se apaga un molino para pasar de 2 a 1 molino, se utiliza combustible auxiliar diésel como medida de seguridad.

4.2.3 Factores observados durante la prueba

Se monitoreó y evaluó la estabilidad de la operación de la Unidad 3 en operación a mínimo técnico reducido de 38 MW con un único molino en operación. Además, se evaluó el cumplimiento del listado de verificación y la dinámica de las transiciones en la operación entre 2 y 1 molino (reducción de carga), y entre 1 y 2 molinos (aumento de carga).

A continuación, se presentan los resultados observados, distribuidos en 7 categorías:

- A. Granulometría y carbón utilizado,
- B. Estabilidad de la combustión,
- C. Condiciones de presión y temperatura del vapor,
- D. Expansión de la turbina,
- E. Verificación del cumplimiento de los límites de emisiones,
- F. Operación del sistema de agua de alimentación,
- G. Control químico.

¹⁹ Un aspecto por evaluar a futuro tiene relación a si es necesario mantener este criterio o es deseable modificarlo. En caso que sea deseable modificarlo, se debe validar y verificar apropiadamente la definición de un nuevo criterio.

A Medición de granulometría del carbón pulverizado

Se cuenta con información de los tipos de carbón utilizados por Guacolda (detalles en Anexo 6.4). La mezcla utilizada el 5 de marzo de 2024 corresponde 35% de Alta Ceniza, 15% Alto Azufre y 50% Drummond.

El resultado de la medición de granulometría se sintetiza en la siguiente tabla.

Tabla 8

Muestras de granulometría del carbón tomadas en la Unidad 3 durante la prueba

Fuente: Elaboración propia.

| Tipo de operación | | Operación con 3 molinos a 148 MW | | | Operación con 2 molinos a 50 MW | | Operación con un molino a 38 MW | Operación con un molino a 38 MW |
|-------------------|--------|----------------------------------|-----------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|
| Hora de muestreo | | 07:10 | 07:15 | 07:20 | 11:10 | 11:25 | 14:25 | 15:55 |
| Malla | unidad | Molino 3A | Molino 3B | Molino 3D | Molino 3B | Molino 3C | Molino 3B | Molino 3C |
| Malla 50 | % | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,6 | 0 | 0,25 |
| Malla 100 | % | 0 | 0 | 7,65 | 0,4 | 4,8 | 0,3 | 2 |
| Malla 140 | % | 0 | 0,15 | 17,9 | 3,1 | 10,75 | 3,2 | 5,5 |
| Malla 200 | % | 0,15 | 0,35 | 19,65 | 3,95 | 17 | 4,75 | 11,8 |
| Fondo 200 | % | 99,85 | 99,5 | 53,8 | 92,55 | 66,85 | 91,75 | 80,45 |

Al cambiar la forma de operar de dos molinos a un molino, el flujo de carbón hacia el pulverizador en servicio aumentó de 11,8 a 20,5-21,5 m³/hora en promedio.

EPRI recomienda que el fondo en malla de 200 debe ser mínimo 70%²⁰. Durante la prueba se observó:

- La muestra de carbón molido tomada del molino B a las 14:25 está 21,75% sobre el estándar recomendado.
- El cambio de operación de 2 a 1 molino reduce el desempeño de la molienda del pulverizador B.
- La muestra de carbón molido tomada del molino C a las 15:55 está 10,45% sobre el estándar recomendado.
- El cambio de operación de 2 a 1 molino genera en el pulverizador C un mejor desempeño de la molienda.
- Se evidencia una baja molienda en el pulverizador D en operación a plena carga (07:20); no obstante, este molino no fue utilizado durante la prueba de mínimo técnico.

²⁰El estándar EPRI implementado en el estudio de flexibilidad implementado en 2022 indica; fondo en malla de 200 mínimo de 70%, y óptimo mayor a 75%. El manual de los pulverizadores de la U3 indica un valor mínimo de 60%.

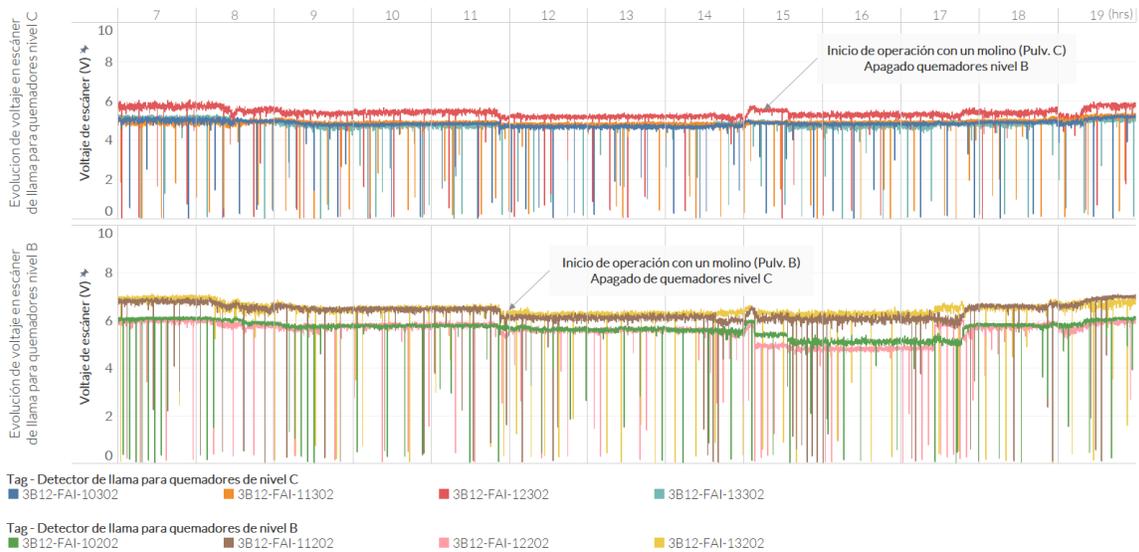
B Respeto de la combustión

A continuación, se analizan distintos aspectos relacionados al proceso de combustión de la Unidad 3.

1 Detección de llama en operación a baja carga

La Unidad 3 tiene instalado un sistema de detección de llama infrarrojo de MHI. El voltaje del detector de llama en los quemadores del nivel B y C, con las etapas de la prueba debidamente identificadas, se presenta en la siguiente figura.

Figura 14
Voltaje en detectores de llama para quemadores de nivel B y C durante la prueba
Fuente: Elaboración propia.



Según criterio desarrollado por la experiencia de Guacolda, un voltaje en detector de llama mayor a 3,5 V permite inferir presencia de una llama estable²¹. Al respecto, se identificó lo siguiente:

- Durante el funcionamiento del molino B se observó una detección de llama estable. Entre las 12:20 y las 14:20, se observan valores de voltaje en detector de llama entre 5,5 y 6,3 V. Se identifica diferencias en las mediciones de voltaje entre 2 grupos quemadores del nivel de quemadores B (3B12-FAI-11202/3B12-FAI-13202 vs. 3B12-FAI-10202/3B12-FAI-12202).
- Durante el funcionamiento del molino C se observó una detección de llama estable. Entre las 15:20 y las 17:20, se observan valores de voltaje en detector de llama entre 4,5 y 5,5 V. En comparación con la medición de la operación del molino B, se identifica diferencias en

²¹ No se identifica un valor mínimo que indique estabilidad de llama en el manual del sistema de detección de llama de la Unidad 3, documento N° I6-996-371.
Durante la prueba del día 05-03-2024 no se realiza inspección visual en terreno de la estabilidad de llama.

las mediciones de voltaje de un detector de llama del nivel de quemadores C (3B12-FAI-12302) respecto a los 3 restantes.

- La diferencia entre grupos de escáner de los molinos B y C no se identifica como un aspecto crítico que deba ser atendido con urgencia.

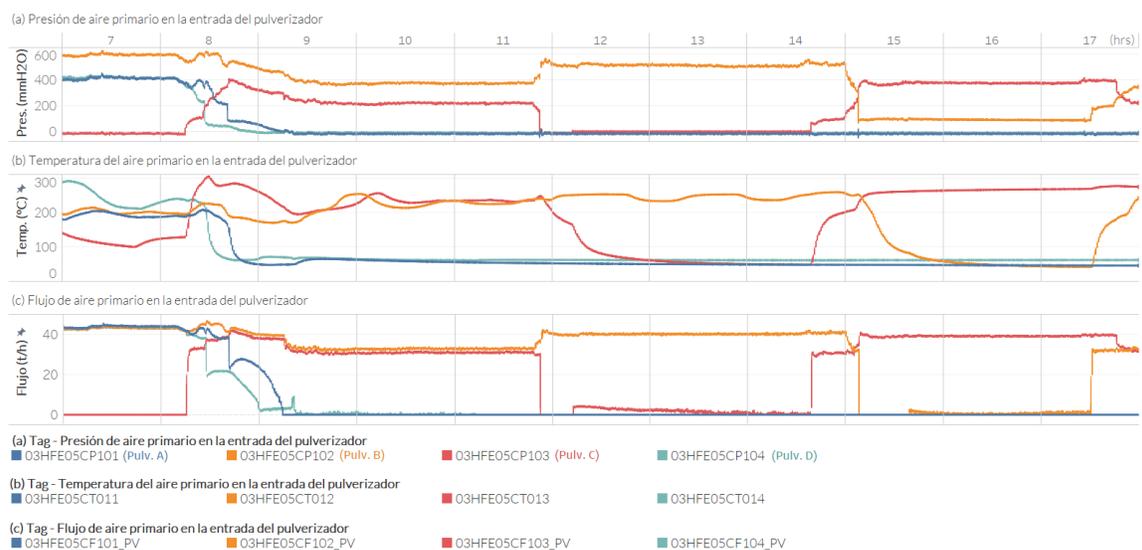
2 Condiciones observadas en aire primario

Se analizaron los parámetros vinculados al aire primario que llega a los pulverizadores y la temperatura del aire en salida del pulverizador; particularmente se analizó presión, temperatura y flujo. Los resultados se resumen en la siguiente figura.

Figura 15

VARIABLES DE OPERACIÓN EN LA ENTRADA DE LOS PULVERIZADORES. Presión de aire primario en imagen superior, temperatura en el centro y flujo en la sección inferior.

Fuente: Elaboración propia.



Se identificó lo siguiente:

- Durante el funcionamiento del molino B, entre las 12:20 y las 14:20, la temperatura de entrada de aire primario en el pulverizador fue en promedio 250 °C. MHI indica una temperatura de entrada a los pulverizadores de 277 °C²².
- Durante el funcionamiento del molino C, entre las 15:20 y las 17:20, la temperatura de entrada de aire primario en el pulverizador fue en promedio 264°C.
- Al operar solo con un pulverizador (B o C) se observa un aumento del flujo y presión de aire primario a la entrada del molino. El flujo de aire en la entrada aumenta a valores similares para el pulverizador B y C, pero en el caso de la presión se observa un aumento diferente para la operación con el pulverizador B y C (mayor aumento en pulverizador B).

²² Información de referencia a partir de antecedentes disponibles del proveedor (MHI).

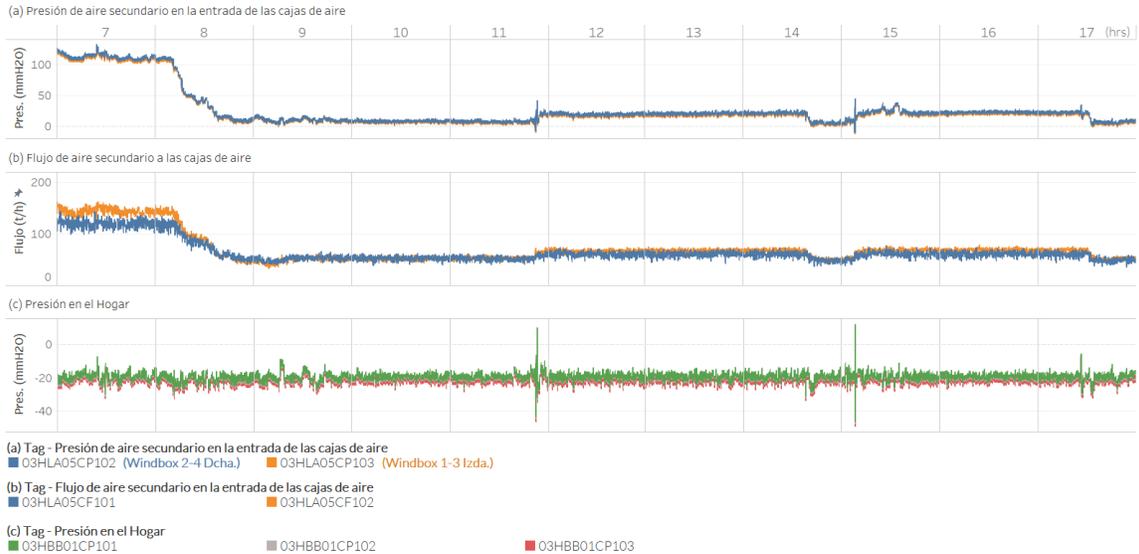
3 Condiciones observadas en aire secundario

Se analizaron los parámetros de presión y flujo del aire secundario que llega a las cajas de aire (*Wind Box*)²³. La dinámica observada se presenta en la siguiente figura.

Figura 16

VARIABLES DE OPERACIÓN EN LA ENTRADA DE LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR. Presión de aire secundario a las cajas en la imagen superior, presión en el hogar en el centro, y flujo de aire secundario a las cajas en la parte inferior.

Fuente: Elaboración propia.



Se identificó lo siguiente:

- Al operar con el molino B, entre las 12:20 y las 14:20, la presión a la entrada de las cajas fue en promedio 19 mmH₂O.
- Al operar con el molino C, entre las 15:20 y las 17:20, la presión a la entrada de las cajas fue en promedio 21 mmH₂O.
- Al comparar la operación con un molino entre las 12:20-14:20 (Pulv. B) y 15:20-17:20 (Pulv. C) respecto a la operación con dos molinos entre las 09:30-11:30 (Pulv. B y C), se observa un aumento del flujo y presión de aire secundario a la entrada de las cajas (*Wind Box*).
- Durante la operación con un molino (B o C) la presión en el hogar fue en promedio -20 mmH₂O. Al inicio de los periodos de transición de 2 a 1 molino se observan valores extremos (*peak*) en la presión del hogar.

²³ Según *Air and Flue Gas Flow Diagram (1/2), P6-011-229, Rev6* la presión y flujo de aire secundario se controla a las entradas de las cajas de aire.

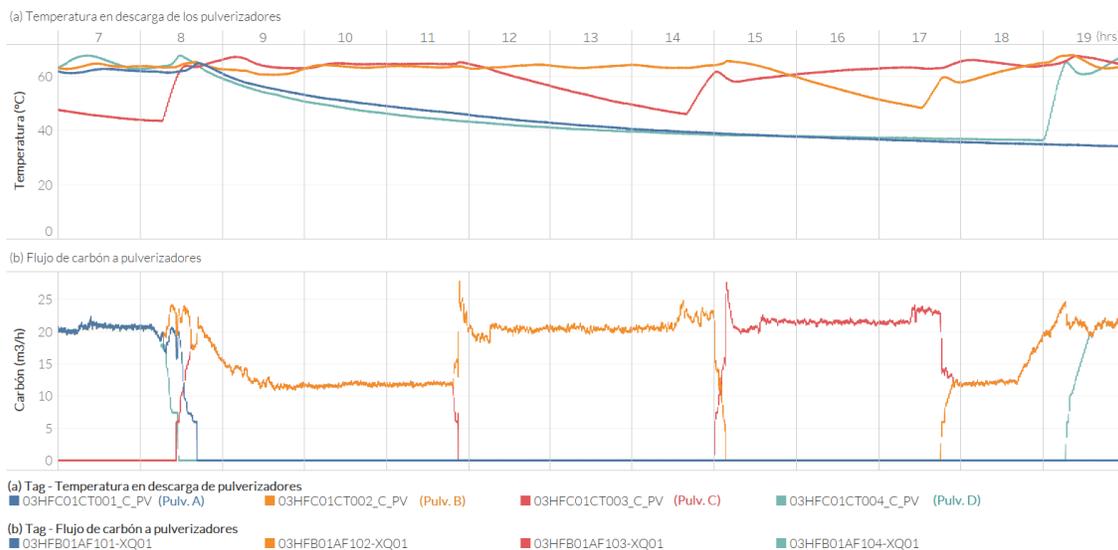
4 Operación de los pulverizadores

El manual de operación de la caldera de Guacolda 3 indica que los molinos instalados tienen las siguientes características²⁴:

- Capacidad máxima de diseño de 25,8 toneladas/hora²⁵.
- Para Guacolda 3 se utiliza como referencia el antecedente de diseño de los pulverizadores de las unidades 1 y 2 dada la similitud en los modelos de pulverizadores entre unidades (U1, U2: MVM21F, U3: MVM21R). Se considera *Turndown ratio* de 2:1, equivalente a una capacidad mínima de 50%^{26, 27}.

Los resultados del flujo de carbón en metros cúbicos/hora, a través de los molinos en operación se presentan en la siguiente figura.

Figura 17
Flujo de carbón a través de los pulverizadores durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.



Se identificó lo siguiente:

- Durante el funcionamiento del molino B entre las 12:20-14:20, la temperatura de descarga del pulverizador fue en promedio 63 °C. MHI define una temperatura normal en la descarga de los pulverizadores de 66~82°C²⁸.
- Durante el funcionamiento del molino C entre las 15:20-17:20, la temperatura de descarga del pulverizador fue en promedio 62°C.

²⁴ Molino vertical MVM21R de MHI.

²⁵ DRAWING NO 32300-1067, REV No 1.

²⁶ Document NO. G1-11.02-MN0012, REV No 0.

²⁷ Se sugiere validar el valor con Guacolda y MHI.

²⁸ Operation and Maintenance Manual (Boiler), DWG No P6-11-452-M02, REV 1.

- En la operación en mínimo técnico vigente con 2 molinos entre las 09:30-11:30, se observa un flujo de carbón cercano a las 11,8 m³/hora en cada molino.
- Al operar con 1 molino en 38 MW se alcanzan valores de flujo de carbón al pulverizador cercanos a las 20,5 m³/hora para el molino B y 21,5 m³/hora para el molino C.
- El sistema de control de las unidades 1 y 2 registra el flujo individual de carbón a los pulverizadores en ton/h. Los datos observados y analizados de flujo individual de carbón a los pulverizadores en Guacolda 3 tienen unidades de medida de m³/h. Se informa que se cuenta adicionalmente con la conversión de flujo de carbón de m³/h a ton/h en la Unidad 3.
- No se han realizado ensayos específicos que permitan la verificación del balance de flujos para operación en baja carga.

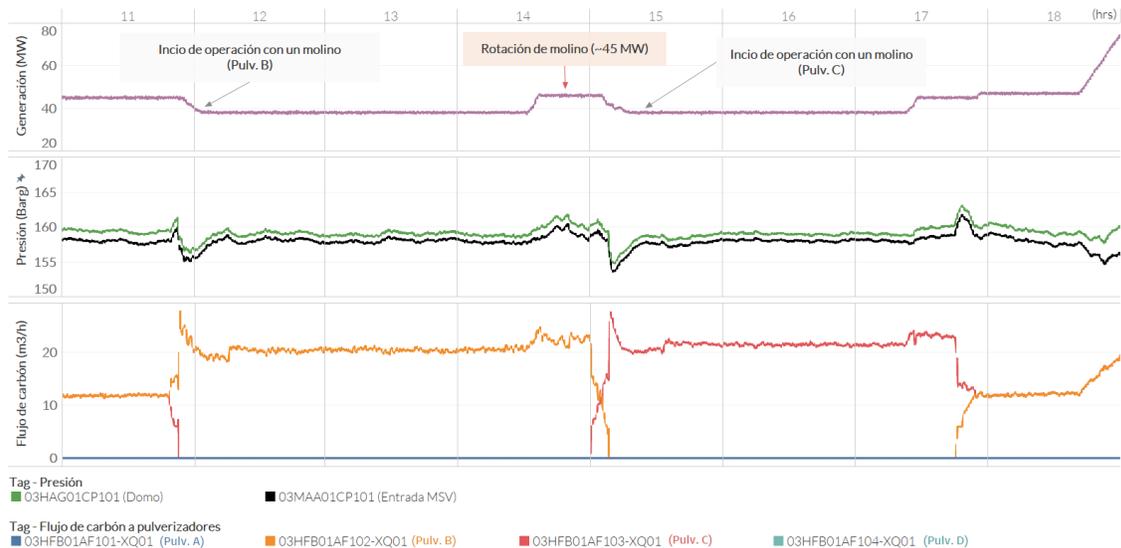
5 Dinámica de las transiciones de 1 a 2 molinos y de 2 a 1 molino

Para facilitar el trabajo de los operadores, Guacolda desarrolló una lista de verificación de reducción y aumento de carga. La lista de verificación se utiliza para apoyar un proceso verificable de transición de 2 molinos a 1 molino y de 1 molino a 2 molinos.

Figura 18

Transiciones de operación de 1 a 2 molinos y 2 a 1 molino durante la prueba del 5 de marzo.

Fuente: Elaboración propia.



Se identificó lo siguiente para el periodo de transición:

- La desconexión de un molino (molino B - 15:08 horas) involucra un aumento de carga repentino en el molino que queda en operación (C), lo que produce una oscilación en su operación. En casos extremos puede producir el accionamiento de los sistemas de protección del molino. Se ha definido por parte de Guacolda el punto adecuado para realizar la transición para minimizar dicho riesgo (~ 45 MW).

- La conexión del molino que entra de operación (molino B - 17:46 horas) involucra una reducción de carga repentina en el molino que está en servicio (C), lo que produce una oscilación en su operación. En casos extremos puede producir el accionamiento de los sistemas de protección del molino.
- Una de las variables críticas monitoreadas es la estabilidad de la presión de vapor principal. Por política de control se acepta una variación de ± 4 barg respecto del *set point*²⁹. En general durante los periodos de transición se produce una oscilación que debe ser cuidadosamente monitoreada y controlada.

Como protocolo de protección, si el operador detecta una potencial inestabilidad en la operación de un molino, enciende el sistema de ignitores diésel de manera manual. Lo indicado anteriormente se realiza por protocolo en la transición de 1 molino a 2 molinos y de 2 molinos a 1 molino.

C Condiciones de presión y temperatura del vapor

Se analizaron las condiciones de presión y temperatura en la caldera y la turbina. Para realizar una comparación objetiva se utilizó información de referencia a partir de antecedentes disponibles del proveedor (MHI).

En general, se observó un comportamiento aceptable del sistema de atemperación, lo que permitió un control de la temperatura del vapor en esta nueva condición de operación (mínimo técnico reducido).

Adicionalmente, se monitoreó la temperatura de los metales de los bancos de tubos de la caldera de Guacolda 3. Para termocuplas en condiciones normales, no se observaron alarmas por sistema de control para la temperatura en los metales de tubos de caldera.

A pesar de que no se observaron alarmas durante las pruebas de operación con un pulverizador, en la Figura 19 se observa que a las 19:47 horas de 05-03-2024 la termocupla 03HAJ03CT012 (PT-2) del tercer recalentador registra una temperatura máxima de 579,8°C, por sobre valores normales³⁰. La medición en la termocupla PT-2 difiere de los valores medidos en las termocuplas 03HAJ03CT011 (PT-1) y 03HAJ03CT013 (PT-3).

Además, se identificaron algunas termocuplas con desafíos de medición³¹. Luego, se sugiere verificar estado de termocuplas de interés.

²⁹ Un aspecto por evaluar a futuro tiene relación con si es necesario mantener este criterio o es deseable modificarlo. En caso de que sea deseable modificarlo, se debe validar y verificar apropiadamente la definición de un nuevo criterio.

³⁰ El documento *Operational and Maintenance Manual (Boiler), DWG P6-011-452-M02, Rev 1* especifica: *Reheater Final, Metal temp. annunciator set point 572 °C.*

³¹ Durante las pruebas de 05-03-2024 la termocupla 03HAH03CT011 del tercer sobrecalentador (PT-1) y la termocupla 03HAH04CT011 del cuarto sobrecalentador (PT-1) mostraban una medición fija de 600 °C. Personal de planta informa que las termocuplas mencionadas se encontraban con aviso a mantención.

Figura 19

Efectos de la atemperación entre la salida del segundo sobrecalentador (SH2) y salida del primer atemperador (DSH1) durante la prueba del 05-03-2024.

Fuente: Elaboración propia.



Se sugiere revisión de alarmas configuradas, la calibración y ajustes de los instrumentos de medición de temperatura en los bancos de tubo de la caldera.

1 Condiciones de vapor a la entrada y salida del primer atemperador

Se monitoreó la temperatura del vapor en la caldera. El primer punto analizado es el primer atemperador que opera entre la salida de vapor del segundo sobrecalentador y la entrada del tercer sobrecalentador.

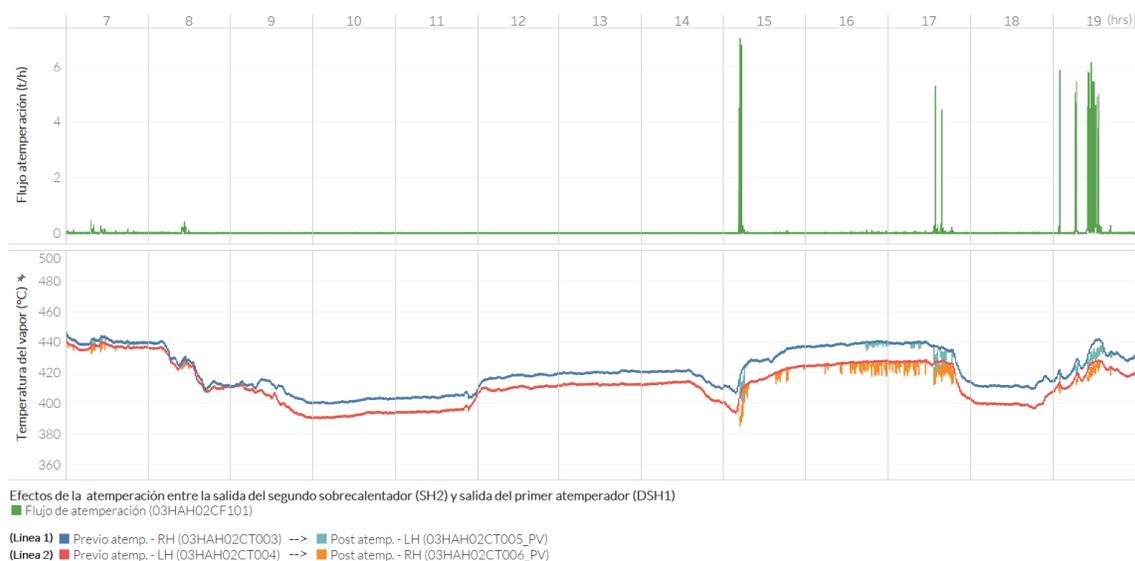
El atemperador aplica agua para reducir la temperatura del vapor (curva azul y roja) y producir vapor atemperado (curva turquesa y naranja). La Figura 20 presenta los valores correspondientes al flujo de agua de atemperación; la temperatura del vapor antes de la atemperación; y la temperatura del vapor después de la atemperación.

La termocupla 03HAH04CT014 del cabezal del cuarto sobrecalentador (R), se observa con un valor de temperatura fijo en 600 °C. Personal de planta informa que ese instrumento al día 05-03-2024 no tenía aviso para mantenimiento.

Figura 20

Efectos de la atemperación entre la salida del segundo sobrecalentador (SH2) y salida del primer atemperador (DSH1) durante la prueba del 05-03-2024.

Fuente: Elaboración propia.



El análisis del efecto de la atemperación ilustrado en la Figura 20, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

Operación con el molino B (12:20 a 14:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 20, para una medición puntual en operación con el molino B, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9

Medición puntual de temperaturas del vapor posterior al segundo sobrecalentador, y posterior al primer atemperador en la operación del molino B.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de sobrecalentador 2 (SH2) | T° posterior a atemperador 1 (DSH1) |
|-------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| 14:20 | Medición en línea 1 de vapor | 421°C (curva azul) | 421 °C (curva turquesa) |
| | Medición en línea 2 de vapor | 413,6°C (curva roja) | 413,6 °C (curva naranja) |
| | Referencia MHI ³² | 446°C | 420 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Se observa flujos de atemperación durante los periodos de traspaso entre molinos a las 15:10 (sensor F0002 - curva verde).
- Durante la operación del molino B entre las 12:20 y las 14:20 no se observa operación de la atemperación de vapor. Por ejemplo, al analizar la línea 1 de vapor y comparar la curva azul (anterior al atemperador) con la curva turquesa (posterior al atemperador), se observa

³² No existe un balance de caldera para 25%, se trabaja con el valor más cercano disponible en documentación del fabricante (*Operation and Maintenance Manual (Boiler)*, DWG No P6-011-452-M02, REV 1)

que la temperatura del vapor se mantiene aproximadamente constante desde la salida del SH2 hasta la salida del DSH1.

- La temperatura promedio³³ observada en la salida del segundo sobrecalentador es ~417,3 °C y a la salida del primer atemperador es ~417,3°C. Las temperaturas promedio observadas son menores a la referencia MHI.

Operación con el molino C (15:20 a 17:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 20, para una medición puntual en operación con el molino C, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 10

Medición puntual de temperaturas del vapor posterior al segundo sobrecalentador, y posterior al primer atemperador en la operación del molino D.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de sobrecalentador 2 | T° posterior a atemperador 1 |
|-------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 17:20 | Medición en línea 1 de vapor | 439 °C (curva azul) | 439 °C (curva turquesa) |
| | Medición en línea 2 de vapor | 427 °C (curva roja) | 422°C promedio (curva naranja) |
| | Referencia MHI | 446°C | 420 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante la operación del molino C entre las 15:20 y las 17:20 se observa operación leve de la atemperación de vapor. Por ejemplo, al analizar la línea 2 de vapor y comparar la curva roja (anterior al atemperador) con la curva naranja (posterior al atemperador), se observa que la temperatura del vapor varía desde la salida del SH2 hasta la salida del DSH1 por efectos de la atemperación.
- La temperatura promedio observada en la salida del segundo sobrecalentador es ~433 °C. Las temperaturas promedio observadas a la salida del segundo sobrecalentador son menores a la referencia MHI, pero mayores a las temperaturas obtenidas con el molino B.
- La temperatura promedio observada en la salida del primer atemperador es ~433 °C. Las temperaturas promedio observadas a la salida del segundo sobrecalentador son mayores a la referencia MHI, y mayores a las temperaturas obtenidas con el molino B.

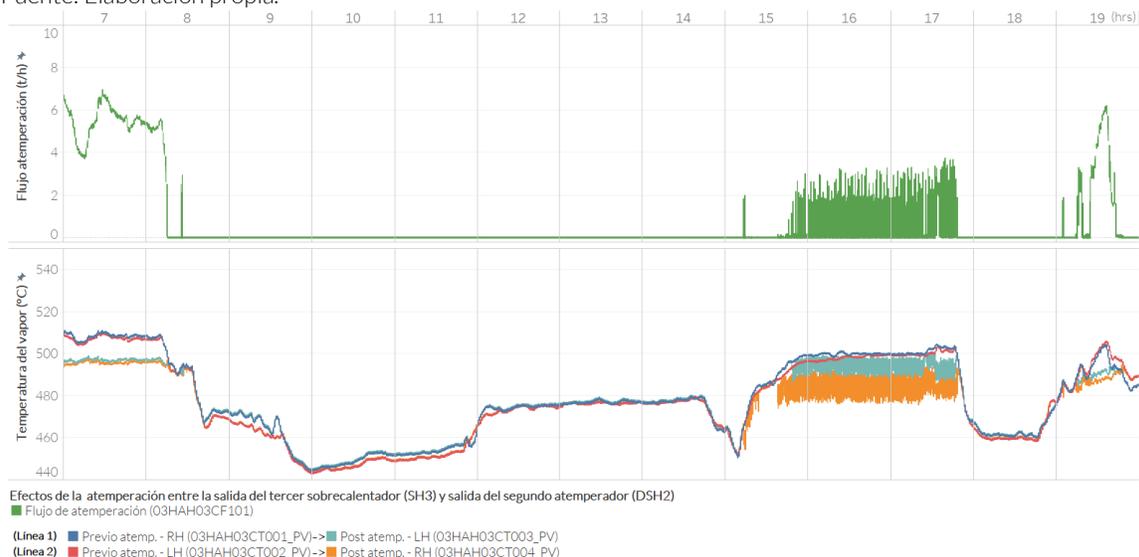
2 Condiciones de vapor a la entrada y salida del segundo atemperador

El segundo atemperador opera entre la salida de vapor del tercer sobrecalentador y la entrada del cuarto sobrecalentador. El vapor sale del tercer sobrecalentador por dos líneas donde se toman mediciones de temperatura, antes y después de atemperar.

³³ Promedio calculado entre temperatura de línea 1 y 2.

La Figura 21 presenta los valores correspondientes al flujo de agua de atemperación; la temperatura del vapor antes de la atemperación; y la temperatura del vapor después de la atemperación.

Figura 21
Efectos de la atemperación entre la salida del tercer sobrecalentador (SH3) y salida del segundo atemperador (DSH2) durante las pruebas del 05-03-2024.
Fuente: Elaboración propia.



El análisis del efecto de la atemperación ilustrado en la Figura 21, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

Operación con el molino B (12:20 a 14:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 21, para una medición puntual en operación con el molino B, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 11
Medición puntual de temperaturas del vapor posterior al tercer sobrecalentador, y posterior al segundo atemperador en la operación del molino B.
Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de sobrecalentador 3 (SH3) | T° posterior a atemperador 2 (DSH2) |
|-------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| 14:20 | Medición en línea 1 de vapor | 477 °C (curva azul) | 477 °C (curva turquesa) |
| | Medición en línea 2 de vapor | 477 °C (curva roja) | 477 °C (curva naranja) |
| | Referencia MHI | 494 °C | 483 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante la operación del molino B entre las 12:20 y las 14:20 no se observa operación de la atemperación de vapor. Por ejemplo, al analizar la línea 1 de vapor y comparar la curva azul (anterior al atemperador) con la curva turquesa (posterior al atemperador), se observa

que la temperatura del vapor se mantiene aproximadamente constante desde la salida del SH3 hasta la salida del DSH2.

- La temperatura promedio observada en la salida del tercer sobrecalentador es $\sim 477\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a la salida del segundo atemperador es $\sim 477\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas promedio observadas son menores a la referencia MHI.

Operación con el molino C (15:20 a 17:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 21, para una medición puntual en operación con el molino C, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12

Medición puntual de temperaturas del vapor posterior al tercer sobrecalentador, y posterior al segundo atemperador en la operación del molino C.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de sobrecalentador 3 | T° posterior a atemperador 2 |
|-------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 17:20 | Medición en línea 1 de vapor | 500 °C (curva azul) | 493 °C (curva turquesa) |
| | Medición en línea 2 de vapor | 499 °C (curva roja) | 482 °C (curva naranja) |
| | Referencia MHI | 494 °C | 483 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante el funcionamiento del molino C, entre las 15:20 y las 17:20, se observa la operación de la atemperación (sensor O3HAH03CF101– curva verde).
- Durante la operación del molino C entre las 15:20 y las 17:20 se observa operación de la atemperación de vapor. Por ejemplo, al analizar la línea 2 de vapor y comparar la curva roja (anterior al atemperador) con la curva naranja (posterior al atemperador), se observa que la temperatura del vapor varía desde la salida del SH3 hasta la salida del DSH2 por efectos de la atemperación.
- La temperatura promedio observada en la salida del tercer sobrecalentador es $\sim 499,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a la salida del segundo atemperador es $\sim 487,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas promedio observadas son mayores a la referencia MHI, y mayores a las temperaturas obtenidas con el pulverizador B.

3 Condiciones de vapor a la entrada y salida del tercer atemperador

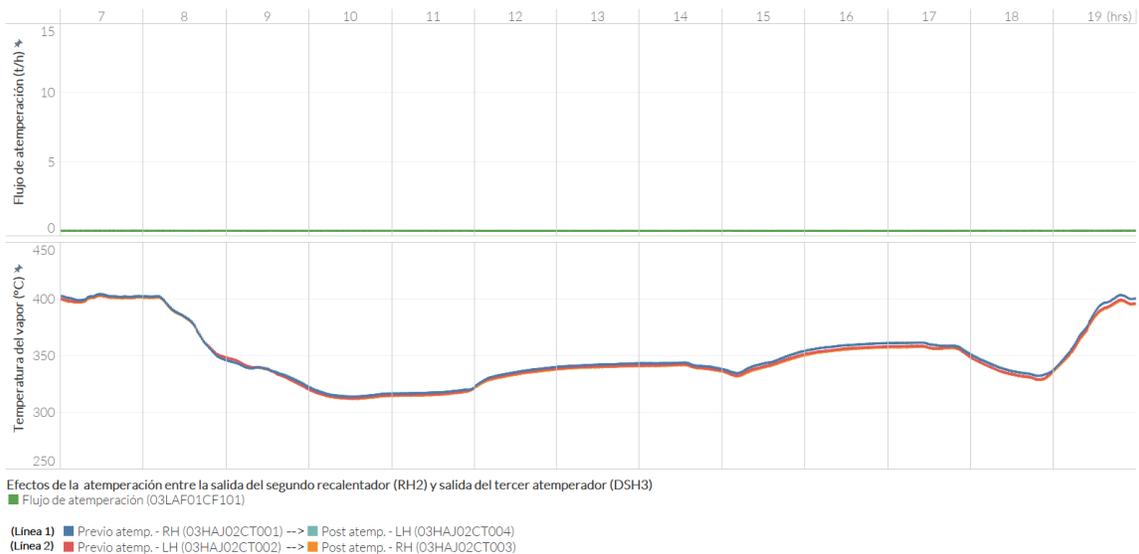
El tercer atemperador opera entre la salida de vapor del segundo recalentador y la entrada del tercer recalentador. El vapor sale del segundo recalentador por dos líneas donde se toman mediciones de temperatura, antes y después de atemperar.

La Figura 22 presenta los valores correspondientes al flujo de agua de atemperación; la temperatura del vapor antes de la atemperación; y la temperatura del vapor después de la atemperación.

Figura 22

Efectos de la atemperación entre la salida del segundo recalentador (RH2) y salida del tercer atemperador (DSH3) durante las pruebas del 05-03-2024.

Fuente: Elaboración propia.



El análisis del efecto de la atemperación ilustrado en la Figura 22, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

Operación con el molino B (12:20 a 14:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 22, para una medición puntual en operación con el molino B, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 13

Medición puntual de temperaturas del vapor posterior al segundo recalentador, y posterior al tercer atemperador en la operación del molino B.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de recalentador 2 (RH2) | T° posterior a atemperador 3 (DSH3) |
|-------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 14:20 | Medición en línea 1 de vapor | 343 °C (curva azul) | 343 °C (curva turquesa) |
| | Medición en línea 2 de vapor | 341 °C (curva roja) | 341 °C (curva naranja) |
| | Referencia MHI | 346 °C | 346 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante la operación del molino B entre las 12:20 y las 14:20 no se observa operación de la atemperación de vapor. Por ejemplo, al analizar la línea 1 de vapor y comparar la curva azul (anterior al atemperador) con la curva turquesa (posterior al atemperador), se observa que la temperatura del vapor se mantiene aproximadamente constante desde la salida del RH3 hasta la salida del DSH3.
- La temperatura promedio observada en la salida del tercer recalentador es ~342 °C y a la salida del tercer atemperador es ~342 °C. Las temperaturas promedio observadas son menores a la referencia MHI.

Operación con el molino C (15:20 a 17:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 22, para una medición puntual en operación con el molino C, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 14

Medición puntual de temperaturas del vapor posterior al segundo recalentador, y posterior al tercer atemperador en la operación del molino C.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de recalentador 2 | T° posterior a atemperador 3 |
|-------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 17:20 | Medición en línea 1 de vapor | 361 °C (curva azul) | 361 °C (curva turquesa) |
| | Medición en línea 2 de vapor | 357 °C (curva roja) | 357 °C (curva naranja) |
| | Referencia MHI | 346 °C | 346 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante la operación del molino C entre las 15:20 y las 17:20 no se observa operación de la atemperación de vapor. Por ejemplo, al analizar la línea izquierda de vapor y comparar la curva azul (anterior al atemperador) con la curva turquesa (posterior al atemperador), se observa que la temperatura del vapor se mantiene aproximadamente constante desde la salida del RH3 hasta la salida del DSH3.
- La temperatura promedio observada en la salida del tercer recalentador es ~359 °C y a la salida del tercer atemperador es ~359 °C. Las temperaturas promedio observadas son mayores a la referencia MHI, y mayores a las temperaturas obtenidas con el pulverizador B.

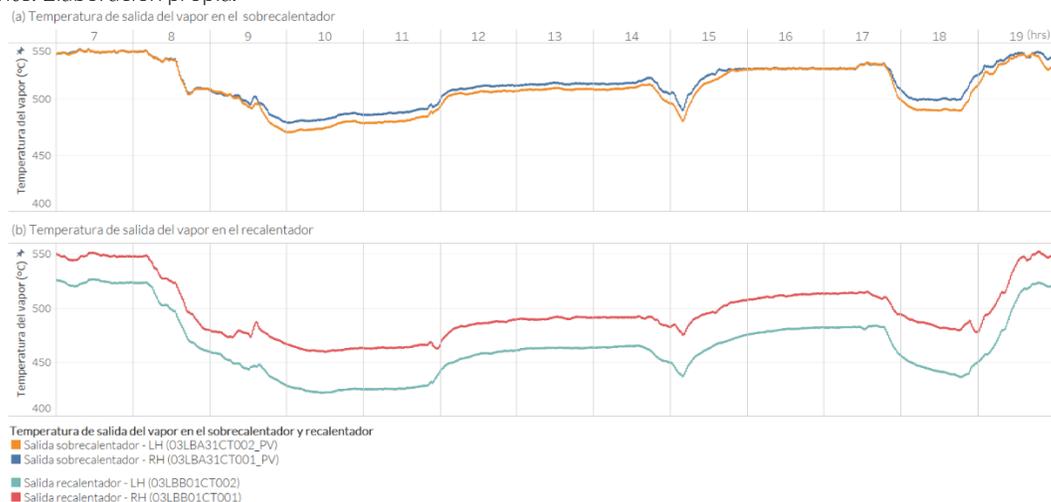
4 Condiciones de vapor a la salida de la caldera

A continuación, se analiza la temperatura final de salida del vapor en el cuarto sobrecalentador y tercer recalentador. La Figura 23 muestra el comportamiento de la temperatura del vapor en la salida del cuarto sobrecalentador y tercer recalentador como función del tiempo.

Figura 23

Temperatura de salida del vapor del sobrecalentador y recalentador en las pruebas del 05-03-2024.

Fuente: Elaboración propia.



El análisis de la temperatura del vapor ilustrada en la Figura 23, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

Operación con el molino B (12:20 a 14:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la Figura 23, para una medición puntual en operación con el molino B, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 15

Medición puntual de temperaturas del vapor en la salida del cuarto sobrecalentador y tercer recalentador durante la operación del molino B.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de sobrecalentador 4 (SH4) | T° en salida de recalentador 3 (RH3) |
|-------|---|---|--------------------------------------|
| 14:20 | - | 513 °C (curva azul) | 491 °C (curva roja) |
| | - | 509 °C (curva naranja) | 464 °C (curva turquesa) |
| | Predicted performance MHI ³⁴ | 514 °C | 493 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- A las 14:20 se observa que la temperatura promedio del vapor a la salida del sobrecalentador se encuentra 3 °C bajo el valor de referencia indicado por MHI.
- A las 14:20 se observa que la temperatura promedio del vapor a la salida del recalentador se encuentra 15,5 °C bajo el valor de referencia indicado por MHI.
- Se observa que la operación con un molino (Pulv. B) entre las 12:20-14:20, se genera temperaturas similares en las dos líneas de salida del sobrecalentador (curva azul/curva naranja). En el caso de las dos líneas de vapor que salen del recalentador (curva roja/curva turquesa), se observa una diferencia aproximada de 27 °C.

Operación con el molino C (15:20 a 17:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la Figura 23, para una medición puntual en operación con el molino C, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 16

Medición puntual de temperaturas del vapor en la salida del cuarto sobrecalentador y tercer recalentador durante la operación del molino C.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | T° en salida de sobrecalentador 4 | T° en salida de recalentador 3 |
|-------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 17:20 | - | 527 °C (curva azul) | 514 °C (curva roja) |
| | - | 527 °C (curva naranja) | 482 °C (curva turquesa) |
| | Predicted performance MHI | 514 °C | 493 °C |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

³⁴ No existe un balance de caldera para 25%, se trabaja con el valor más cercano disponible en documentación del fabricante. Para la salida de la caldera se utiliza el *Predicted boiler performance data* MHI (*Confirmation test procedure for reduction of minimum operating load, DWG. No. 92100-2082-3*)

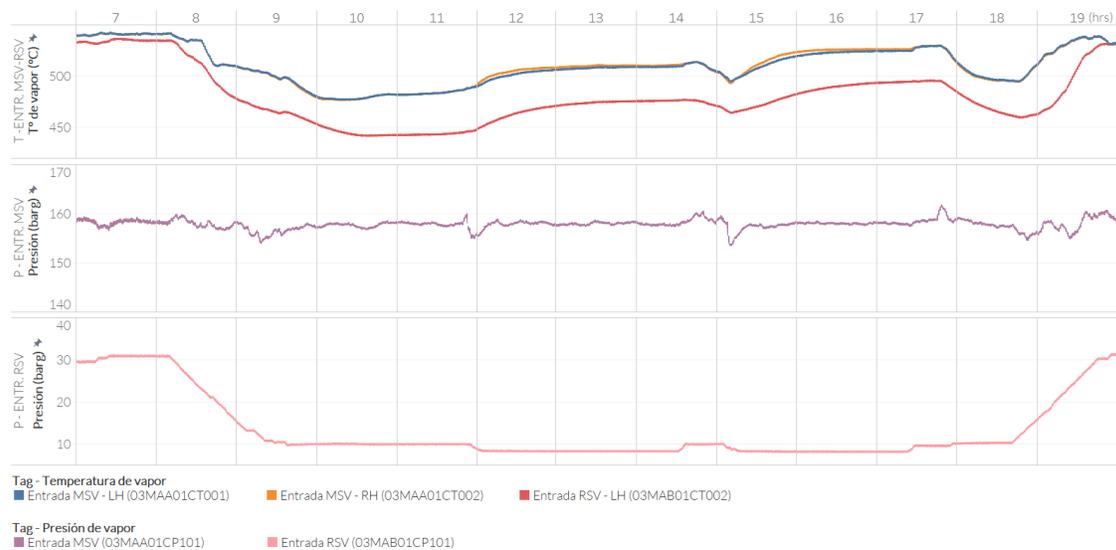
- A las 17:20 se observa que la temperatura promedio del vapor a la salida del sobrecalentador se encuentra 7 °C por sobre el valor de referencia establecido por el balance MHI.
- A las 17:20 se observa que la temperatura promedio del vapor a la salida del recalentador se encuentra 5 °C por sobre el valor de referencia establecido por el balance MHI.
- Se observa que la operación con un molino (C) entre las 15:20 y 17:20, se genera temperaturas similares en las dos líneas de salida del sobrecalentador (curva azul - curva naranja). En el caso de las dos líneas de vapor que salen del recalentador (curva roja - curva turquesa), se observa una diferencia aproximada de 30 °C.

5 Condiciones de vapor a la entrada de la turbina

Se monitoreó la temperatura y presión de entrada en la turbina de alta y mediana presión. En la turbina de alta presión se monitoreó la temperatura y presión a la entrada de la válvula de vapor principal (Main Stop Valve o MSV). En la turbina de mediana presión se monitoreó la temperatura y presión a la entrada de válvula de vapor recalentado (Reheat Stop Valve o RSV).

La Figura 24 presenta la evolución de la presión y temperatura de vapor en las válvulas MSV y RSV de la turbina.

Figura 24
Evolución de la temperatura del vapor en la turbina de la Unidad 3 para las pruebas del 05-03-2024.
Fuente: Elaboración propia.



El análisis de la evolución de la temperatura y presión del vapor en la turbina ilustrado en la Figura 24, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

Operación con el molino B (12:20 a 14:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la Figura 24, para una medición puntual en operación con el molino B, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 17

Medición puntual de temperaturas del vapor en la entrada de la MSV y entrada de la RSV durante la operación del molino B.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | Temperatura | | Presión | |
|-------|-------------------------------|-------------------|--------|------------|----------|
| 14:20 | Medición en la Entrada de MSV | 509 °C | - | 157,8 barg | - |
| | Medición en la entrada de RSV | - | 476 °C | - | 8,3 barg |
| | MHI | N/I ³⁵ | N/I | N/I | N/I |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Entre las 12:20 y las 17:20 la temperatura de vapor de entrada MSV es mayor que la temperatura de entrada RSV.

Operación con el molino C (15:20 a 17:20 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la Figura 24, para una medición puntual en operación con el molino C, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 18

Medición puntual de temperaturas del vapor en la entrada de la MSV y entrada de la RSV durante la operación del molino C.

Fuente: Elaboración propia.

| Hora | Fuente | Temperatura | | Presión | |
|-------|-------------------------------|-------------|--------|------------|----------|
| 17:20 | Medición en la Entrada de MSV | 526 °C | - | 157,9 barg | - |
| | Medición en la entrada de RSV | - | 494 °C | - | 8,2 barg |
| | MHI | N/I | N/I | N/I | N/I |

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Entre las 15:20 y las 17:20 la temperatura de vapor de entrada MSV es mayor que la temperatura de entrada RSV.

6 Condición del vapor de escape en la turbina de baja presión

El atemperador en el escape de la turbina opera según el valor de la temperatura del vapor de escape de la turbina. La operación del atemperador en el escape de la turbina es relevante a baja carga porque si el flujo de vapor es bajo y la atemperación está en funcionamiento, se pueden producir recirculación de gotas.

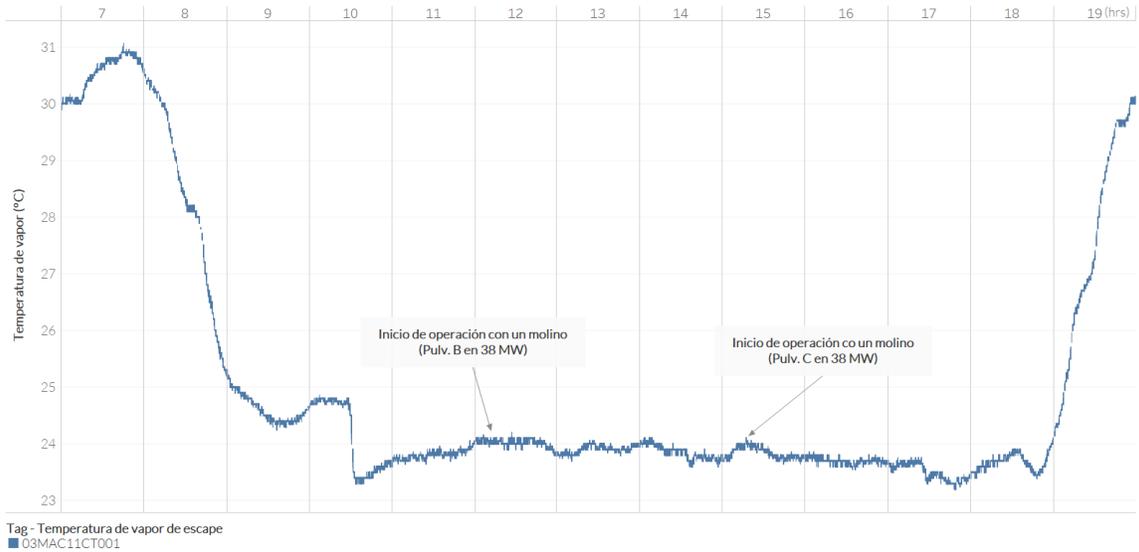
La siguiente figura presenta la evolución de la temperatura del vapor de escape de la turbina de baja presión.

³⁵ No se identifica información de referencia del fabricante (MHI) para la Unidad 3.

Figura 25

Temperatura del vapor de escape en turbina de baja presión durante las pruebas del 05-03-2024.

Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Según especificación MHI, el flujo de atemperación se activa con una temperatura de vapor de escape a 70°C³⁶.
- En el periodo de operación a plena carga (~ 07:30 am), la temperatura máxima observada fue 31°C. Durante las pruebas de mínimo técnico con un molino, no se observó operación del sistema de atemperación en escape de la turbina.
- En la operación con 1 molino, la temperatura de vapor de escape se mantiene constante, cercana 24 °C.

Es crítico notar que un aumento de la tasa de atemperación puede disminuir la pureza del vapor.

D Expansión de la turbina

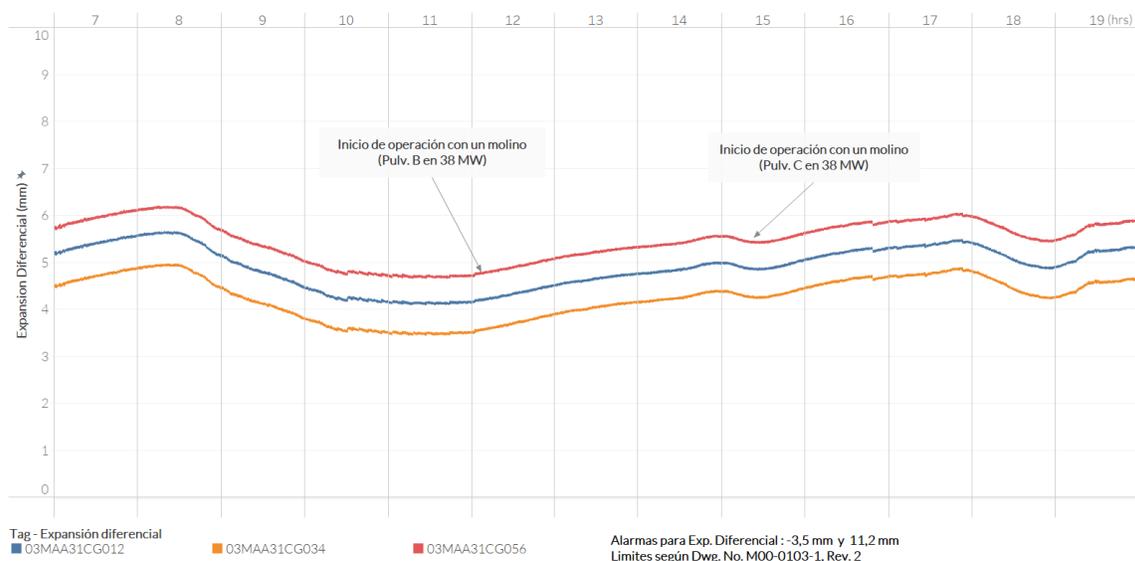
Para evaluar la dinámica de la geometría de la turbina se monitoreó la expansión diferencial de la turbina. Los resultados observados durante la prueba se resumen en la siguiente imagen:

³⁶ MHI especifica activación de la atemperación para vapor de escape a 70°C y alarma a 80°C. Operational & Maintenance Manual (Turbine and Auxiliary), M00-0103-1, Rev. 2

Figura 26

Expansión de carcasa y diferencial en la turbina durante las pruebas del 05-03-2024.

Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- MHI define alarma para una expansión diferencial de +11,2 mm (calentamiento) y -3,5 mm (enfriamiento)³⁷.
- El valor máximo medido de expansión diferencial es de +6,18 mm, por ejemplo, durante a la operación a las 08:27 am.
- El valor mínimo medido de expansión diferencial es de +3,47 mm, por ejemplo, durante a la operación a las 11:35 am.
- Durante la operación con un molino (B o C) la expansión diferencial se mantiene en valores entre 3,5-5,9 mm.

E Verificación del cumplimiento de límites de emisiones (DS 13)

Se han definido requerimientos asociados a los límites de emisiones de Central Guacolda (detalles en Anexo 2).

1 Temperatura de los gases en la salida de la caldera

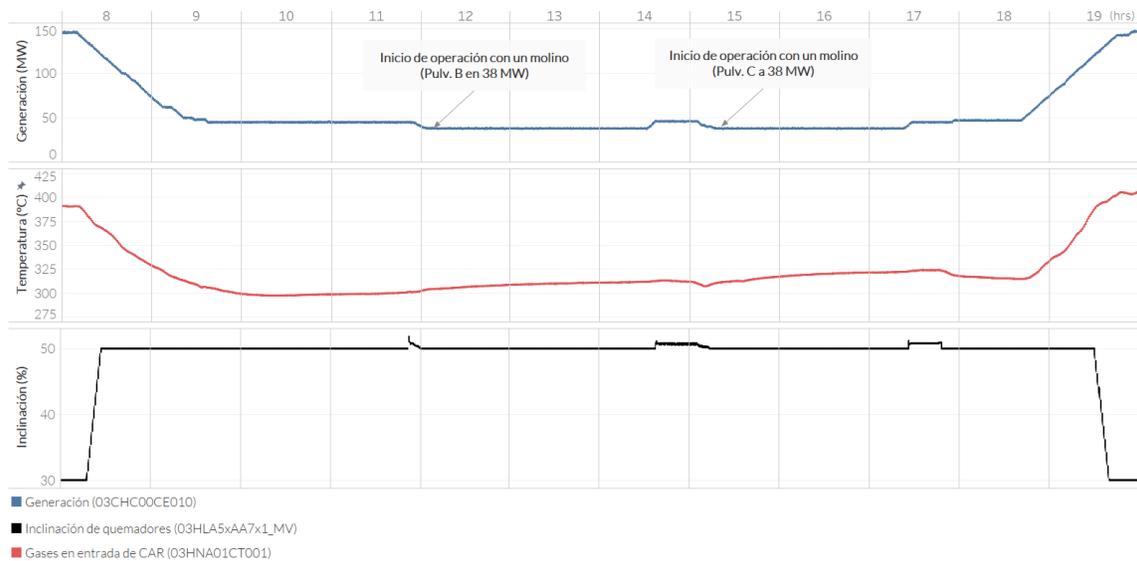
La Unidad 3 no cuenta con SCR y tiene *Over Fire Air* (OFA) como uno de los medios de control de NOx. La siguiente imagen resume el comportamiento de la temperatura de los gases previo a la entrada del calentador regenerativo, la inclinación de los quemadores y el nivel de generación en la Unidad 3.

³⁷ Operational & Maintenance Manual (Turbine and Auxiliary), M00-0103-1, Rev. 2

Figura 27

Evolución de la temperatura en la entrada del calentador regenerativo durante las pruebas de 05-03-2024.

Fuente: Elaboración propia.



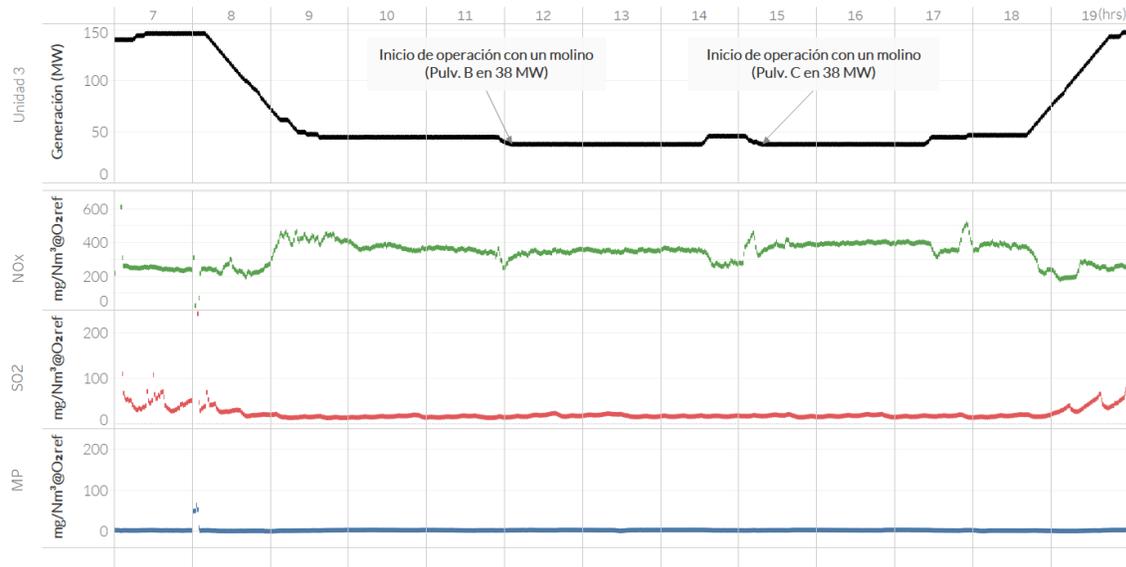
A partir de la figura, se identifica lo siguiente:

- Información técnica del fabricante (MHI) indica una temperatura de gases de salida del economizador de 308 °C.
- Durante el período de funcionamiento del molino B, entre las 12:20 y las 14:20, se observa una temperatura promedio de 308 °C.
- Durante el período de funcionamiento del molino C, entre las 15:20 y las 17:20, se observa una temperatura promedio de 316°C (valor mínimo de 311°C).
- Durante la operación del molino C y D la inclinación de los quemadores ajustada en el sistema DCS fue de 50% (horizontal) con el VRG fuera de servicio.

2 Emisión de MP, SO₂ y NO_x

En el Anexo 2 se indican los límites de emisiones para la Unidad 3. En la Figura 28 se presenta la generación de la Unidad 3 durante el desarrollo de la prueba. Además, se presenta la concentración instantánea de MP, SO₂, y NO_x.

Figura 28
 Concentración ($\text{mg}/\text{Nm}^3@O_2\text{ref}$) de contaminantes observada durante la prueba del 05-03-2024.
 Fuente: Elaboración propia.



1) Las condiciones normales (N) corresponden a 25°C y 1 atm (DS13, Artículo 14).
 2) La concentración es corregida por oxígeno en base seca (DS13, Artículo 14)

Se identifica lo siguiente:

- Durante la operación del molino B entre las 12:20 y las 14:20 la concentración promedio de NO_x es de 345 $\text{mg}/\text{Nm}^3@O_2\text{ref}$.
- Durante la operación del molino C entre las 15:20 y las 17:20 la concentración promedio de NO_x es de 395 $\text{mg}/\text{Nm}^3@O_2\text{ref}$.
- Se observó un *peak* de NO_x a las 15:11 con 456 $\text{mg}/\text{Nm}^3@O_2\text{ref}$ cuando se inicia la operación con el pulverizador B en 38 MW. Paralelamente, el pulverizador B sufre un aumento en el flujo de alimentación de carbón debido a la salida de operación del pulverizador C (ver Figura 18).
- Se observó un segundo *peak* de NO_x a las 17:55 con 513 $\text{mg}/\text{Nm}^3@O_2\text{ref}$ cuando se inicia la operación con el pulverizador B en 38 MW³⁸. Paralelamente, el pulverizador C sufre una disminución en el flujo de alimentación para igualar el flujo de carbón del pulverizador B que entra en operación (ver Figura 18).
- Si bien se alcanzó un *peak* de 513 mg/Nm^3 , el cumplimiento del DS13 se mide de manera horaria. En consideración a lo anterior, las emisiones de NO_x se mantuvieron por debajo de los 500 mg/Nm^3 exigidos en DS13. Este parámetro debe ser monitoreado en la puesta en servicio de 2° pulverizador

³⁸ El valor de emisiones de la U3 a las 17:55 del 05-03-2024 superó el límite de 500 $\text{mg}/\text{Nm}^3@O_2\text{ref}$ definido por DS13 (ver Anexo 2), durante la rotación de molinos. No obstante, de acuerdo con el Artículo 4 del DS13, los valores límites se miden sobre la base de promedios horarios. Luego, los valores en operación con 1 molino se mantuvieron por debajo de los límites establecidos por normativa.

F Operación del sistema de agua de alimentación

Se analizó el comportamiento de variables del sistema de agua de alimentación, particularmente en las bombas de agua de alimentación, válvulas de control de agua de alimentación, y calentadores de alta presión.

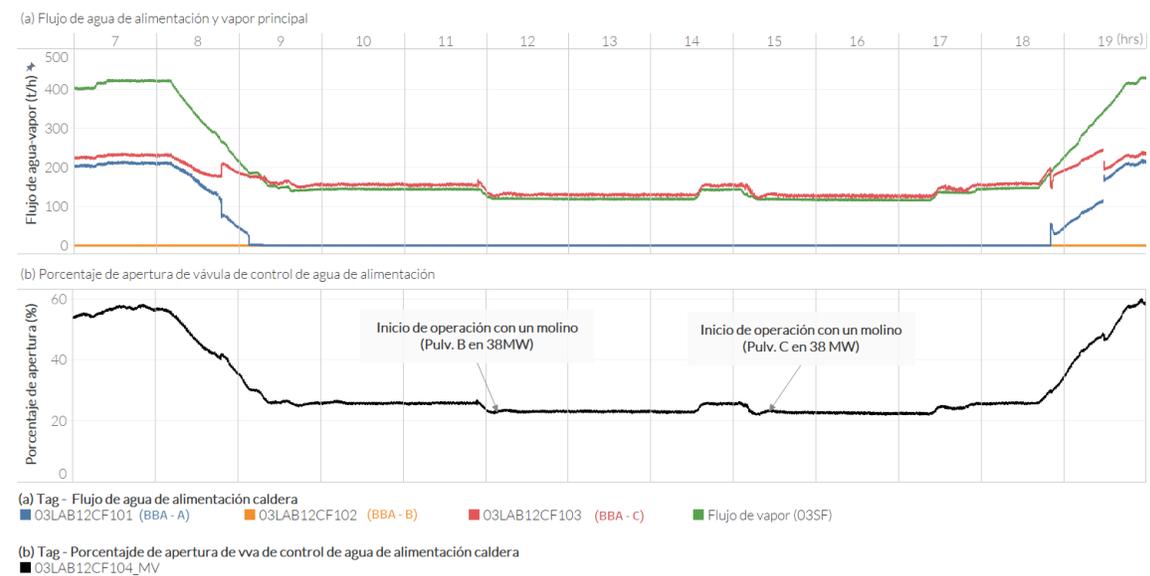
1 Operación de la bomba de agua de alimentación

La operación del sistema de agua de alimentación se representa en la Figura 29, donde se grafica el flujo (ton/hora) en la salida de la bomba de agua de alimentación y el porcentaje de apertura de la válvula de control de agua de alimentación. Estos sistemas cuentan con puntos mínimos de operación que fueron contrastados con los datos observados.

Figura 29

Flujo de agua por bomba de agua de alimentación (t/h) y porcentaje de apertura de válvula de control.

Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Para la operación con el molino B y C se observa que la apertura de la válvula de control de agua de alimentación está sobre 22% para lecturas por sistema de control. En estudios previos de reducción de mínimo técnico, se ha recomendado no operar con la válvula de agua de alimentación bajo 5% de apertura³⁹.
- Se observa que durante la operación con un molino (Pulv. B o C), el flujo de agua total generado por la bomba C es 132 ton/hora en promedio (se considera medición 03LAB12CF103).

³⁹ Informe Mínimo Técnico, Sargent & Lundy, 2017.

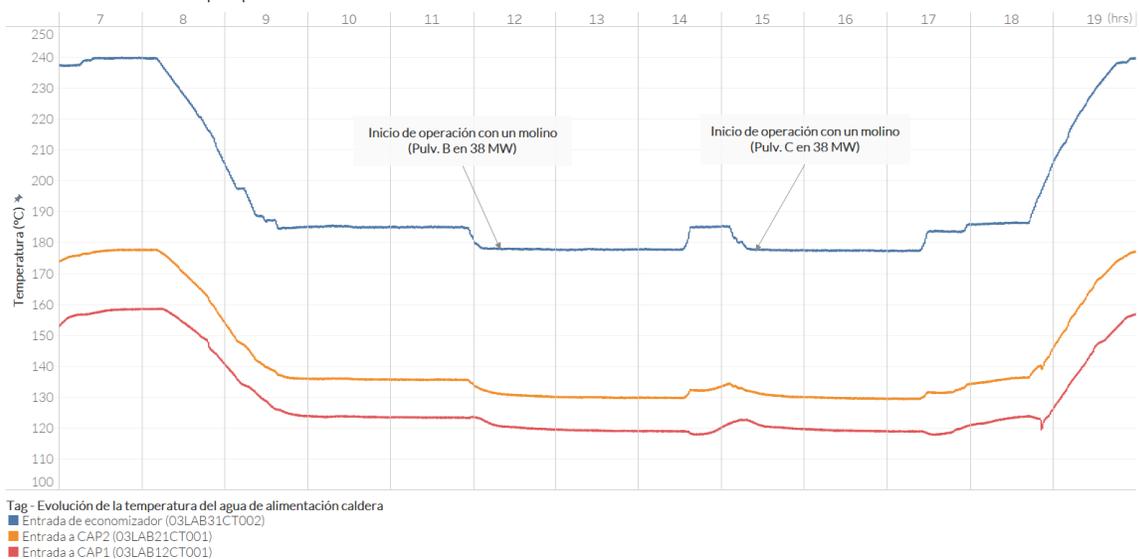
- Se observa que durante la operación con un molino (Pulv. B o C), el flujo de vapor es 119 ton/hora en promedio (se considera medición O3SF). En el desempeño esperado de caldera desarrollado por MHI se especifica un flujo de vapor de 116,83 ton/h.

2 Operación de los calentadores de alta presión

Se analizó la operación de los calentadores de alta presión, particularmente la temperatura de agua y la presión de vapor de las extracciones de vapor provenientes de la turbina de alta presión que alimentan a los calentadores. La siguiente figura resume el comportamiento de las variables de interés:

Figura 30

Temperatura de agua en la entrada y salida a los calentadores de alta presión durante las pruebas de 05-03-2024.
Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés:

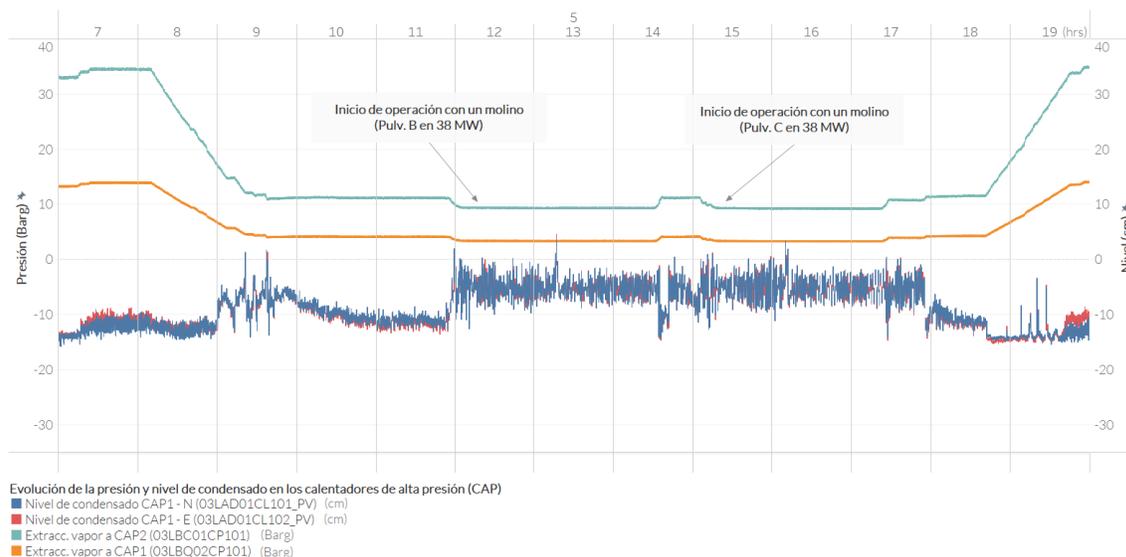
- En la operación con 1 molino en 38MW (pulv. B y C) se observa que la temperatura de entrada del calentador primario de alta presión (CAP1) posee un valor promedio de 119 °C.
- En la operación con 1 molino, se observa que la temperatura de entrada del calentador secundario de alta presión (CAP 2) posee un valor promedio de 129 °C.
- En la operación con un molino, se observa que la temperatura de entrada del economizador posee un valor promedio de 177 °C.
- El fenómeno de FAC (corrosión acelerada por flujo) puede verse amplificado cerca de los 150 °C, al combinarse con otros factores⁴⁰.

Un aspecto relevante en los calentadores de alta presión es la presión del vapor que llega desde las extracciones de la turbina de alta presión. Si la presión de vapor en el calentador es baja, existe la posibilidad de acumulación de condensado dado que no existe presión suficiente para

⁴⁰ Guidelines for Control of Flow Accelerated Corrosion in Fossil and Combined Cycle Plants, EPRI, pág. 2-1, 2-11.

mover el líquido al desaireador, que está a mayor altura. La siguiente imagen muestra el comportamiento del nivel de condensado y presión en los calentadores de alta presión.

Figura 31
Evolución de la presión en extracción de vapor hacia el calentador de alta presión 1 y 2 durante las pruebas de 05-03-2024.
Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés en la operación con 1 molino (Pulv. B, C):

- La presión de vapor hacia el primer calentador de alta presión es en promedio 3,3 barg.
- La presión de vapor hacia el segundo calentador de alta presión es de en promedio 9,3 barg.
- El primer calentador de agua de alta presión (CAP1) estuvo operativo durante las pruebas de 05-03-2024. No obstante, debido a la disminución en la presión de la extracción de vapor el condensado podría tener presión insuficiente para su descarga en el desaireador. El condensado de CAP1 tiene puntos de descarga extra al desaireador, y se sugiere atención a la condición mecánica y ajustes de las válvulas de descarga de condensado adicionales⁴¹.

G Control químico

Se monitorearon los parámetros químicos en 45 MW operando con molinos B y C; en 38 MW operando con el molino B; y en 38 MW con el molino C. Las muestras fueron tomadas una vez que se confirmó operación estable de la unidad.

Los detalles de los parámetros registrados por Guacolda son los siguientes:

- a) Control químico medido a 45 MW operando con los molinos B y C.

⁴¹ Por ejemplo, válvula 03LCH01AA702 de descarga al condensador. Información según documento *Main Flow Diagram (3/3) P6-011-223 Rev 7*.

Tabla 19

Control químico para un nivel de carga de 45 MW operando con el molino B y C.

Fuente: Elaboración propia.

| Fecha: 05-03-2023 | | Hora: 11:32 | | MW: 45 | | Presión domo: 159 | |
|---|-------|-------------|------------|---------------------------|-----------|-------------------|----------------------|
| Variable de control | Norma | Unidad | Condensado | Agua Alimentación caldera | Agua Domo | Vapor Saturado | Vapor sobrecalentado |
| pH (at 25°C) (de lab.) | | 3 | 9,1 | 9,3 | 9,1 | 9,3 | 9,4 |
| TDS (sólidos suspendidos totales) | | ppm | | 1 | | | |
| Conductividad específica | | µS/cm | 5,7 | 5,8 | 3,9 | 5,7 | 5,8 |
| Dureza (como CaCO ₃) | | ppm | | 0,022 | | | |
| Oxígeno disuelto (como O ₂) (línea) | | ppb | | 0 | | | |
| Fosfato (como PO ₄ ³⁻) | | ppm | - | - | - | - | - |
| Sílice (como SiO ₂) | | ppb | 10 | | 34 | | 9 |
| Hierro (como Fe) | | ppm | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Cobre (como Cu) | | ppb | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hidracina (como N ₂ H ₄) | | ppb | | 12 | | | |
| Conductividad catiónica (línea) | | µS/cm | 0,14 | | 3,6 | 0,14 | 0,17 |
| Sodio (línea) | | ppb | 0,0 | | | | 0,0 |
| Cloruro | | ppm | 0,0 | | | | |

b) Control químico medido a 38 MW operando con el molino B.

Tabla 20

Control químico para un nivel de carga de 38 MW operando con el molino B.

Fuente: Elaboración propia.

| Fecha: 05-03-2024 | | Hora: 14:00 | | MW: 38 | | Presión domo: 159 | |
|---|-------|-------------|------------|---------------------------|-----------|-------------------|----------------------|
| Variable de control | Norma | Unidad | Condensado | Agua Alimentación caldera | Agua Domo | Vapor Saturado | Vapor sobrecalentado |
| pH (at 25°C) (de lab.) | | 3 | 9,1 | 9,3 | 9,1 | 9,3 | 9,4 |
| TDS (sólidos suspendidos totales) | | ppm | | 1 | | | |
| Conductividad específica | | µS/cm | 5,7 | 5,8 | 4,1 | 5,7 | 5,7 |
| Dureza (como CaCO ₃) | | ppm | | 0,036 | | | |
| Oxígeno disuelto (como O ₂) (línea) | | ppb | | 0 | | | |
| Fosfato (como PO ₄ ³⁻) | | ppm | - | - | - | - | - |
| Sílice (como SiO ₂) | | ppb | 15 | | 75 | | 15 |
| Hierro (como Fe) | | ppm | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Cobre (como Cu) | | ppb | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hidracina (como N ₂ H ₄) | | ppb | | 13 | | | |
| Conductividad catiónica (línea) | | µS/cm | 0,22 | | 3,9 | 0,24 | 0,27 |
| Sodio (línea) | | ppb | 0,0 | | | | 0,0 |
| Cloruro | | ppm | 0,0 | | | | |

c) Control químico medido a 38 MW operando con el molino C.

Tabla 21

Control químico para un nivel de carga de 38 MW operando con el molino C.

Fuente: Elaboración propia.

| Fecha: 05-03-2024 | | Hora: 16:30 | | MW: 38 | | Presión domo: 156 | |
|---|-------|-------------|------------|---------------------------|-----------|-------------------|----------------------|
| Variable de control | Norma | Unidad | Condensado | Agua Alimentación caldera | Agua Domo | Vapor Saturado | Vapor sobrecalentado |
| pH (at 25°C) (de lab.) | | 3 | 9,1 | 9,2 | 9,1 | 9,3 | 9,4 |
| TDS (sólidos suspendidos totales) | | ppm | | 1 | | | |
| Conductividad específica | | μS/cm | 5,5 | 5,8 | 4,2 | 5,6 | 5,9 |
| Dureza (como CaCO ₃) | | ppm | | 0,036 | | | |
| Oxígeno disuelto (como O ₂) (línea) | | ppb | | 0 | | | |
| Fosfato (como PO ₄ ³⁻) | | ppm | - | - | - | - | - |
| Sílice (como SiO ₂) | | ppb | 16 | | 123 | | 18 |
| Hierro (como Fe) | | ppm | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| Cobre (como Cu) | | ppb | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hidracina (como N ₂ H ₄) | | ppb | | 18 | | | |
| Conductividad catiónica (línea) | | μS/cm | 0,22 | | 3,9 | 0,25 | 0,29 |
| Sodio (línea) | | ppb | 0,0 | | | | 0,0 |
| Cloruro | | ppm | 0,0 | | | | |

Se identifica que el condensado en la entrada del desaireador es controlado correctamente en la actualidad, pero podría requerir mejoras dado que no se tiene instalado pulidores de condensado o filtros para la limpieza en la partida.

La operación de las unidades a carga reducida puede alterar los parámetros operación creando condiciones que pueden conducir al desarrollo de corrosión acelerada por flujo (FAC o *Flow Accelerated Corrosion*) donde anteriormente no existía. Dado que, en condiciones de operación histórica, con mayor mínimo técnico, no se corría riesgo de corrosión acelerada por flujo, la implementación de un programa de control de FAC no había sido una materia relevante. En la medida que se reduce el mínimo técnico el riesgo de FAC aumenta, por lo que Guacolda se encuentra gestionando un programa de control de FAC.

Guacolda cuenta con un estándar de base EPRI/ASME para el control de límites de contaminantes en agua/vapor para tratamiento AVT:

- En las mediciones de conductividad catiónica del vapor saturado y sobrecalentado realizadas a las 11:30 se observa un valor de 0,14 y 0,17 μS/cm respectivamente.
- En las mediciones de conductividad catiónica del vapor saturado y sobrecalentado realizadas a las 14:00 se observa un valor de 0,24 y 0,27 μS/cm respectivamente.
- En las mediciones de conductividad catiónica del vapor saturado y sobrecalentado realizadas a las 16:30 se observa un valor de 0,25 y 0,29 μS/cm respectivamente.
- La conductividad catiónica en el vapor sobrecalentado aumentó desde 0,17 μS/cm en la operación en 45 MW con dos pulverizadores (B y C), hasta 0,29 μS/cm en la operación a

38 MW en la operación con el molino C. No se observó desvíos fuera del rango de control operacional, el estándar utilizado por Guacolda para tratamiento AVT define conductividad catiónica $<0,3 \mu\text{S}/\text{cm}$ para vapor sobrecalentado.

Es importante tener en consideración que el control químico fue identificado como uno de los puntos de interés durante la asesoría de flexibilidad de la Unidad 3 de Guacolda.

Luego, es recomendable realizar una revisión periódica de estándares y límites de parámetros químicos. A modo de ejemplo, documentación SIEMENS⁴² y EPRI⁴³ especifica valores de conductividad catiónica considerados como normales para valores bajo $0,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ en valor sobrecalentado/recalentado, y el estándar Guacolda especifica $< 0,3 \mu\text{S}/\text{cm}$.

⁴² Referencia ST10700-01E, *Water and steam chemistry specification for steam turbine operation in drum boiler units* $0,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ para vapor sobrecalentado y recalentado.

⁴³ Referencia EPRI 1004187, *Cycle Chemistry Diagram for a Drum Unit on All-Volatile Treatment, AVT(R). All-ferrous and mixed-metallurgy feedwater systems. Operating with a reducing environment (reducing agent added)* indica conductividad catiónica normal hasta $0,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ para vapor recalentado.

5 Conclusión

A continuación, se sintetizan los factores limitantes identificados y algunas recomendaciones.

5.1 Factores limitantes identificados⁴⁴

Los resultados permiten validar una operación de la Unidad 3 con un molino a 38 MW en forma permanente, segura y estable, inyectando energía al sistema interconectado en forma continua. La operación recomendada es con los molinos que alimentan los quemadores de niveles intermedios, debido a que son aquellos que obtuvieron menores valores de emisiones de NOx.

No obstante, se identificaron algunos factores limitantes y otros aspectos que requieren ser analizados y abordados para minimizar el riesgo operacional de la unidad.

Para este nuevo modo de operación (38 MW con un molino), es necesario considerar los siguientes desafíos adicionales en vista de las nuevas exigencias que este impone:

- a.) Necesidad de mantenimiento y reparación de equipos debido a prácticas históricas de operación y desgaste de sistemas producto de su antigüedad.
- b.) Necesidad de mejora de sistemas de instrumentación y control.
- c.) Necesidad de mejorar capacidades de monitoreo y diagnóstico.

La reparación de equipos puede ser abordada mediante inversiones en futuros periodos de mantenimiento. Las brechas de instrumentación y control también requieren del desarrollo de ciertas inversiones. Las brechas de monitoreo y diagnóstico deben ser abordadas mediante ajuste de procesos. Los factores limitantes principales se indican a continuación:

- A. Monitoreo y diagnóstico sistémico oportuno en nueva condición de operación.
- B. Control de combustión y heat rate.
 - 1. Daños estructurales en el cuerpo, cabezal y sistema de inclinación de los quemadores de carbón, registros de aire auxiliares y quemadores de petróleo.
 - 2. Problemas de posicionamiento de los registros de aire secundario.
 - 3. Balance de flujo de aire/combustible desde los pulverizadores.
 - 4. Estado pulverizadores - Granulometría de carbón.
 - 5. Condición mecánica de los registros de aire del Over Fire Air (OFA).
 - 6. Disponibilidad de equipos críticos.
- C. Condición de operación de los calentadores de agua de alta presión.

⁴⁴ Un factor limitante es aquel que impide una mayor flexibilización (reducción de mínimo técnico) u operar en la condición de operación con un molino.

A Monitoreo y diagnóstico sistémico oportuno en nueva condición de operación.

Durante las pruebas realizadas se observaron distintas dinámicas y singularidades en la operación de la unidad. En un contexto de operación flexible más exigente se requiere fortalecer el monitoreo y diagnóstico sistémico de la operación⁴⁵. Distintos sistemas cambian su condición de operación y desempeño en el tiempo, por lo que pueden inducir un mayor riesgo operacional y atentar contra objetivos de operar en forma permanente, segura y estable inyectando energía al sistema en forma continua en horizontes mayores de tiempo⁴⁶.

Luego, es deseable evaluar no sólo si hay variables que deban ser monitoreadas de manera más cercana, sino también si la detección temprana de ciertas condiciones que pueden producir nuevos modos de falla justifica un nivel adicional de monitoreo de la operación.

Los nuevos modos de operación flexible también representan una nueva condición operacional que requiere estandarizar prácticas en los operadores. Una eventual diversidad de criterios operacionales puede producir una condición de riesgo para la operación de la unidad. Es importante tener en consideración que en la condición de mínimo técnico reducido con 1 molino se trabaja con menor tolerancia y maniobrabilidad ante de condiciones anormales del proceso y eventos de contingencia en distintos componentes del sistema. Por lo tanto, los operadores deben comprender las configuraciones óptimas de los molinos y los parámetros de control.

Es necesario fortalecer la estrategia de control de procesos en torno a la puesta en servicio o fuera de servicio de los molinos a través de la gestión del operador o la automatización.

Es deseable proporcionar capacitación adicional en procedimientos que se utilizan con poca frecuencia y revisar algunos procedimientos.

Las alarmas deben ser apropiadas y completas para operaciones a carga reducida con 1 molino. Las prioridades de alarma deben reflejar adecuadamente el riesgo de la planta o proceso para la respuesta del operador. Las frecuencias de alarma existentes deben ser adecuadas para el funcionamiento con 1 molino.

Finalmente, modos de operación más exigentes requieren un mayor esfuerzo de coordinación. Es deseable fortalecer prácticas de mantenimiento predictivo y de normalización del estado de equipamiento con síntomas incipientes de desgaste o mal funcionamiento.

B Control de combustión y *heat rate*

Al desarrollar las pruebas de operación con 1 molino y estudiar los antecedentes técnicos de la Unidad 3, se identificaron una serie de desafíos relacionados al control de la combustión y *heat rate* en operación a mínimo técnico que han tenido consecuencias para Guacolda y deben ser debidamente atendidos y monitoreados para mantener la confiabilidad de la Unidad 3.

⁴⁵ Condiciones de temperatura, flujo, presión, vibración, voltaje, y/o corriente en los sistemas que corresponda.

⁴⁶ Por ejemplo, oscilaciones singulares, eventos con peaks breves, diferencias respecto de condiciones nominales.

1 Daños estructurales en el cuerpo, cabezal y sistema de inclinación de los quemadores de carbón, registros de aire auxiliares y quemadores de petróleo

Se han evidenciado una serie de daños estructurales reiterativos en el sistema de quemadores de carbón, quemadores de petróleo y registros de aire auxiliares de la Unidad 3 de Guacolda durante la operación a mínimo técnico reducido con 2 molinos (45 MW). El detalle del estado del sistema de quemadores de la Unidad 3 de Guacolda, a partir de informes de mantenimiento realizados entre noviembre - diciembre 2022 y febrero 2024, se presenta en la siguiente figura:

Figura 32

Estado de los quemadores en intervenciones 2022 – 2024. Nomenclatura a partir de informes de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes facilitados por Guacolda.

| | 12/22 | 12/23 | 02/24 | | 12/22 | 12/23 | 02/24 | | 12/22 | 12/23 | 02/24 | | 12/22 | 12/23 | 02/24 |
|----------------------|-------|-------------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|--|-------|-------------|-------|--|-------|------------|-------|
| AUX. AIRE SUPERIOR | ME | QD | B | | ME | QT | B | | ME | QD | B | | ME | QD | B |
| CARBÓN NIVEL D | D | cQRD bDQ | B | | D | cQRD | B | | DO | cQRD | B | | D | cQRD | B |
| PETRÓLEO NIVEL F | - | - | B | | - | - | B | | - | - | B | | - | - | B |
| CARBÓN NIVEL C | DO | cQRD | B | | DO | cQRD | B | | QDO | cQRD | B | | DO | cQRD QD | B |
| AUX. AIRE INTERMEDIO | - | cQRD | B | | - | cQRD | E | | - | cQRD | B | | - | cQRD | B |
| CARBÓN NIVEL B | DO | cQRD bDQ | QE bDC | | QDO | QD bDQ | QE bDC | | Q | cQRD bDQ | B | | QO | cQRD | E |
| PETRÓLEO NIVEL E | - | QT | B | | - | - | B | | - | - | B | | - | - | B |
| CARBÓN NIVEL A | D | cQRD bDQ | B | | QDO tQ | QD bDQ | B | | QDO | cQRD | B | | D | QD | B |
| AUX. AIRE INFERIOR | ME | QD | B | | ME | - | B | | ME | - | B | | ME | - | B |

ESQUINA 1 ESQUINA 2 ESQUINA 3 ESQUINA 4

* Quemador con deformaciones y roturas. Casing deformado y quemado, con rotura al exterior.

| | | |
|---|--|--|
| ME: mal estado B: bueno bDQ: barra inclinación quemada y deformada bDC: barra inclinación dañada y cortada | cQ: casing quemado cQRD: casing quemado, roto o deformado D: deformado DQ: deformado, obstruido | E: escoria en salida de aire QD: quemado y deformado QT: quemado total tQ: tapa quemada |
|---|--|--|

A partir de la figura, se identifican los siguientes aspectos a tener en consideración:

- La totalidad de los quemadores de carbón presentaron daños estructurales en el mantenimiento de 2022. Luego de invertir en su reemplazo o reparación durante el mantenimiento, el sistema completo evidenció daños nuevamente en la intervención de 2023.
- Dos meses después del reemplazo o reparación del sistema de quemadores completo en la intervención de 2023, se evidencian daños en los quemadores de carbón del nivel B y rotura de la barra de inclinación de dicho nivel en el mantenimiento de febrero 2024.
- La totalidad de los registros de aire auxiliares presentaron daños estructurales en el mantenimiento de 2022. Luego de invertir en su reemplazo o reparación durante el mantenimiento, el sistema completo evidenció daños nuevamente en la intervención de 2023.
- El sistema de quemadores de petróleo presentó algunos daños en la intervención de 2023.

El reiterado deterioro del sistema de quemadores de la Unidad 3 tiene consecuencias producto de la necesidad de realizar inversiones para reemplazar los equipos dañados, además de reducir la flexibilidad operacional de la unidad (en términos de opciones de grupos de quemadores a utilizar). También tiene un impacto en el *heat rate*.

De esta forma, la operación a mínimo técnico con un molino en operación se identifica como una oportunidad para operar el molino en servicio en un nivel de carga superior y, de esta forma, mejorar la calidad de la combustión en el nivel de quemadores correspondiente. No obstante, el impacto de este nuevo modo de operación en la condición mecánica de todo el sistema de quemadores debe ser debidamente evaluado y monitoreado por Guacolda, para evitar incurrir nuevamente en los daños evidenciados en periodos breves de tiempo.

2 Desafíos de posicionamiento de los registros de aire secundario

Dentro de los resultados de los procesos de mejoras en la combustión desarrollados en Guacolda 3 se encuentra la definición de nuevas posiciones de los registros de aire secundario en función de parámetros como flujo de carbón y nivel de carga. Para un correcto control y ejecución de la lógica configurada, debe existir una sincronización entre la posición o porcentaje de apertura indicada por el sistema, y lo que realmente se ejecuta en terreno por el equipo.

Durante las pruebas se informó que los registros de aire secundario de los quemadores de Guacolda 3 poseen problemas de posicionamiento mecánico, ya que operan más cerrados respecto a lo que indica la lógica de control configurada. Si bien el mantenimiento de los registros de aire puede volver a poner al equipo en un estado de operación nominal que permite ejecutar la lógica de control configurada de una manera normal, los procedimientos de mantenimiento y posterior inspección deberán asegurar que los quemadores se mantienen en buenas condiciones durante toda la ventana operativa hasta el próximo periodo de mantención.

Los quemadores de carbón pueden sufrir sobrecalentamientos por problemas de refrigeración y manifestar daños en el corto o mediano plazo; no obstante, determinar una causa y diagnóstico requiere del desarrollo de un estudio específico y entender la causa raíz de los problemas de quemadores dañados en Guacolda 3. En la información técnica disponible del fabricante, se especifican requerimientos de posición de los registros de aire que se sugiere revisar y evaluar dado las modificaciones realizadas en la caldera para la optimización de la combustión⁴⁷.

En la operación en baja carga los problemas se agudizan y es necesario fortalecer la estrategia de control de procesos para la operación en baja carga a través de la gestión del operador, la revisión de nuevos puntos de inspección y el desarrollo de planes de trabajo para resolución de nuevos problemas producto de nuevos puntos de operación.

3 Balance de flujo de aire/combustible desde los pulverizadores

Una de las mayores preocupaciones en la operación a baja carga es la inestabilidad de llama. Dentro de las acciones que pueden ser consideradas para asegurar la estabilidad de llama es la

⁴⁷ Operation and Maintenance Manual (Boiler), DWG P6-011-452-M02, Rev 1, Section 4.9.4

verificación de que los flujos a través de los ductos que salen del pulverizador a los quemadores están balanceados.

Guacolda no ha realizado ensayos específicos que permitan la verificación del balance de flujos para operación en baja carga. Una prueba estándar tiene como objetivo verificar que los flujos a través de los ductos de un pulverizador tengan desvíos acotados y permitan un correcto desarrollo de la combustión en la caldera⁴⁸.

Es necesario fortalecer la estrategia de control de los parámetros de operación en los molinos por su influencia sobre la combustión. Es relevante la verificación por medio de procedimientos, el balance de flujos de aire - combustible de los pulverizadores a la caldera con el objetivo de contribuir a la estabilidad de llama.

4 Estado de los pulverizadores – granulometría de carbón

Dada las condiciones observadas, se debe fortalecer el mantenimiento a los pulverizadores. También se debe verificar que las condiciones de granulometría de carbón se mantengan dentro de las especificaciones recomendadas; las pruebas realizadas durante la semana de pruebas dieron cuenta de una calidad de molienda deficiente en el molino D.

5 Condición mecánica de los registros de aire del *Over Fire Air* (OFA)

Los registros de aire del *Over Fire Air* (OFA) son utilizados para controlar las emisiones de NOx dentro de los límites por la normativa ambiental. No obstante, durante el desarrollo de las pruebas se identificó un comportamiento anormal de los registros de aire del nivel 1 del OFA, cuya ocurrencia no limitó el correcto desarrollo de la prueba. No obstante, se sugiere normalizar y monitorear el correcto funcionamiento de los registros del OFA, dada su utilización como maniobra operacional para mitigar las emisiones de NOx⁴⁹.

6 Disponibilidad de equipos críticos que afectan las emisiones de NOx

Dado que no se cuenta con un sistema SCR para mitigar las emisiones de NOx, se sugiere tratar de maximizar la disponibilidad de equipos críticos que afectan las emisiones de NOx:

- Los resultados de la prueba dan cuenta de un menor nivel de emisiones al operar con el molino B, respecto del molino C. Adicionalmente, las muestras de granulometría de carbón tomadas en días adyacentes a la prueba dan cuenta de desafíos en la molienda del molino D. Por lo tanto, se sugiere monitorear y mantener cuidadosamente el estado del molino B.

⁴⁸ Measuring Coal Pipe Flow, Richard f. Storm, 2009.

⁴⁹ Históricamente Guacolda se ha realizado maniobras operacionales para la mitigación de las emisiones de NOx en operación con 2 molinos en 45 MW, cuya aplicabilidad debiese ser revisada en la nueva lógica de operación con 1 molino en 38 MW. Además, se debe tener en consideración que las pruebas de operación con 1 molino fueron realizadas directamente posterior a un mantenimiento, por lo que se debe monitorear el cumplimiento de la normativa de emisiones a lo largo de todo el horizonte de operación previo al siguiente mantenimiento de la unidad.

- El VRG se encontraba fuera de servicio en la Unidad 3 durante el desarrollo de la prueba. Se recomienda regularizar su disponibilidad, ante el potencial beneficio que tiene su correcto funcionamiento en las emisiones de NOx de la unidad.

C Temperatura de agua en calentadores de alta presión y riesgo de FAC.

En la operación con un molino, se observa que la temperatura de salida del calentador primario de alta presión, que corresponde a la temperatura de entrada al calentador secundario de alta presión, está bajo los 150 °C. El fenómeno de FAC (corrosión acelerada por flujo) puede verse amplificado cerca de los 150 °C, al combinarse con otros factores⁴⁰.

El área de gestión química está trabajando en el desarrollo un programa formal para inspección/mitigación de la corrosión acelerada por flujo.

Adicionalmente, se identifica como relevante monitorear la presión del vapor que llega desde las extracciones de la turbina de alta presión en los calentadores de alta presión. Si la presión de vapor en el calentador es baja, existe la posibilidad de acumulación de condensado dado que no existe presión suficiente para mover el líquido al desaireador que está a mayor altura. Se recomienda monitorear esta condición.

5.2 Mínimo técnico revisado en condición de operación con un molino

El Anexo Técnico de Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras⁵⁰ define el mínimo técnico como la potencia activa bruta mínima con la cual una unidad puede operar en forma permanente, segura y estable inyectando energía al sistema interconectado en forma continua. También se indica que el valor de mínimo técnico debe obedecer sólo a restricciones técnicas de operación y no debe considerar restricciones medioambientales.

La definición de mínimo técnico tiene ciertas ambigüedades ya que no precisa el requerimiento asociado a las escalas de tiempo que deben ser utilizadas en la evaluación de las propiedades permanente, estable y continua. Lo anterior es importante porque en la operación flexible de plantas térmicas se producen fenómenos de desgaste de distinta naturaleza, que comprometen la intención de operación permanente, estable y continua, en distintas escalas de tiempo.

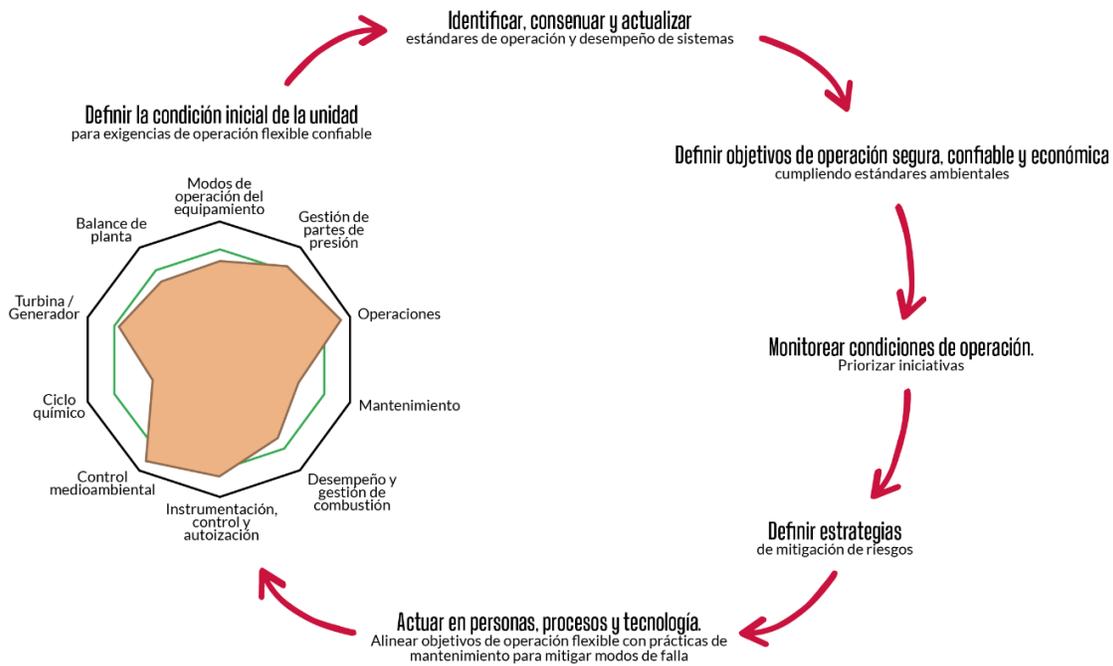
Es crítico notar que generalmente la reducción de mínimo técnico en el corto plazo puede ser exitosa; el desafío es mantener una operación confiable con mínimo técnico reducido de una unidad en el mediano y largo plazo. La definición e implementación de una estrategia de flexibilización de centrales térmicas requiere de un enfoque sistémico y de experimentación diligente y sistemática (Figura 33).

⁵⁰ Versión 2019: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/DETERMINACIÓN-DE-MÍNIMOS-TÉCNICOS-EN-UNIDADES-GENERADORAS.pdf>

Figura 33

Enfoque sistémico y de experimentación sistemática para flexibilización de unidades que acompañen el proceso de transición energética.

Fuente: Elaboración propia.



El mínimo técnico de 38 MW con un molino⁵¹ tiene la intención de ser un punto de evaluación de una nueva condición de operación, en la cual se han identificado factores limitantes. También se han identificado algunos aspectos que deben ser abordados para mantener una operación confiable en el largo plazo.

La nueva condición de operación definida representa una innovación operacional en el contexto nacional e internacional. Como tal, es deseable que sea considerada como una oportunidad y proceso de aprendizaje que requiere de un tratamiento sistémico y disciplinado. Lo anterior, dado que la operación a mínimo técnico con un molino a 38 MW define una condición que permite reevaluar opciones para mejorar los factores limitantes identificados y las prácticas de mantenimiento.

Si durante la operación a 38 MW surgen desafíos con componentes que comprometan la operación confiable de algunos sistemas, la condición de operación debe ser oportuna y apropiadamente ajustada hasta que los factores de riesgo sean abordados.

Finalmente, requerimientos de flexibilización que impliquen mayor tasa de falla deben ser cuidadosamente evaluados. Una mayor flexibilización confiable de las unidades debe ser parte de una estrategia de mejora continua y mejora de eficiencia operacional.

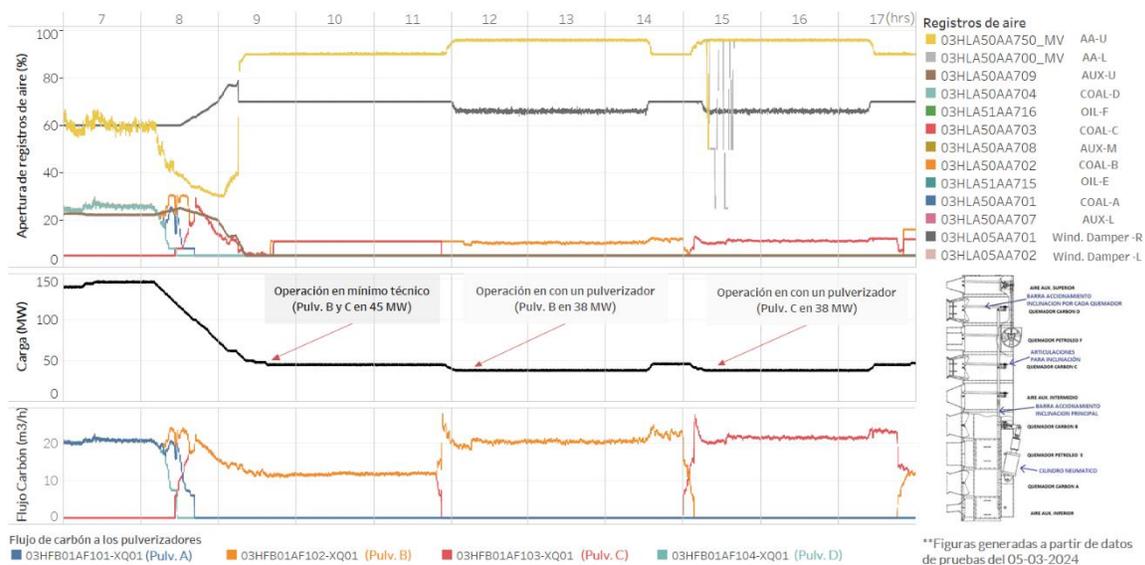
⁵¹ Particularmente los que alimentan los quemadores ubicados en la parte superior de la caldera.

6 Anexos

6.1 Anexo 1: Posición de registros de aire durante las pruebas de 05-03-2024

La siguiente imagen muestra la posición de los registros de aire dada la lógica de control configurada a 05-03-2024:

Figura 34
 Posicionamiento de registros de aire en pruebas de mínimo técnico.
 Fuente: Elaboración propia.



La prueba se desarrolló considerando lo siguiente:

- La Figura 34 se divide en 3 imágenes. La imagen superior muestra la posición de los registros de aire, paralelo al nivel de carga y el flujo de carbón a los pulverizadores. La imagen centro indica la carga durante las pruebas de mínimo técnico e indica el inicio de 3 etapas: (I) operación en 45 MW con pulverizador B y C, (II) operación en 38 MW con pulverizador B y (III) operación en 38 MW con pulverizador C. La imagen inferior muestra el flujo de carbón durante las pruebas de mínimo técnico.
- Entre las 09:40 y 11:40, en operación con dos pulverizadores a 45 MW los registros de aire 03HLA50AA702 y 03HLA50AA703 se posicionan de forma manual en 11%.
- No se ha contado con información respecto a las curvas características de control y criterios técnicos recomendados para la operación para los registros de aire de Guacolda 3.

6.2 Anexo 2: Requerimientos de regulación ambiental asociados al complejo Guacolda

Existen distintos niveles de requerimientos derivados de la regulación ambiental, aplicables a las unidades del complejo Guacolda. Particularmente, los requerimientos asociados a emisiones al aire se dividen en los siguientes niveles:

- Nivel 1: Cumplimiento normativo asociado al DS N° 13, en la chimenea.
- Nivel 2: Cumplimiento de tasas de emisión en la chimenea, definidas en la RCA.
- Nivel 3: Cumplimiento de tasas de emisión o emisiones totales en el complejo de unidades que forman la central, definidas en la RCA.
- Nivel 4: Cumplimiento de niveles de concentración de emisiones a nivel comunitario en zona afectada debido a requerimientos de norma primaria de calidad de aire y plan de descontaminación, en caso de ser aplicable.

La Figura 35 muestra los requerimientos de emisiones aplicables a Guacolda para cada uno de los 4 niveles mencionados anteriormente. Por una parte, la tasa de emisión en cada una de las cuatro chimeneas está limitada a los límites establecidos en el DS N° 13. Para las unidades 1 a 4 aplican los límites de emisiones de fuentes emisoras existentes (Tabla 1 del DS13/2011), mientras que para la unidad 5 aplican los límites para para fuentes emisoras nuevas (Tabla 2 DS13/2011) (Tabla 22).

Tabla 22

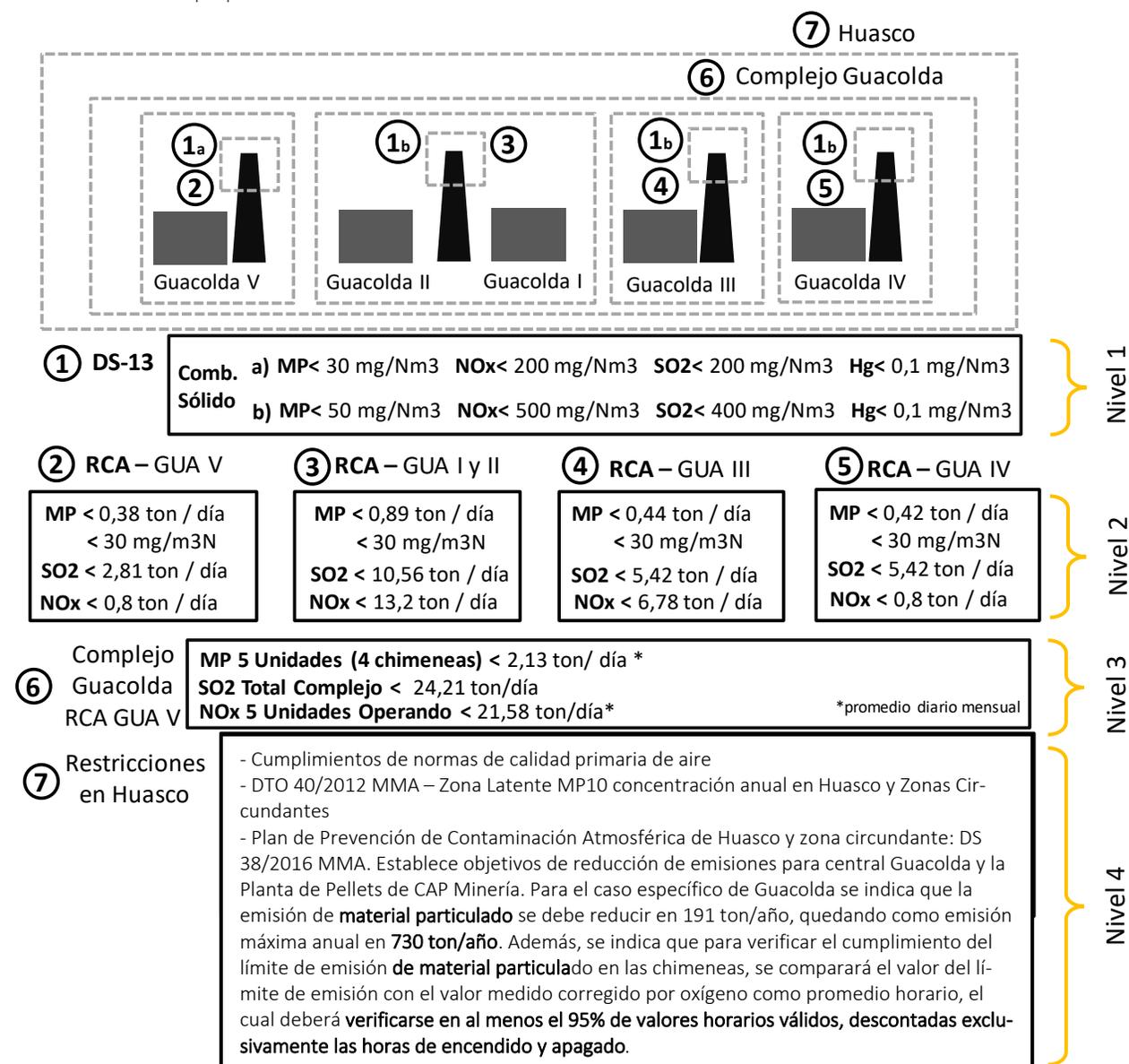
Límites de emisión establecidos en el DS13/2011 que aplican a las unidades de Guacolda.

Fuente: Elaboración propia.

| Unidad | Límite MP (mg/Nm ³) | Límite NOx (mg/Nm ³) | Límite SO ₂ (mg/Nm ³) |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------|--|
| 1, 2, 3 y 4 | 50 | 500 | 400 |
| 5 | 30 | 200 | 200 |

No obstante, en la RCA asociada al proyecto de Eliminación del Uso de Petcoke en Central Guacolda y Ajuste de Capacidad de Generación Eléctrica, aprobada mediante RE N° 80 de 2017 de la Comisión de Evaluación de la Región de Atacama, se indica el compromiso de reducir las tasas de emisión de material particulado a 30 mg/Nm³ en todas las chimeneas. También se establece una emisión estimada en toneladas por día para MP, NOx y SO₂ en cada unidad. La RCA no entrega información respecto del potencial de emisiones en modos de operación distintos a potencia nominal.

Figura 35
 Síntesis de requerimientos relacionados a emisiones atmosféricas en Complejo Guacolda.
 Fuente: Elaboración propia.



6.3 Anexo 3: Aspectos generales asociados a la disminución de mínimo técnico operando con un molino

A continuación, se presentan los principales aspectos asociados a la operación de una central a carbón con un molino.

6.3.1 Descripción general de la operación con un molino

Con la operación de dos molinos se limita la posibilidad de reducir más el mínimo técnico de la unidad. Una mayor reducción del mínimo técnico debe considerar, entre otros factores, limitaciones asociadas al sistema de combustión tales como: el rango de control de los molinos de carbón, el flujo de masa de aire primario, y el funcionamiento de los quemadores; limitaciones de funcionamiento de la turbina; limitaciones de funcionamiento del sistema de control de emisiones; consideraciones de seguridad; entre otros. En algunos casos es posible reducir el mínimo técnico bajo el 25-30% si se considera el funcionamiento con un molino (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012) (Richter, Oeljeklaus, & Görner, 2020).

Los molinos experimentan problemas de vibración cuando funcionan en rangos de carga inferiores. Por ende, en rangos de operación a bajas cargas se sugiere apagar algunos molinos y llevar a los molinos restantes a una condición de operación más cerca de sus condiciones nominales de diseño.

Como un molino suele suministrar combustible solo a una etapa de quemador, el apagado de un molino conduce a un funcionamiento de la caldera con un número reducido de etapas de quemado (elevaciones). Durante el funcionamiento con un molino se suele utilizar la etapa más alta del quemador para liberar calor en la parte superior de la caldera.

La Figura 36 muestra un dibujo técnico representativo de una disposición de molino – quemadores en una caldera con 4 molinos. Las cruces moradas indican los molinos que están apagados, mientras que las flechas rosa ilustran el flujo de aire que transporta el carbón pulverizado desde el molino 4 hasta la etapa del quemador 4, donde es soplado al interior de la caldera.

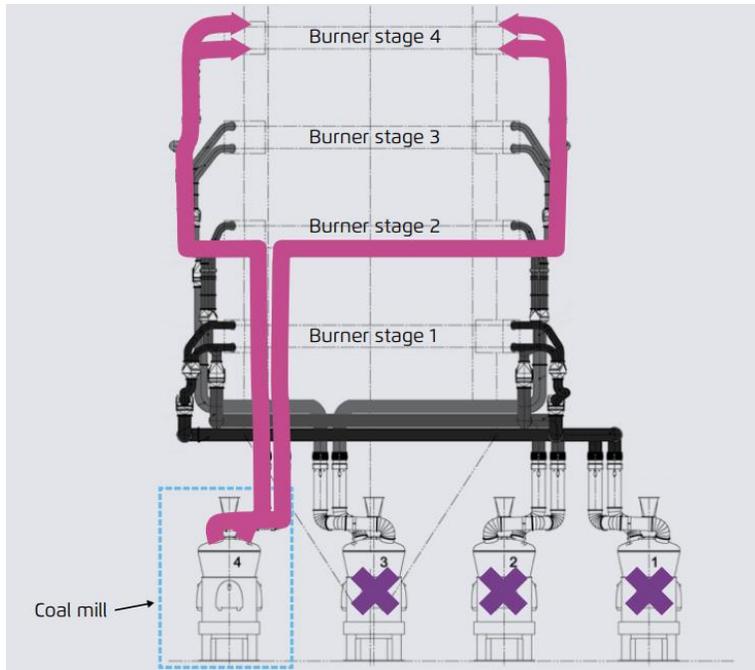


Figura 36: Disposición de los molinos y el sistema de quemadores en la operación con un molino. Fuente: (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012) en (Agora Energiewende, 2017).

La disposición de los quemadores ilustrada anteriormente, en combinación con un mayor exceso de aire y la manipulación de las inclinaciones del quemador (en unidades de disposición tangencial como Guacolda), compensa las temperaturas más bajas del vapor y de los gases de combustión creando una llama más fría y más gases de combustión (Agora Energiewende, 2017). Dado que el calor se introduce en la parte superior del hogar, se modifica la relación de la entrada de calor en la zona inferior de la caldera, así como en el sobrecalentador y el recorrido de los gases de combustión (Figura 37).

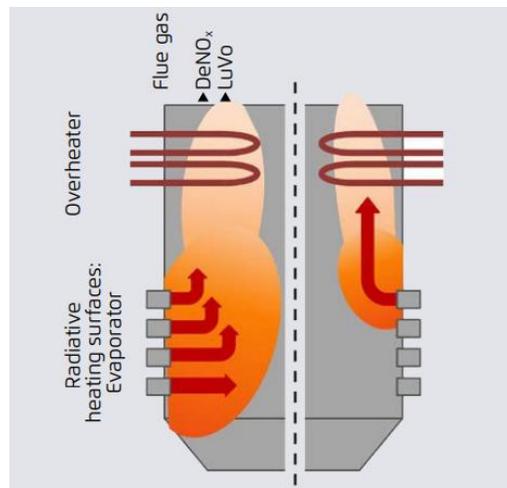


Figura 37: Comparación entre el funcionamiento con 1 y 4 niveles de quemadores. Fuente: (Agora Energiewende, 2017).

El funcionamiento de un molino es una opción que va acompañada de un proceso de optimización de la combustión.

6.3.2 Desafíos y limitaciones de la operación con un molino

Los principales desafíos asociados a la operación con un molino hacen referencia a la estabilidad del proceso de combustión, su correcto monitoreo, el manejo de las temperaturas al interior de la caldera, y mantener las condiciones de presión y temperatura nominales en la turbina. El detalle de los principales desafíos identificados se presenta a continuación:

a. Inestabilidad de llama

Al operar a bajas cargas en el pulverizador, el carbón entregado al quemador se reduce y la longitud de la llama se acorta en comparación con el patrón de llama de disparo tradicional; de esta forma, no se produce interacción entre quemadores.

La principal consecuencia es que se producen problemas en la estabilidad de la llama. En las unidades de combustión tangencial, al estar operando con los quemadores de un solo nivel (Figura 36), no se dan las condiciones para la mezcla de combustible y aire (la mezcla está prevista en el hogar, no en la punta del quemador).

En algunos instantes, es aconsejable utilizar un combustible estabilizador (diésel o gas) para asegurar la estabilidad de la llama.

b. Escáner de llama

Mediante la operación con un molino sería posible operar hasta un 12,5% de carga máxima de la caldera respetando las restricciones de carga de los pulverizadores para evitar problemas de vibración bajo el 50% de la carga. No obstante, para ello se debe asegurar que los escáneres de llama cumplen con sus funciones principales las cuales son:

- Ser lo suficientemente sensibles como para discernir la envoltura mínima de la llama.
- Proteger al sistema de una combustión en una condición insegura
- Ser confiables.
- Tener características a prueba de fallas para evitar salidas de operación innecesarias.

Los escáneres de llama de los quemadores de carbón suelen estar situados en el quemador o junto a la boquilla y apuntan en un ligero ángulo hacia la llama prevista. Esto significa que la línea de visión está fuera en el área del hogar, no inmediatamente cerca de la boquilla del quemador. La intersección de las dos líneas centrales está aproximadamente a la mitad del centro del hogar. En los sistemas de quemadores frontales cada quemador debe ser supervisado individualmente. Para el caso de los sistemas de quemadores tangenciales, no obstante, suelen ser suficientes dos detectores de llama por nivel para la supervisión redundante de la llama (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

Con el pulverizador operando hasta media carga la longitud de la penetración del chorro desde el quemador es aproximadamente la mitad, en comparación con operación a carga total (ver Figura 38, para un sistema tangencial como es el caso de Guacolda). De esta forma, cada quemador emana una llama que es controlada de forma independiente, es decir, la llama producida

no proporciona energía de ignición para el combustible admitido en los otros lugares. Así, dependiendo del tamaño de la unidad y del ángulo creado por la línea de visión del escáner de llama, la vista puede pasar por alto la llama, ya que ahora es aproximadamente la mitad de lo que era a plena carga.

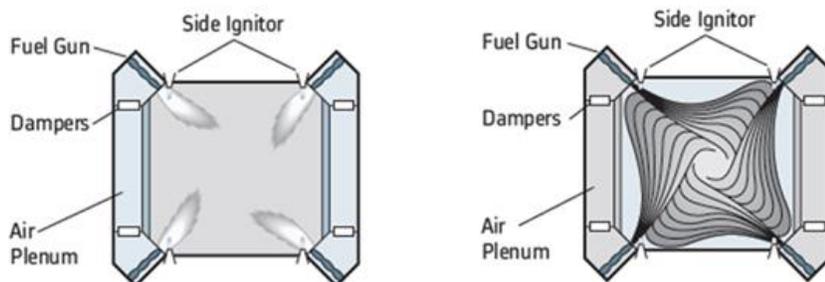


Figura 38: Patrón de quemado tangencial a bajas cargas y en condiciones de operación normal. Fuente: (Bozzuto, 2009).

Este desafío puede ser compensado parcialmente aumentando el exceso de aire a baja carga⁵², lo que tiene la desventaja de enfriar la llama y reducir la eficiencia de la combustión. De esta forma, se debe determinar mediante pruebas el nivel óptimo de funcionamiento para el sistema. Se requiere que todos los escáneres de llama en el nivel de los quemadores activos estén en funcionamiento por razones de seguridad y es probable que se deba invertir en un equipo de detección de llama complementario.

c. Temperatura de los gases y problemas de corrosión

Un tercer desafío de la operación con un molino tiene relación a que el hogar está más frío que a plena carga, o incluso a media carga. La menor temperatura de los gases reduce la velocidad de combustión, lo que provoca una mayor formación de CO y un mayor contenido de carbono no quemado en las cenizas. El nivel de exceso de aire tiende a ser mayor, ya que sigue siendo necesario disponer de aire suficiente para transportar el carbón hasta el nivel del quemador.

Así, la temperatura del gas que sale de las distintas secciones de la caldera será más baja, lo que puede arrastrar problemas de corrosión en los calentadores de aire y los sistemas de abatimiento de las emisiones. De esta forma, se debe tener control sobre la temperatura mínima del gas que se requiere para evitar problemas de corrosión.

d. Temperatura del circuito de vapor

El último desafío está asociado a la coincidencia de las temperaturas del vapor del sobrecalentador y del recalentador que va a la turbina de vapor. A medida que la carga disminuye, la temperatura del sobrecalentamiento tiende a ser mayor que la del recalentamiento, ya que los haces de tubos del sobrecalentador suelen ser los primeros en el recorrido del gas; además, pueden presentarse dificultades para mantener la presión en la unidad⁵³. Por lo tanto, se prevén modificaciones en el sistema de control para permitir este tipo de funcionamiento y se

⁵² De todas formas, es probable que se necesite un exceso de aire un poco mayor, en parte para transportar el carbón y en parte para proporcionar algo de mezcla adicional y concentración de oxígeno para el quemado.

⁵³ Debería ser posible rociar el vapor SH para que coincida con la temperatura del vapor RH.

identifica el ciclo de vapor como una de las limitantes para la reducción del mínimo técnico con un molino.

6.3.3 Aspectos de la norma NFPA 85 asociados a la operación con un molino

No se identifican requisitos directos o restricciones específicas dentro de la norma NFPA 85 que exijan que un mínimo de 2 molinos tenga que estar en servicio; de esta forma, se desprende que el funcionamiento en un solo molino no está específicamente prohibido. No obstante, hay una serie de recomendaciones que deben seguirse para la operación de los molinos.

A continuación, se listan las principales referencias de la norma NFPA 85 con respecto a la correcta puesta en marcha y salida de operación de los molinos, pruebas necesarias para verificar condiciones de estabilidad de llama y condiciones normales de operación.

a. NFPA 85, Sección 6.8.5.2.1.3 – Secuencia de arranque

Los párrafos B (1) a (16) incluyen la secuencia completa de arranque, el funcionamiento normal y la secuencia de parada de una unidad de carbón. El detalle incluye la operación de los ventiladores de tiro inducido y forzado, dampers, registradores de aire, detectores de llama, sistema de ignición, molinos, quemadores de carbón pulverizado, entre otros.

El párrafo (B) (18), a su vez, define los requisitos para poner en funcionamiento un molino adicional:

“The procedures of 6.8.5.2.1.3(B)(6) through 6.8.5.2.1.3(B)(16) shall be followed for placing an additional pulverizer into service. When fuel is being admitted to the furnace, igniters shall not be placed into service for any burner without proof that there is a stable fire in the furnace.”

Luego, el párrafo (B) (19) indica que el sistema de ignición (combustible de apoyo) no se debe apagar hasta que haya un mínimo de dos molinos en funcionamiento y se alcancen condiciones de carga estables:

“Igniters shall be permitted to be shut off after exceeding a predetermined minimum main fuel input that has been determined in accordance with 6.8.3.2.2 [Tests for Stable Flame Limits.]. Verification shall be made that the stable flame continues on the main burners after the igniters are removed from service.”

Finalmente, el párrafo (21) destaca la disposición de pulverizadores adicionales de acuerdo a los requisitos de carga de la caldera:

“Additional pulverizers shall be placed into service as needed by the boiler load in accordance with the procedures of 6.8.5.2.1.3(B)(6) through 6.8.5.2.1.3(B)(16).”

b. NFPA 85, Sección 6.8.3.2.2 – Pruebas

La Sección 8.8.3.2.2 indica las pruebas a realizar para verificar las condiciones estables de la llama, una vez que se retire el sistema de ignición con combustible de apoyo:

“Tests for Stable Flame Limits. The limits of stable flame for each burner subsystem producing a separate flame envelope shall be determined by tests without the ignition subsystem in service. These tests shall verify that transients generated in the fuel and air subsystems do not affect the burners adversely during operation. These tests shall include the expected range of fuels to be fired in the unit. These tests shall be repeated after any combustion process modification, such as the addition of overfire air, low NOx burners, and reburn, and after switching to any fuel not previously tested.”

c. NFPA 85, Sección 6.8.5.2.2. – Operación Normal

Se definen las condiciones normales de operación. De acuerdo con la definición presente en el párrafo 6.8.5.2.2.6, a medida que se reduce la tasa de combustión de la unidad, deben conservarse unas condiciones de llama estables. Además, se da a entender que no se permite el funcionamiento con un solo molino como parte de la operación normal:

“If lower minimum loads are required, the pulverizer(s) and associated burners shall be removed from service, and the remaining pulverizers shall be operated at a fuel rate above the minimum rate needed for stable operation of the connected burners. [...] The minimum fuel rate shall be determined by tests with various combinations of burners in service and with various amounts of excess air and shall reflect the most restrictive condition. [...] These tests also shall ensure that the transient stability factors described in 6.8.3.2.2 are taken into account.”

No obstante, la lógica estándar del sistema de gestión del quemador (BMS, por sus siglas en inglés) no genera una desconexión de combustible principal (*trip*) en el caso de que sólo un molino esté en funcionamiento sin combustible de apoyo. Actualmente se puede producir un *trip* si la unidad está operando a baja carga con dos molinos en operación y uno de ellos sale de servicio de forma intempestiva. De esta forma, el riesgo de *trip* de la unidad se identifica como un problema que no es exclusivo a la operación con un molino. En esta condición, los escáneres de llama deben operar correctamente para proporcionar una supervisión adecuada de las condiciones de llama del hogar.

6.3.4 Experiencias previas de operación con un molino

De acuerdo a lo analizado, el funcionamiento de un nivel de quemador individual es posible (a partir de una serie de modificaciones) sin que se deteriore la estabilidad de la combustión, lo que permite reducir la carga mínima de la caldera por debajo de los límites del funcionamiento convencional con dos molinos. Tras la implementación del funcionamiento con un solo molino, la carga mínima ya no está limitada por las restricciones de combustión, sino por otras restricciones, principalmente en el ciclo de vapor.

Existen experiencias de centrales termoeléctricas que han reducido su carga mínima a cerca del 10% aplicando el funcionamiento de un solo molino, principalmente ubicadas en Alemania. La Unidad 7 de la central de Heilbronn y la central Bexbach (inicio de funcionamiento en 1985 y 1983, respectivamente), han demostrado que una reducción de la carga mínima al 12,5% de potencia nominal ha sido posible al cambiar de un funcionamiento de dos molinos a un molino.

De hecho, se comprobó que el funcionamiento con un solo molino lograba una mayor estabilidad en la combustión que el funcionamiento con dos molinos a baja carga, ya que al utilizar un molino tanto el quemador como el molino pueden operar más cerca de su punto de diseño. Desde finales de 2011, el funcionamiento de un molino se ha utilizado en ambas centrales.

A continuación, se indican algunos aspectos de los procesos de reducción de mínimo técnico mediante operación con un molino desarrollados las centrales de Heilbronn y Bexbach. Se han identificado otras iniciativas relacionadas a la operación con un molino en Dinamarca y Estados Unidos⁵⁴ (Clean Energy Ministerial, 2018).

Caso de estudio: Heilbronn Block 7

En la unidad 7 de Heilbronn, central de carbón pulverizado de 800 MW, el funcionamiento con un molino logró reducir la carga mínima de 200 MW a 100 MW (12,5% de la potencia nominal). La unidad corresponde a una caldera de circulación flujo forzado, con una combustión que se realiza a través de cuatro molinos de rodillos verticales, cada uno de los cuales sirve a los cuatro quemadores tangenciales de un nivel (Figura 39).

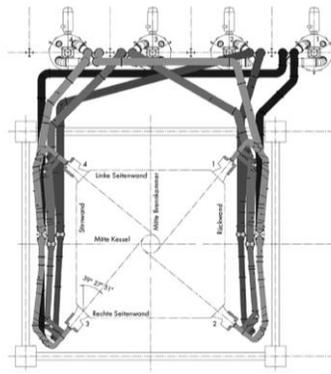


Figura 39: Disposición del sistema de quemadores tangenciales en la central de Heilbronn. Fuente: (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

Previo a la disminución del mínimo técnico, la unidad operaba a un mínimo técnico de 25%, mediante el uso de dos molinos, alimentando dos niveles de quemadores a aproximadamente el 50% de su capacidad. En primera instancia, las pruebas fueron enfocadas en la disminución del mínimo técnico a valores cercanos a un 20% (ver Figura 40). No obstante, al disminuir la carga de los molinos hasta un límite de diseño de 40%, se produjeron problemas en las señales del detector de llama, perdiendo estabilidad.

⁵⁴ En comunicaciones establecidas durante el desarrollo del estudio, EPRI da cuenta de experiencias en Estados Unidos de operación con un molino en rangos de carga de hasta un 5% de la capacidad nominal.

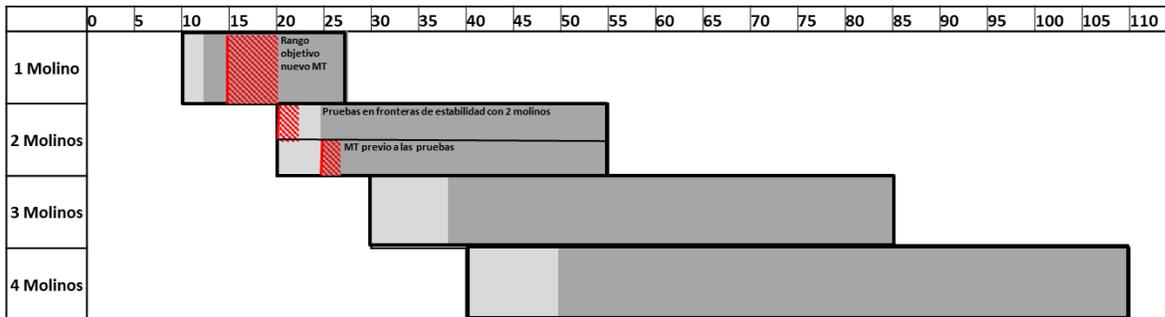


Figura 40: Rangos de carga definidos como objetivo para las pruebas en Heilbronn Block 7. Fuente: Elaboración propia a partir de (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

La Figura 40 presenta los rangos de carga teóricos de la unidad 7 de Heilbronn para la operación entre 1 y 4 molinos. Cada rango se divide en una zona de color gris oscuro, definida como la zona de operación estable para los molinos en operación. La zona de color gris claro, a su vez, representa el rango de operación donde la combustión se vuelve más inestable. Las marcas rojas representan el rango objetivo de carga mínima en el funcionamiento con un molino, así como el mínimo técnico anterior y el rango pruebas para alcanzar el límite de estabilidad del funcionamiento de dos molinos.

A partir de los resultados de la prueba de disminución del mínimo técnico en operación con dos molinos, se identificó que no se produjeron limitaciones relevantes en los demás equipos de la unidad. De esta forma, a partir de pruebas preliminares basadas en las condiciones de puesta en marcha (operación con un molino y combustión auxiliar de petróleo), se identificó que la planta podía seguir disminuyendo su mínimo técnico al desconectar uno de los dos molinos en operación y operar el restante a una carga superior (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

Dado que los mínimos técnicos por debajo del 25% no han sido relevantes en la operación de las centrales termoeléctricas, se prevé que no se haya implementado como un modo de funcionamiento permisible en la tecnología de control y la protección de la caldera. Para la prueba hubo que supervisar específicamente la estabilidad de la llama y modificar diversos ajustes del sistema de control para poder ejecutar los rangos de funcionamiento parcialmente ampliados.

Durante las pruebas, las señales de los monitores de llama fueron mucho más estables que en el funcionamiento comparable de dos molinos (Figura 41), además de manifestar un encendido estable.

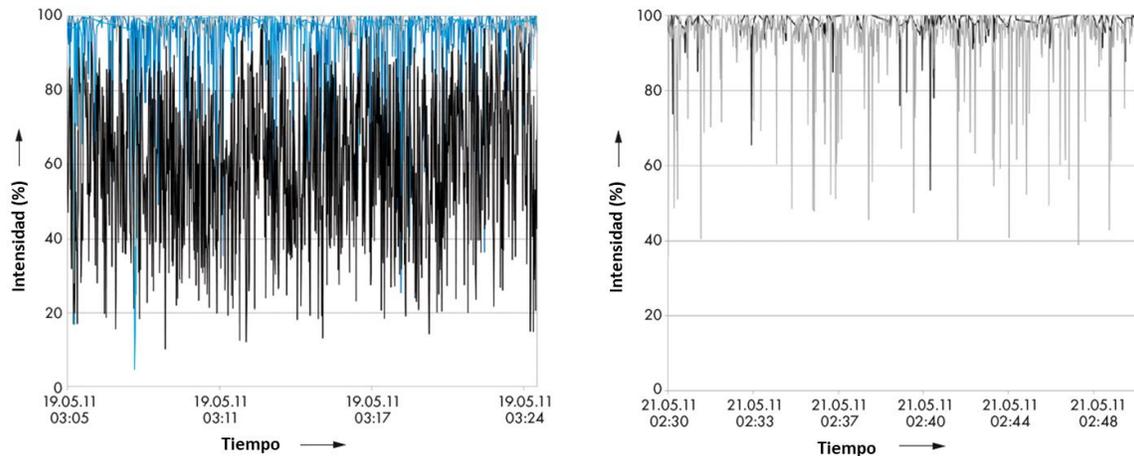


Figura 41: Intensidad de llama a lo largo de las pruebas de la operación con un molino en Heilbronn. Fuente: Adaptado a partir de (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

En la Figura 41 se presenta la intensidad de la llama a lo largo de las pruebas realizadas en la unidad 7 de la central de Heilbronn en 2011. En la gráfica de la izquierda se representan las señales de los detectores de llamas de los quemadores de los niveles 3 y 4 para una operación con dos molinos a una carga del 21% de la caldera. En la gráfica de la derecha las señales de los detectores de llama para los quemadores del nivel 4 en operación a 15% de la caldera (detalles en Figura 39).

Otros parámetros de operación que se monitorearon durante las pruebas fueron los niveles de CO y la producción de cenizas. El contenido de CO, por un lado, aumentó ligeramente como se esperaba (debido a la menor carga del hogar en la caldera); no obstante, sin entrar en rangos problemáticos. Por lo demás, no se pudo medir ningún cambio en el contenido de carbono residual en las cenizas volantes (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

Las principales conclusiones del proceso de transformación de la unidad 7 de Heilbronn se listan a continuación:

- La combustión resultó ser más estable que en el funcionamiento con dos molinos.
- Se instalaron dos controladores de llama adicionales en cada etapa del quemador para lograr una mejor supervisión de la llama.
- La adaptación de la tecnología de control y la seguridad de la caldera fue una tarea importante para la implantación del funcionamiento en un solo molino.

Caso de estudio: Bexbach

En Bexbach, una central de carbón pulverizado de quemado tangencial en 4 niveles y operación con 4 molinos de 721 MW de potencia nominal, el mínimo técnico se redujo de 250 MW originalmente, a 170 MW bajo condición de operación con dos molinos y luego a 90 MW en funcionamiento con un solo molino (12,5% de la potencia nominal). La central se diseñó como una

instalación de circulación forzada de carga media y con puesta en marcha unas 50 veces al año en los años previos a la puesta en servicio de la operación con un molino.

Al igual que en Heilbronn, también se llevó a cabo una prueba en el funcionamiento de un molino para sondear dónde están los límites de bajada en el proceso. Se modificó la cadena de seguridad de la caldera para permitir el funcionamiento de un molino con el nivel de quemado superior. A partir del punto de carga mínima, el nivel de combustión 3 se apagó con la combustión de apoyo de petróleo y luego se redujo gradualmente la combustión de petróleo. El punto de carga en el que el nivel superior de combustión podía funcionar sin combustión de petróleo y todos los valores del proceso, incluidas las señales del monitor de llama, se estabilizaron en aproximadamente 90 MW netos.

Una vez encontrado el punto de operación estable a mínima carga en Bexbach, los siguientes pasos de la prueba consistieron en trabajar en las rampas de carga hacia y desde el punto de operación estable. Para la rampa de subida a partir de los 90 MW fue necesaria combustión de apoyo de petróleo para que el segundo molino se encendiera de forma confiable. Posteriormente, se pudo demostrar que era posible pasar de operación a baja carga utilizando dos molinos a una operación con un molino sin utilizar apoyo de combustible alternativo.

La lógica estándar de permiso de encendido (NFPA Sección 6.8.5.2.1.3 Párrafo (B) (19)) define que los requisitos específicos de operación en los molinos, bajo los cuales se debe mantener encendido el sistema de ignición de apoyo, deben ser definidos a partir de pruebas de estabilidad de llama. La lógica estándar de permiso de encendido suele exigir que el sistema de ignición de apoyo deba estar encendido mientras la carga de la caldera sea inferior al 30% y la velocidad del alimentador del molino sea inferior al 50%.

Además, no se ha identificado experiencia práctica de unidades con la capacidad de encender un segundo molino sin el uso de combustible de apoyo; en el caso de ser posible, se prevé necesario cambiar toda la lógica de seguridad.

El sistema de quemadores tangenciales de la unidad de Bexbach estaba compuesto por dos detectores de llama por nivel, suficientes para la supervisión redundante de la llama. No obstante, para poder lograr una seguridad de supervisión adicional del nivel individual para el funcionamiento de un solo molino, se instalaron dos detectores de llama adicionales por nivel.

Las principales conclusiones del proceso de transformación en la central de Bexbach se listan a continuación:

- Se comprobó que las variables del proceso eran más estables en el funcionamiento de un solo molino que en el de dos.
- Para la correcta supervisión de la etapa 4 del quemador en el funcionamiento de un solo molino, fue necesario instalar controladores de llama adicionales.
- Para un funcionamiento estable no se requiere ningún tipo de combustión auxiliar a 90 MW de potencia neta. Sin embargo, para aumentar la carga a partir del mínimo técnico, es

necesario utilizar petróleo como combustible de apoyo, con el objetivo de encender de forma segura el segundo molino, próximo a entrar en operación.

Las principales experiencias operativas con la nueva carga mínima en el funcionamiento de un molino de ambas unidades son sintetizadas en la Tabla 23 (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

Tabla 23: Resumen de las experiencias operativas con el nuevo mínimo técnico. Fuente: elaboración propia a partir de (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

| Desplazamiento de la entrada de calor en la caldera y en los gases de combustión para estabilizar las temperaturas de la caldera | Efectos de la reducción de la carga mínima en el ciclo agua-vapor | Influencia sobre los componentes auxiliares |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Para mitigar el descenso de las temperaturas en el vapor y los gases de combustión cuando se reduce la carga mínima, se selecciona el nivel superior de combustión y se aumenta el exceso de aire. ▪ Debido al exceso de aire la llama es más fría y se produce más gas de combustión. ▪ Producto de la reducción en la cantidad de agua a evaporar, se puede completar el ciclo de vapor y mantener de la temperatura suficientes en el sistema de abatimiento de NO_x y en el trayecto posterior de los gases de combustión, a pesar de la reducción de las temperaturas de la cámara de combustión y del aumento de las pérdidas. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cuando se reduce la carga, disminuyen las presiones y caudales del circuito de agua-vapor. En el caso de las turbinas y componentes asociados (ej. válvulas), se debe comprobar individualmente si los valores de funcionamiento se encuentran dentro del rango permitido. ▪ Dependiendo de las características específicas de la caldera y el tipo de flujo, se debe revisar que la circulación de agua a través de la caldera esté en rangos de operación adecuados. ▪ El suministro de vapor auxiliar de las plantas debe estar garantizado incluso con una carga mínima. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ El sistema de abatimiento de las emisiones de NO_x pudo funcionar de forma estable. Las temperaturas de entrada al sistema, su rendimiento y el contenido de amoníaco en las cenizas resultaron no ser problemáticos. ▪ El sistema FGD en Heilbronn Block 7 pudo funcionar sin mayores problemas, de modo que no se requieren cambios para el funcionamiento con carga mínima. ▪ Las temperaturas en los sistemas de calentamiento del aire primario y secundario descendieron. Sin embargo, se tomaron las medidas de ingeniería de proceso adecuadas para elevar las temperaturas de manera que no se produjera un deterioro significativo en el extremo frío. |

El funcionamiento a carga mínima y la operación con un molino deben ser evaluadas mediante pruebas y dependen de las características específicas de cada planta. A continuación, se listan a modo de resumen los principales ajustes llevados a cabo para las centrales de Heilbronn y Bexbach (T. Heinzel, comunicación personal, 4 de abril 2021):

- Temperatura mínima de entrada a los sistemas de abatimiento de NO_x.
- Temperatura mínima en el extremo frío de los calentadores de aire regenerativos, para evitar caer por bajo el punto de rocío ácido.
- Presión mínima de suministro de vapor auxiliar.
- Flujo mínimo de la turbina de baja presión.
- Dimensiones mínimas de las brechas en los sellos de la turbina.

- Gradientes de temperatura permisibles y tasas de cambio de carga.
- Paradas de seguridad.

La seguridad es identificada como un aspecto crítico a la hora de operar con un molino. Se debe asegurar que el apagado del penúltimo molino no provoque el apagado de la llama de los quemadores que deben quedar en operación. Además, se deben gestionar las reducciones repentinas de carga (T. Heinzl, comunicación personal, 4 de abril 2021).

6.4 Anexo 4: Tipos de carbón utilizados en Guacolda

En este anexo se describen algunos de los tipos de carbón utilizados por Guacolda. Estos son mezclados en los silos según las necesidades de Guacolda y quemados en la caldera.

a) Carbón para generación de vapor australiano con alto contenido de cenizas

Tabla 24: Datos del carbón australiano de alta ceniza utilizado por Guacolda (Vessel: Olivia C).

| Carbón con alto contenido de cenizas. Certificado N° 23051202CB | | | |
|---|-------------------------|-----------|---------|
| Parámetro de control | Clasificación | Resultado | Unidad |
| Poder calorífico bruto | ARB (As Received Basis) | 5884 | Kcal/kg |
| Poder calorífico neto | ARB | 5626 | Kcal/kg |
| Humedad total | ARB | 10,5 | % |
| Humedad inherente | ADB (Air Dry Basis) | 2,5 | % |
| Ceniza | ARB | 16,6 | % |
| Sulfuros totales | ARB | 0,79 | % |
| Materia volátil | ARB | 29,5 | % |
| Dureza | HGI | 48 | |
| Cloro | ARB | 0,02 | % |
| Fluor | ARB | 74 | ppm |
| Tamaño | 0 x 50 mm | 98,6 | % |
| Carbón | DB (Dry basis) | 66,6 | % |
| Hidrógeno | DB | 4,33 | % |
| Nitrógeno | DB | 1,51 | % |
| Oxígeno | DB | 8,08 | % |

b) Carbón para generación de vapor colombiano Drummond

Tabla 25: Datos del carbón colombiano Drummond utilizado por Guacolda (Vessel: Lady).

| Carbón Drummond. Certificado N° 2310234180SA | | | |
|--|--|-----------|---------|
| Parámetro de control | Clasificación | Resultado | Unidad |
| Poder calorífico bruto | ARB (As Received Basis) | 5566 | Kcal/kg |
| Poder calorífico neto | ARB | - | Kcal/kg |
| Humedad total | ARB | 16,78 | % |
| Humedad inherente | ADB (Air Dried Basis) | - | % |
| Ceniza | ARB | 9,94 | % |
| Sulfuros totales | ARB | 0,78 | % |
| Materia volátil | ARB | 32,19 | % |
| Dureza | HGI | 46 | |
| Cloro | ARB | - | % |
| Fluor | ARB | - | ppm |
| Tamaño | Passing 2 ½ in (63 mm), round, Retained 2 in (50 mm), round | 3,5 | % |
| Carbón | DB (Dry basis) | 69,2 | % |
| Hidrógeno | DB | 4,65 | % |
| Nitrógeno | DB | 1,5 | % |
| Oxígeno | DB | 11,73 | % |

c) Carbón para generación de vapor de Estados Unidos de alto azufre

Tabla 26: Datos del carbón de Estados Unidos de alto azufre utilizado por Guacolda (Vessel: Sirocco).

| Carbón de alto azufre. N° de caso NL23-160 | | | |
|--|-------------------------|-----------|---------|
| Parámetro de control | Clasificación | Resultado | Unidad |
| Poder calorífico bruto | ARB (As Received Basis) | 6526 | Kcal/kg |
| Poder calorífico neto | ARB | 6235 | Kcal/kg |
| Humedad total | ARB | 10,2 | % |
| Humedad inherente | ADB (Air Dried Basis) | - | % |
| Ceniza | ARB | 9,49 | % |
| Sulfuros totales | ARB | 2,66 | % |
| Materia volátil | ARB | 35,59 | % |
| Dureza | HGI | 53 | |
| Cloro | ARB | - | % |
| Fluor | ARB | - | ppm |
| Tamaño | + 2 inch | 2 | % |
| Carbón | DB (Dry basis) | 65,46 | % |
| Hidrógeno | DB | 4,51 | % |
| Nitrógeno | DB | 1,42 | % |
| Oxígeno | DB | 6,27 | % |

6.5 Bibliografía

- Heinzel, T., Meiser, A., Stamatelopoulos, G.-N., & Buck, P. (2012). *Einführung Einmühlbetrieb in den Kraftwerken Bexbach und Heilbronn Block 7*. Alemania: VGB PowerTech.
- Richter, M., Oeljeklaus, G., & Görner, K. (2020). *Dynamic simulation of flexibility measures for coal-fired power plants*. VGB Powertech.
- Agora Energiewende. (2017). *Flexibility in thermal power plants - with a focus on existing coal-fired power plants*. Berlin, Alemania.
- Bozzuto, C. (2009). *Clean Combustion Technologies - A Reference Book on Steam Generation and Emissions Control*. Alstom.
- STEAG Energy Services GmbH. (2015). *Informe de Auditoría - Central Guacolda 2015*. Chile: Coordinador Eléctrico Nacional.
- Clean Energy Ministerial. (2018). *Thermal Power Plant Flexibility. A PUBLICATION UNDER THE CLEAN ENERGY MINISTERIAL CAMPAIGN*. Dinamarca: Clean Energy Ministerial Campaign.

