

# inodú

## Flexibilización de Unidad 2 de Central Guacolda

Mínimo Técnico de Unidad 2  
mediante operación con 1 molino

Noviembre  
2023



**GUACOLDA**  
energía

Flexibilización de Unidad 2  
de Central Guacolda

**inodú**

# Tabla de contenido

<b>Resumen ejecutivo .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Objetivo del documento.....</b>	<b>6</b>
<b>2 Caracterización de la Unidad 2 de Central Guacolda .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Definición de objetivo de flexibilización de Unidad 2 de Central Guacolda .....</b>	<b>11</b>
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 2 de Central Guacolda.....	17
3.5 Hoja de ruta para objetivos de reducción de mínimo técnico de Guacolda 2 .....	19
3.6 Plan de pruebas de Guacolda 2 a mínimo técnico reducido con un molino.....	21
<b>4 Análisis de la operación observada durante la prueba de Mínimo Técnico.....</b>	<b>23</b>
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
<b>5 Conclusión.....</b>	<b>55</b>
5.1 Factores limitantes identificados .....	55
5.2 Mínimo técnico revisado en condición de operación con un molino .....	60
<b>6 Anexos .....</b>	<b>63</b>
6.1 Anexo 1: Requerimientos de regulación ambiental asociados al complejo Guacolda ...	63

6.2	Anexo 2: Aspectos generales asociados a la disminución de mínimo técnico operando con un molino .....	65
6.2.1	Descripción general de la operación con un molino .....	65
6.2.2	Desafíos y limitaciones de la operación con un molino .....	67
6.2.3	Aspectos de la norma NFPA 85 asociados a la operación con un molino .....	69
6.2.4	Experiencias previas de operación con un molino.....	70
6.3	Bibliografía .....	77
6.4	Anexo 3: Tipos de carbón utilizados en Guacolda .....	78

# Resumen ejecutivo

Durante el año 2022 y 2023 se trabajó en desarrollar e implementar una estrategia de flexibilización para la Unidad 2 de Central Guacolda. Como resultado de este proceso, y luego de realizar durante el año 2023 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 molino<sup>1</sup>.

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 2 de Central Guacolda.
3. En el Capítulo 4 se presenta el análisis de la prueba final realizada en la Unidad 2 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.

---

<sup>1</sup> 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 2 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 2 de Central Guacolda fueron:

1. Verificar la aplicación de la lista de verificación<sup>2</sup> de sala de control de la Unidad 2 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 2 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.

---

<sup>2</sup> 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 2 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 servicio<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Salvo para el caso de la Unidad 1, cuyo informe de reducción de mínimo técnico fue recientemente publicado por el Coordinador Eléctrico Nacional. El informe se encuentra en etapa de consulta con los Coordinados hasta el 28 de noviembre.

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

<b>Categoría</b>	<b>Guacolda 1</b>	<b>Guacolda 2</b>	<b>Guacolda 3</b>	<b>Guacolda 4</b>	<b>Guacolda 5</b>	<b>Fuente</b>
<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>	50 MW <sup>4</sup>	50 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>OFA<sup>5</sup></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 <sup>3</sup> N/h)	Filtro de mangas (99,85%, 610 km <sup>3</sup> N/h)	P. Electrostático (99,85%, 638 km <sup>3</sup> N/h)	Filtro de mangas (99,85%, 610 km <sup>3</sup> N/h)	P. Electrostático (99,85%, 617 km <sup>3</sup> N/h)	Ministerio de Energía 2018 <sup>6</sup>
<i>Sistema de control de emisiones SO<sub>2</sub></i>	FGD seco (91,0%, 610 km <sup>3</sup> N/h)	FGD seco (91,0%, 610 km <sup>3</sup> N/h)	FGD húmedo (90,5%*, 618 km <sup>3</sup> N/h)	FGD seco (87,5%, 610 km <sup>3</sup> N/h)	FGD húmedo (90,5%***, 572 km <sup>3</sup> N/h)	Ministerio de Energía 2018
<i>Sistema de control de emisiones NO<sub>x</sub></i>	SCR (89,91%, 610 km <sup>3</sup> N/h)	-	Quemadores Low NO <sub>x</sub> (30%**)	SCR (83%, 567 km <sup>3</sup> N/h)	SCR (83,30%, 463 km <sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup>N 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.

<sup>4</sup> El informe de cambio de mínimo técnico a 38 MW se encuentra en etapa de consulta con los Coordinados hasta el 28 de noviembre.

<sup>5</sup> Over Fire Air (OFA).

<sup>6</sup> 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.

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

Tabla 2

Especificaciones generales de la caldera de la Unidad 2 de central Guacolda.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Type of boiler</b>	<b>Mitsubishi water tube boiler Natural circulation type</b>	
<b>Steam flow</b>		
<b>Maximum continuous rating</b>	Main steam	440.000 kg/hr
<b>Steam Pressure</b>		
<b>Design pressure</b>	Boiler	188 bar. a
	Reheater	53 bar. a
<b>Operating pressure at MCR-B</b>	Super heater outlet	165,0 bar. a
	Reheater inlet	36,7 bar. a
	Reheater outlet	34,2 bar. a
<b>Steam temperature at MCR-B</b>	Super heater outlet	540 °C
	Reheater inlet	330 °C
	Reheater outlet	540 °C
<b>Feed water temp. at MCR-B</b>	Economizer inlet	243 °C
	Spray attemperator inlet	160 °C
<b>Firing system</b>	Circular corner firing (exclusive firing and combination firing of HFO and coal)	
<b>Steam temperature control system</b>	Main steam	Water spray
	Reheat steam	Burner tilting and gas recirculation

La especificación general de los pulverizadores se sintetiza en la Tabla 3. El *turndown ratio*<sup>7</sup> de los molinos es 2:1, lo que equivale a una capacidad mínima de 50%<sup>8, 9</sup>.

Tabla 3

Especificaciones generales de los pulverizadores instalados en la Unidad 2 de central Guacolda.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Type</b>	<b>Mitsubishi vertical mill (MVM21F)</b>
<b>Number</b>	Four (4) sets
<b>Capacity per mill (wet base)</b>	
<b>Maximum</b>	25.800 kg/h (at pecket coal (ref.))
<b>Raw coal size</b>	Max. 50 mm
<b>Pulverized coal fines</b>	200 mesh pass 65%
<b>Mill turn down ratio</b>	2:1
<b>Primary air temperature at mill outlet</b>	66 °C (at pecket coal (ref.))

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

<sup>7</sup> Razón entre carga máxima y carga mínima.

<sup>8</sup> Document NO. G1-11.02-MN0012, REV NO. 0

<sup>9</sup> Se sugiere validar el valor con Guacolda y MHI.

Tabla 4

Especificaciones generales de los quemadores de la Unidad 2 de central Guacolda.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Tipo</b>	<b>Quemador de encendido angular Mitsubishi</b>
<b>Número</b>	4 sets de 4 quemadores cada uno
<b>Combustible</b>	Petróleo, carbón pulverizado
<b>Accesorios</b>	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
<b>Capacidad por quemador (carbón)</b>	6500 kg/h
<b>Capacidad por quemador (petróleo)</b>	2950 kg/h
<b>Presión del vapor a chorro en el quemador</b>	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 2 de central Guacolda.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Tipo</b>	<b>Calentamiento simple dos cilindros en línea combinado con un condensador tipo doble flujo</b>
<b>Capacidad</b>	150 MW
<b>Velocidad</b>	3000 rpm
<b>Condiciones de diseño para el vapor</b>	
<b>Presión de entrada (entrada MSV)</b>	160 bar abs
<b>Temperatura de la entrada (entrada MSV)</b>	537 °C
<b>Temperatura de recalentado (entrada MSV)</b>	537,8 °C
<b>Presión de salida (parte superior del condensador)</b>	723 mmHg
<b>Expansión de la carcasa en operación nominal</b>	22,6 mm

## 3 Definición de objetivo de flexibilización de Unidad 2 de Central Guacolda

En este capítulo se presenta una hoja de ruta para una mayor flexibilización - confiable - de Central Guacolda, particularmente de la Unidad 2 (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 Generadoras<sup>10</sup> 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.

---

<sup>10</sup> 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.

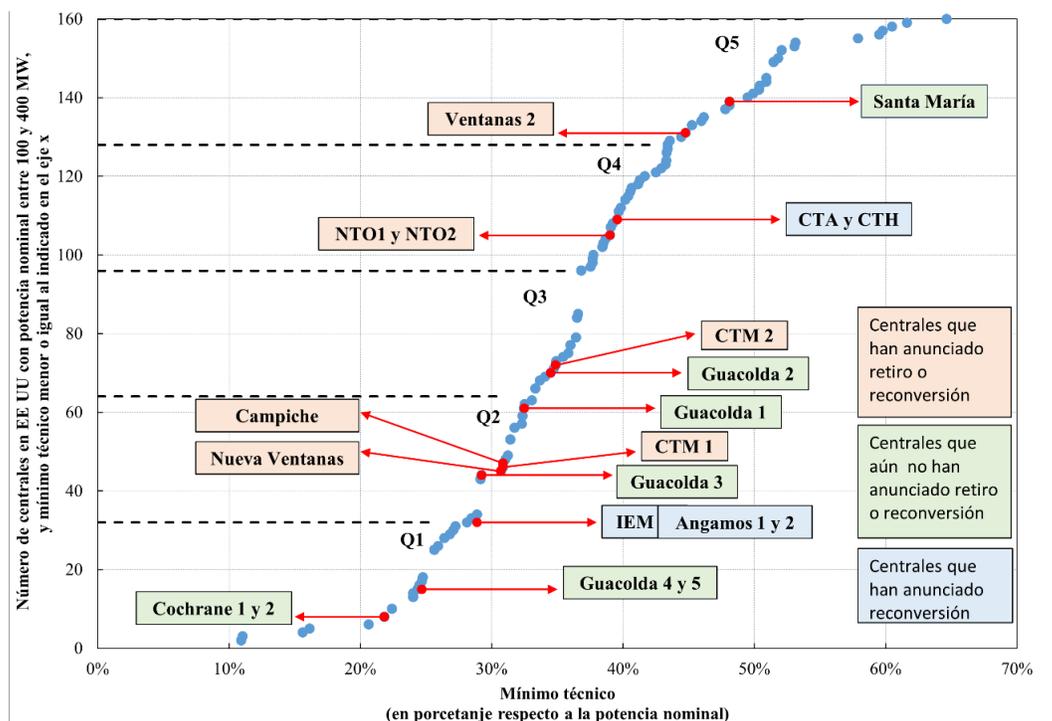
El objetivo de reducción de emisiones; la necesidad de aumentar la flexibilidad del sistema; y el requerimiento de facilitar una operación más económica del sistema producen una presión por una mayor flexibilización de las unidades termoeléctricas e hidroeléctricas. En el contexto de este trabajo, se abordó la flexibilización mediante la evaluación de una mayor reducción del mínimo técnico de la Unidad 2 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 nominal.

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.

Figura 2  
 Benchmark de mínimo técnico en unidades a carbón entre 100 y 400 MW en EEUU y Chile<sup>11</sup>.  
 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 noviembre de 2022 para las distintas unidades de Guacolda<sup>12</sup>, 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 layup, y objetivos de mantener operación confiable perdurable en el tiempo.

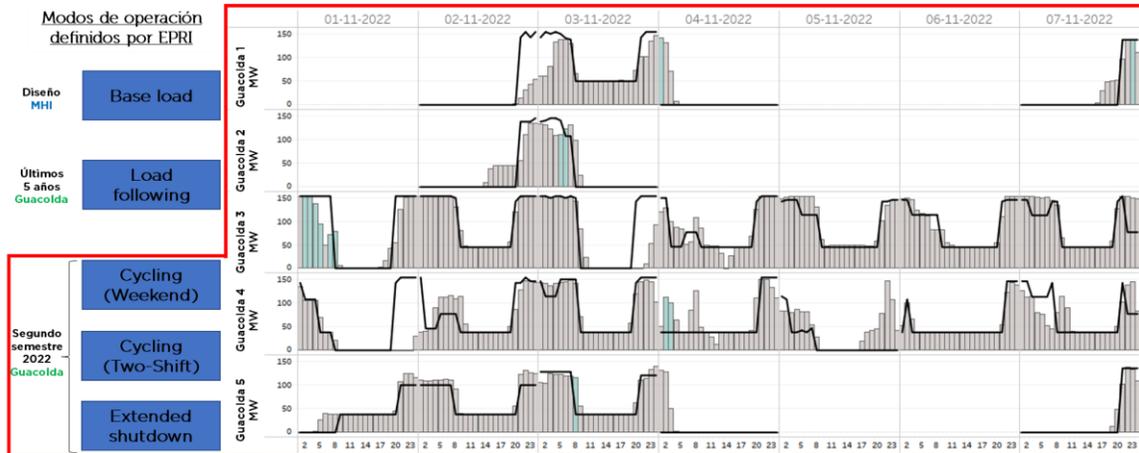
<sup>11</sup> El informe de cambio de mínimo técnico a 38 MW en la Unidad 2 se encuentra en etapa de consulta con los Coordinados hasta el 28 de noviembre.

<sup>12</sup> En línea operación programada, en barra generación efectiva.

Figura 3

Nuevos modos de operación que ha presentado Guacolda en noviembre 2022 (partidas y paradas frecuentes, con distintos periodos de detención).

Fuente: Elaboración propia.

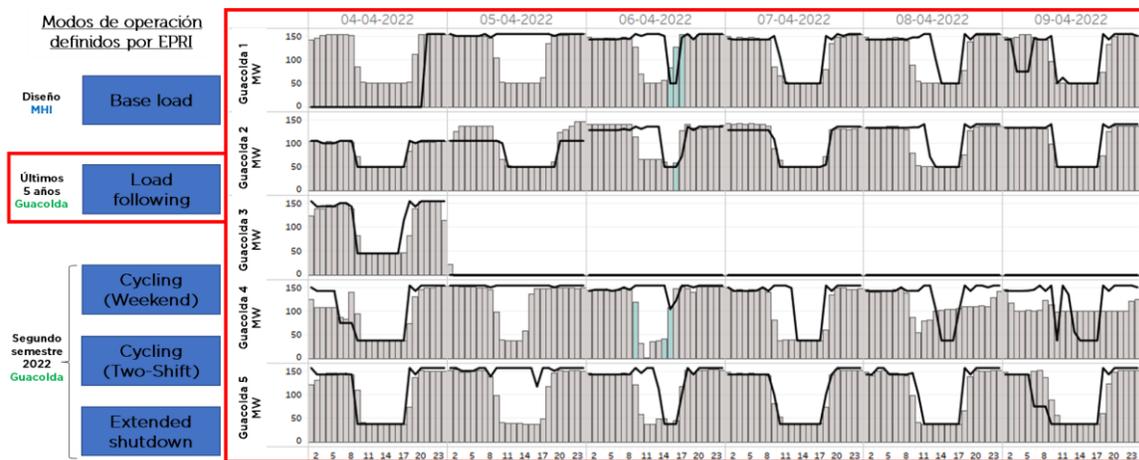


En la Figura 4 se observa el modo de operación de seguimiento de demanda neta, donde las unidades operan entre potencia nominal y mínimo técnico. Dicho modo de operación también enfrenta desafíos desde el punto de vista de ajuste de prácticas de mantenimiento y monitoreo de diversas condiciones para 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 2022 (seguimiento de demanda neta).

Fuente: Elaboración propia.



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.

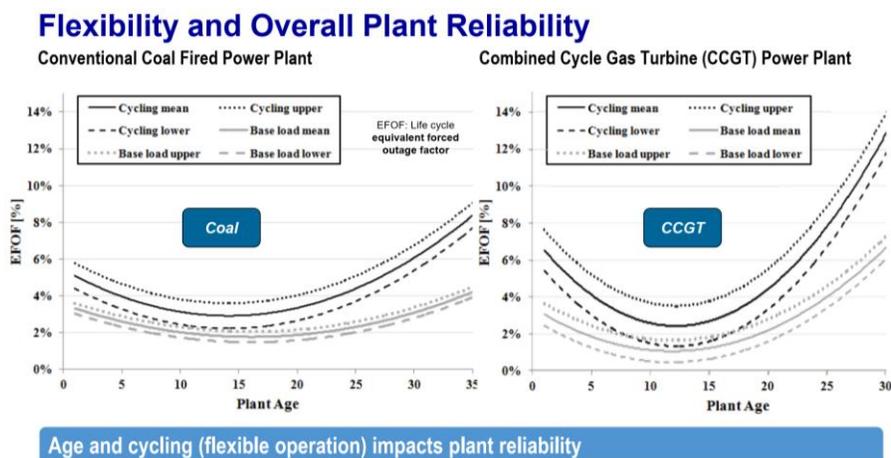
### Respecto del impacto de ciclaje persistente en unidades a carbón y ciclos combinados

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.

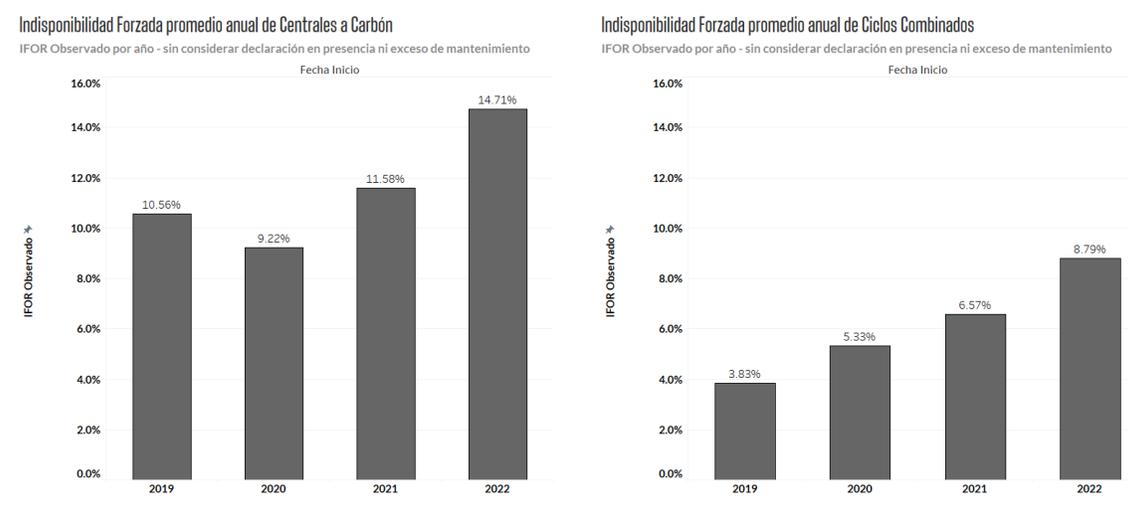


Los efectos acumulativos de desgaste producen indisponibilidades y mantenencias no planificadas que pueden ser de alto costo no solo para los operadores de las unidades, sino también para quienes realizan retiros de energía en el sistema.

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 combinado<sup>13</sup>. En casos particulares, se pueden producir fallas de baja probabilidad que pueden producir un impacto importante<sup>14, 15</sup>.

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 IFOR<sup>16</sup> de unidades térmicas en Chile desde el año 2019. Centrales a carbón (imagen izquierda) y de ciclo combinado (imagen derecha).  
Fuente: Elaboración propia.



<sup>13</sup> “Risk-based assessment of unplanned outage events and costs for combined-cycle plants”, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013. ASME.

<sup>14</sup> “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>

<sup>15</sup> “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](https://madison.com/wsj/business/alliant-energys-riverside-power-plant-near-beloit-needs-25-million-in-repairs/article_3fa6a2b3-025c-5427-b57e-0b75adf7d175.html)

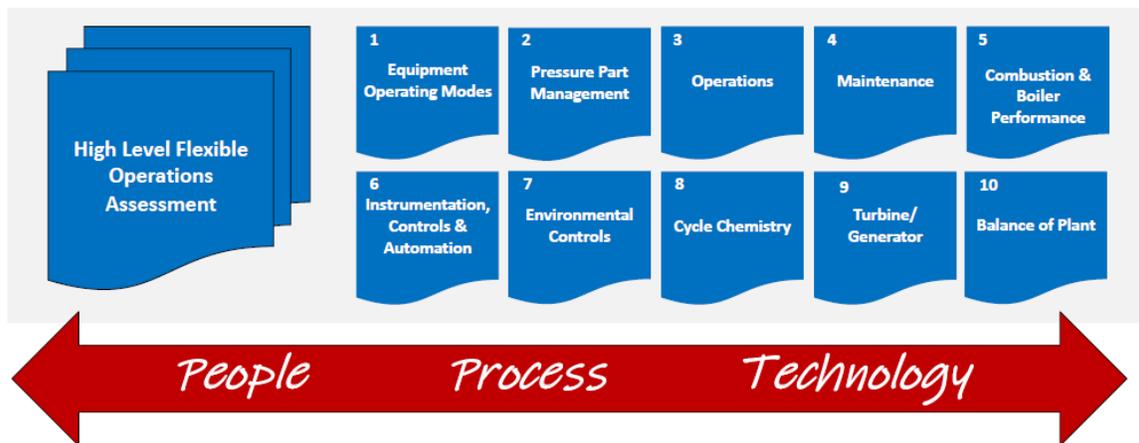
<sup>16</sup> Promedio simple de IFOR de las unidades.

### 3.4 Brechas y factores limitantes a una mayor flexibilización de la Unidad 2 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.

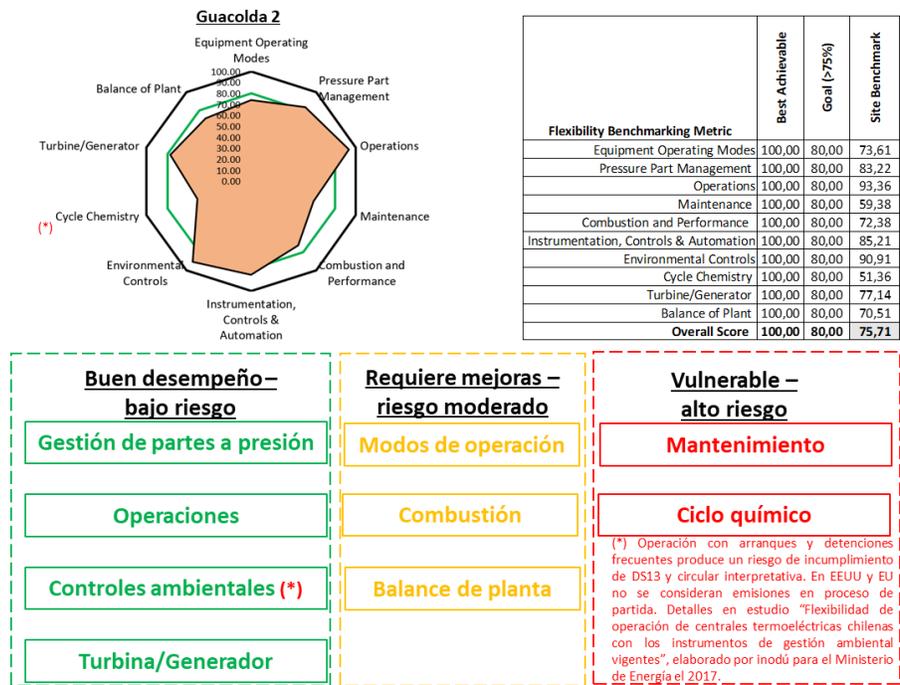
En conjunto con el equipo de Guacolda se analizaron más de 600 aspectos orientados a entender, bajo las nuevas exigencias de operación a las cuáles se ha visto sujeta la planta, no sólo los distintos sistemas y subsistemas, sino también los procesos asociados a la operación y mantenimiento que ejecutan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



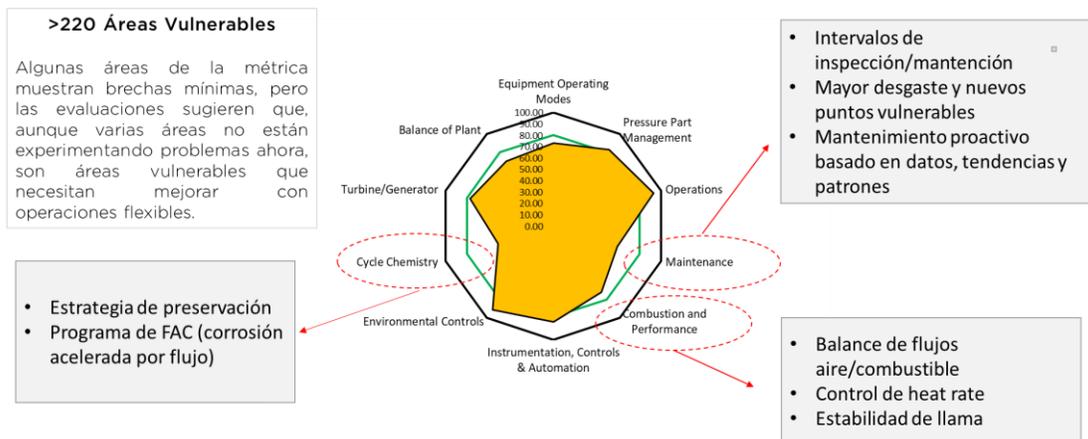
En términos generales, el proceso de benchmark de Guacolda 2 indica que, bajo los nuevos modos de operación flexible de la unidad, ilustrados en la Sección 3.3, es necesario poner atención en áreas o subsistemas que podrían verse fuertemente afectadas, producto de un cambio en el régimen de operación de una unidad que fue diseñada para operar en carga base. Si bien, las unidades han sido adaptadas 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 2  
 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 2  
 Fuente: Elaboración propia

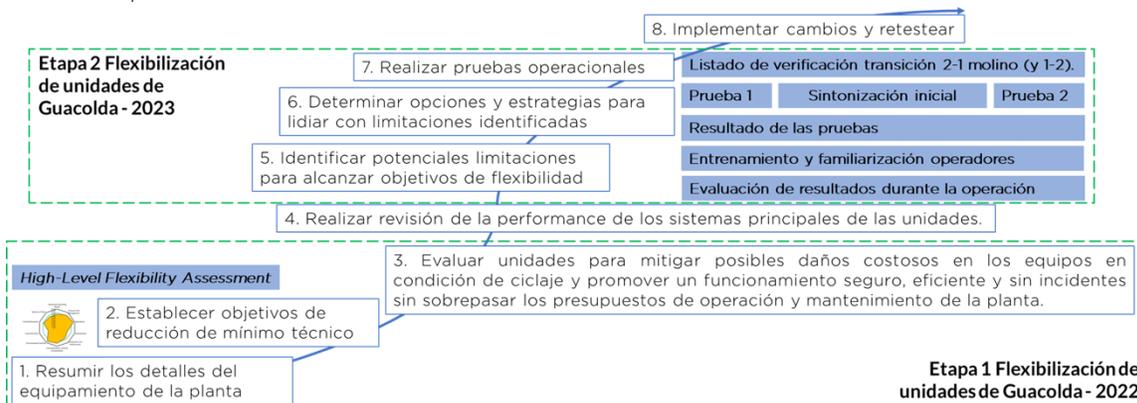


### 3.5 Hoja de ruta para objetivos de reducción de mínimo técnico de Guacolda 2

Teniendo como referencia el contexto regulatorio vigente y las necesidades levantadas, se ha trabajado en buscar alternativas para reducir el mínimo técnico de Guacolda 2. 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 2 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 2 de Guacolda opera a un mínimo técnico de 50 MW (34%), 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.

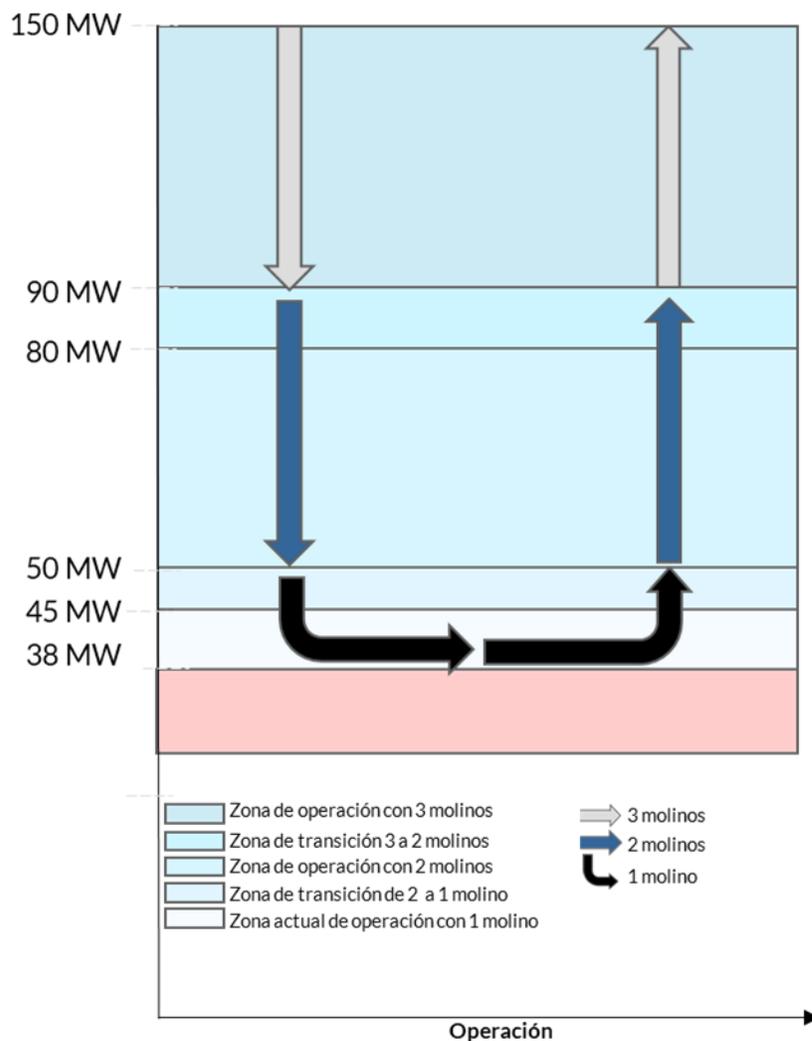
Desde el punto de vista operacional, la operación con un molino refleja una condición de mayor riesgo para la unidad en el sentido que una falla en algunos componentes puede llevar a la desconexión de la unidad del sistema. No obstante, por tratarse de operación a mínimo técnico reducido, dicha situación 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 2 a mínimo técnico reducido con un molino

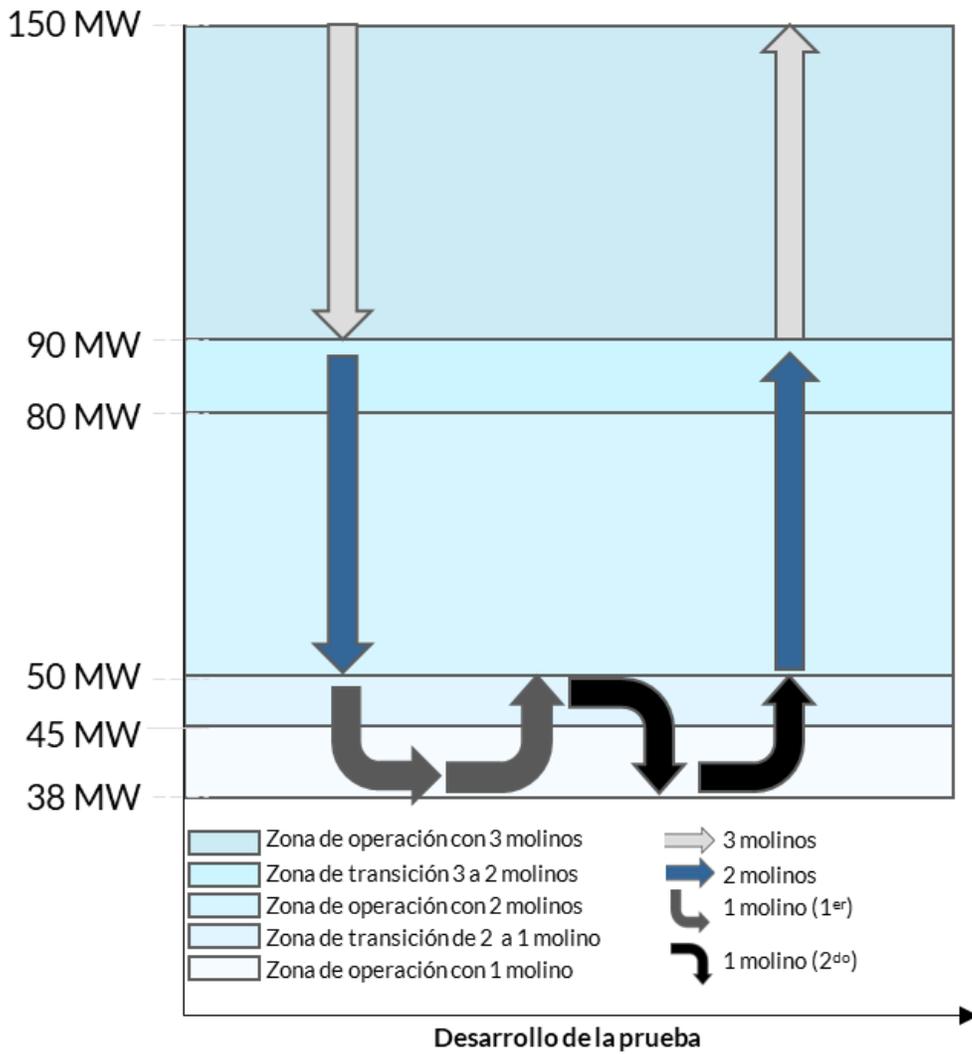
En la Tabla 6 se presenta el plan de pruebas propuesto para la Unidad 2.

Tabla 6  
Plan de pruebas propuesto para Guacolda 2.  
Fuente: Elaboración propia.

#	Actividad	Descripción
1	Operación a capacidad nominal	Operar a potencia nominal durante la madrugada. Se deberá 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 (50 MW) 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 2.  
 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 2 de Central Guacolda, entre mayo y noviembre de 2023, se han realizado distintos trabajos de pruebas, monitoreo, ajustes y sintonización<sup>17</sup> en la Unidad 2 de Central Guacolda.

En este Capítulo se sintetiza el resultado de la última prueba realizada el 8 de noviembre, 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 8 de noviembre de 2023, 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).

---

<sup>17</sup> 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<sub>x</sub>, y SO<sub>2</sub>.
- 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 a las pruebas en la Unidad 2, se utilizaron los siguientes documentos de la Unidad 1 considerando que son unidades similares:

- Vertical mill (MVM21F) Instruction manual. Document G1-11.02-MN0012, REV NO. 0.
- Manual de mantenimiento de la turbina de Guacolda 1, IWE-93040-11D.
- Data sheet of boiler feed water pump. Document G1-11.07-MH0001, REV. C.
- Heat balance diagram, DWG NO. N20-210. Document G1-11.05-MN007, REV. 0
- Manual de instrucciones para caldera. Document G1-11.02-MH0051. REV. 0.

Como referencia a las pruebas en la Unidad 2, se utilizaron los siguientes documentos de los proveedores de los equipos:

- Heat balance diagram, DWG NO. N20-210. Document G2-11.05-MN007, REV. 0
- Instruction manual of boiler. Document G2-11.02-MH0051. REV. 0.

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

A continuación, se analiza la prueba del 8 de noviembre de 2023, posterior a una sintonización de la Unidad 2 de Central Guacolda. Las nuevas lógicas de control se encuentran implementadas en el sistema de control; se opera en forma semi-automática<sup>18</sup>.

### 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 2 durante la prueba:

- La unidad se encuentra con la lógica de control de combustión actualizada; ajustada para condiciones evaluadas en operación a mínimo técnico con 1 molino. 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 en servicio.
- El sistema de atemperación tiene configurada una lógica de control para la protección de los bancos de tubos del sobre calentador (esta lógica fue implementada por Guacolda).
- El ajuste de inclinación de quemadores se puede realizar en modo manual, pero el ajuste real es limitado.

---

<sup>18</sup> Transición de operación entre 2 y 1 molino y 1 y 2 molinos se realiza de manera manual. Inyección transitoria de diésel en periodos de transición se realiza de manera manual.

## 4.2.2 Cronología de la prueba

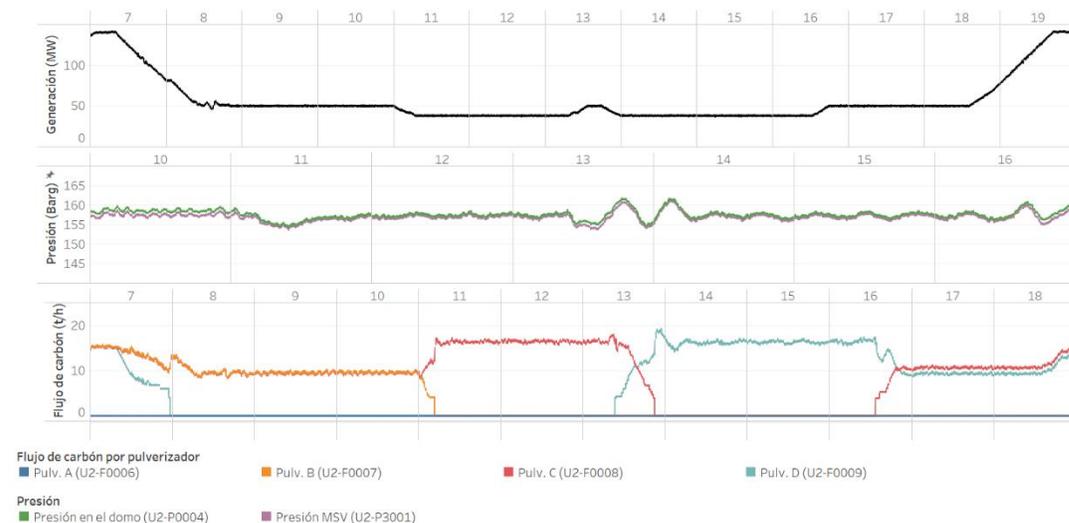
La cronología programada para la prueba se sintetiza en la siguiente tabla. Durante el desarrollo de la prueba se produjeron algunos cambios, no relevantes, en la cronología programada.

Tabla 7  
Cronología de la prueba de 08-11-2023  
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 (50 MW) con molino B y C.
4	09:30	11:30	Operación en mínimo técnico actual (50 MW) con molinos B y C.
5	11:30	12:00	Reducción de carga a mínimo técnico objetivo con 1 molino (C).
6	12:00	14:00	Operación estable en mínimo técnico con 1 molino (C).
7	14:00	14:30	Rotación de molino (C a D).
8	14:30	16:30	Operación estable en mínimo técnico con 1 molino (D)
10	16:30	-	Aumento de carga según exigencias del CEN.
11	16:30		Término de la prueba.

La Figura 13 sintetiza el desarrollo de la prueba. Se presenta la generación de la Unidad 2 (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 08-11-2023; generación (imagen superior), presión en el domo y presión de vapor principal (imagen central), y flujo de carbón en los 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 7:20 am, la operación con tres molinos (B, C y D) a potencia nominal. Luego se observa la reducción de generación hasta mínimo técnico con dos molinos (el molino D sale de servicio y los molinos B y C se mantienen en operación). Posteriormente, se tiene el primer periodo de operación a mínimo técnico con 1 molino (molino C), donde este incrementa su carga y sale de operación el molino D. Finalmente, se realiza un aumento de generación para realizar el cambio de molino (el molino C sale de servicio y entra el molino D), para posteriormente volver a reducir la generación sólo con el molino D.

Durante las transiciones se debe 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  $\pm 4$  barg respecto del set point<sup>19</sup>. 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 se utiliza combustible auxiliar diésel como medida de seguridad para asegurar combustión en el quemador que entra en servicio.

### 4.2.3 Factores observados durante la prueba

Se monitoreó y evaluó la estabilidad de la operación de la Unidad 2 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.

---

<sup>19</sup> 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 (información en Anexo 4, sección 6.4). La mezcla utilizada ese día corresponde 55% de Alta Ceniza y 45% 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 2 durante la prueba

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de operación		Operación con 2 molinos a 50 MW		Operación con un molino a 38 MW	Operación con un molino a 38 MW
Hora de muestreo		09:26-09:40	09:41-09:50	12:04-12:13	15:06-15:19
Malla	unidad	Molino 2B	Molino 2 C	Molino 2 C	Molino 2 D
Malla 50	% retenido	0	0,35	0,55	0,15
Malla 100	% retenido	2,5	2,5	5,25	3,65
Malla 140	% retenido	7,65	5,6	9,2	8,5
Malla 200	% retenido	13,7	11,9	15,15	14,5
Fondo 200	% a través	76,15	79,65	69,85	73,2

Al cambiar la forma de operar de dos molinos a un molino, el flujo de carbón hacia el pulverizador en servicio aumentó hasta un 65% (de 10 a 16,4 ton/hora en promedio).

EPRI y MHI<sup>20</sup> recomiendan que el fondo en malla de 200 debe ser mínimo 70%. Durante la prueba se observó:

- La muestra de carbón molido tomada del molino C entre las 12:04 y las 12:13 está 0,15% bajo el estándar recomendado.
- El cambio de operación de 2 a 1 molino reduce el desempeño de la molienda del pulverizador C.
- La muestra de carbón molido tomada del molino D entre las 15:06 y las 15:19 está 3,2% sobre el estándar recomendado. La muestra de carbón molido tomada del molino D cumple con el estándar.
- El cambio de operación de 2 a 1 molino genera en el pulverizador D un peor desempeño de la molienda.

## B Respecto de la combustión

A continuación, se analizan distintos aspectos relacionados al proceso de combustión de la Unidad 2.

<sup>20</sup> Vertical mill (MVM21F) instruction manual. Document NO. G1-11.02-MN0012, REV NO. 0

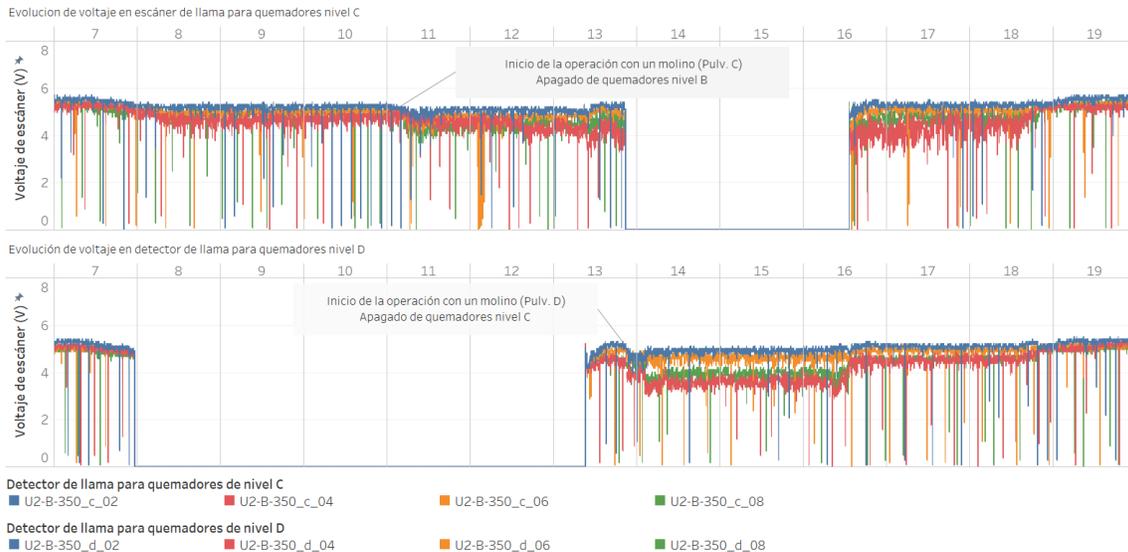
## 1 Detección de llama en operación a baja carga

La Unidad 2 tiene instalado un sistema de detección de llama infrarrojo de MHI. El voltaje del detector de llama en los quemadores del nivel C y D, 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 C y D 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 estable<sup>21</sup>. Al respecto, se identificó lo siguiente:

- Durante el funcionamiento del molino C se observó una detección de llama estable. Entre las 11:30 y las 13:00, se observan valores de voltaje en detector de llama entre 3,6 y 5,2 V. Además, se identifica diferencias en las mediciones de voltaje entre los 4 quemadores del molino C.
- Durante el funcionamiento del molino D se observó una detección de llama estable. Entre las 14:30 y las 16:00, se observan valores de voltaje en detector de llama entre 3,1 y 5 V. En comparación con la medición en el molino C, se identificó una mayor diferencia entre las mediciones de voltaje en los 4 quemadores del molino D. Se destaca una separación entre la señal de dos escáneres (U2-B-350\_d\_02 y U2-B-350\_d\_06) respecto a los restantes (U2-B-350\_d\_04 y U2-B-350\_d\_08).

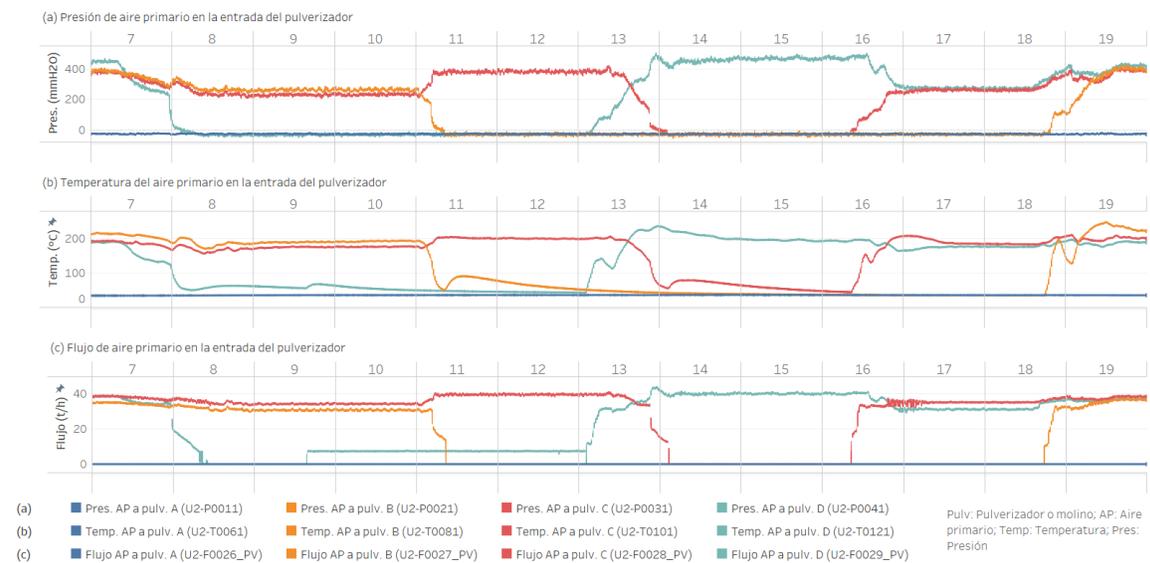
Si bien la diferencia entre grupos de escáner no es un tema que deba ser atendido con urgencia, las diferencias identificadas durante el funcionamiento del molino D deben ser revisadas por Guacolda.

<sup>21</sup> Durante la prueba del día 08-11-2023 no se realiza inspección visual en terreno de la estabilidad de llama.

## 2 Condiciones observadas en aire primario

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

Figura 15  
Presión, Temperatura y Flujo de aire primario a los quemadores durante la prueba  
Fuente: Elaboración propia.



Se identificó lo siguiente:

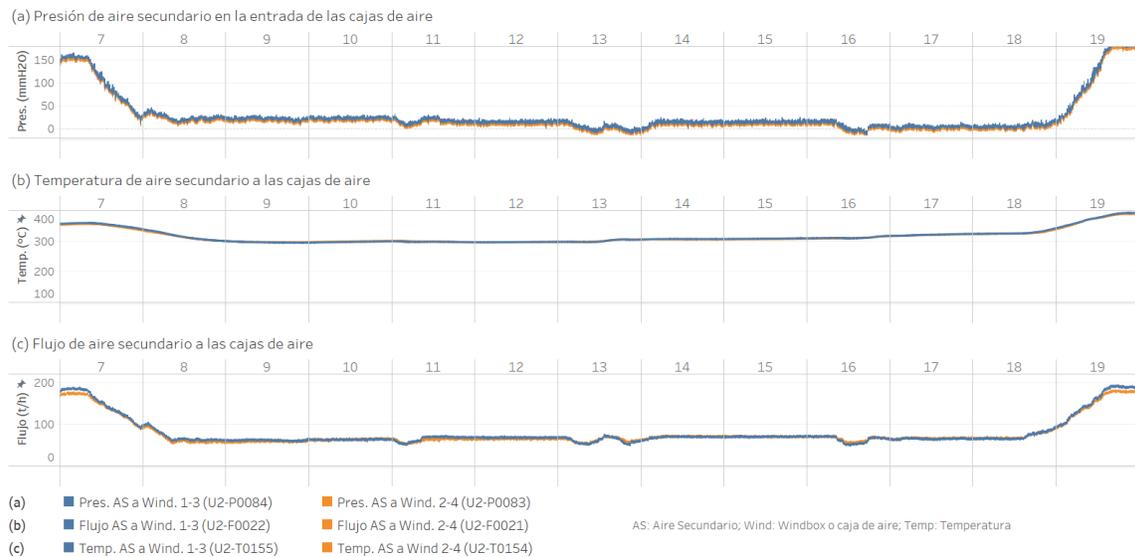
- Durante el funcionamiento del molino C, entre las 11:30 y las 13:00, la temperatura de entrada del aire primario al pulverizador fue en promedio 200 °C. El balance MHI define una temperatura de entrada del aire primario a los pulverizadores de 212°C<sup>22</sup>.
- Durante el funcionamiento del molino D, entre las 14:30 y las 16:00, la temperatura de entrada del aire primario al pulverizador fue en promedio 198°C. El balance MHI define una temperatura de entrada del aire primario a los pulverizadores de 212°C.
- Durante el funcionamiento del molino C, entre las 11:30 y las 13:00, se observó una situación no estándar donde se mantuvo un flujo de aire primario a través del pulverizador D en torno a 7,3 ton/ hora. Si bien dicha condición debe ser revisada a futuro, no compromete la operación estable de la unidad.

<sup>22</sup> Instruction manual of boiler. Document NO. G2-11.02-MH0051. REV. 0.

### 3 Condiciones observadas en aire secundario

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

Figura 16  
Presión, Temperatura y Flujo de aire secundario a las cajas de aire durante la prueba.  
Fuente: Elaboración propia.



Se identificó lo siguiente:

- Al operar con el molino C, entre las 11:30 y las 13:00, la presión positiva de las cajas fue en promedio 14 mmH<sub>2</sub>O.
- Al operar con el molino D, entre las 14:30 y las 16:00, la presión positiva de las cajas fue en promedio 13 mmH<sub>2</sub>O.
- Al operar con el molino C a las 13:00 la temperatura alcanzada fue de 297 °C. Por otro lado, al operar con el molino D a las 16:00 la temperatura alcanzada fue de 308 °C. El balance MHI define que el aire secundario sale del calentador regenerativo hacia las cajas de aire con una temperatura de 254 °C<sup>23</sup>.
- Durante la rotación de molinos entre las 13:10 y 14:15 (C al D), se observa presión negativa en las cajas para el periodo de tiempo. Estudios previos recomiendan no operar con presión negativa en las cajas de aire.

<sup>23</sup> Instruction manual of boiler. Document NO. G2-11.02-MH0051. REV. 0.

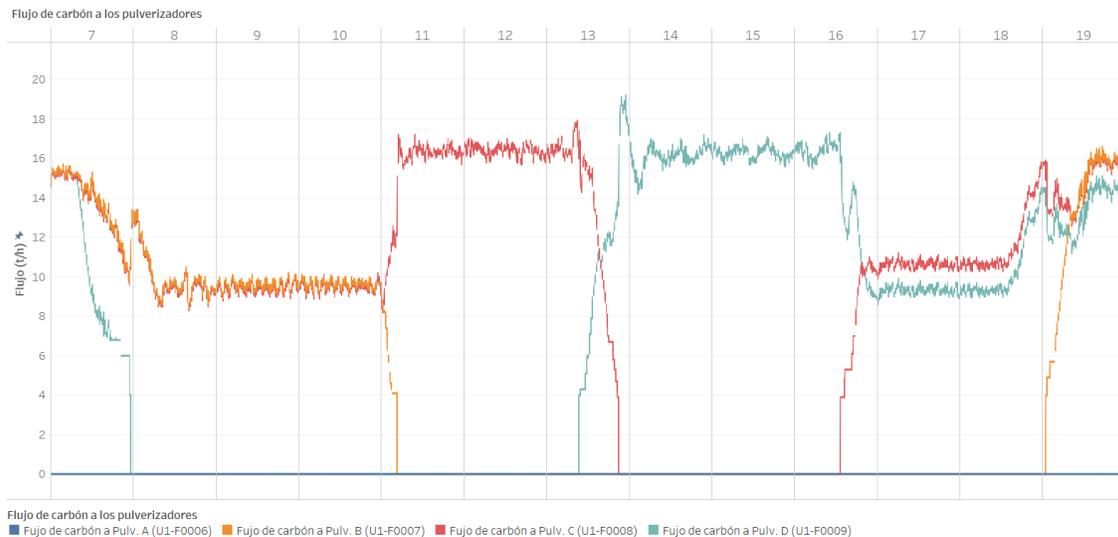
## 4 Operación de los pulverizadores

El manual de operación de la caldera de Guacolda 2 indica que los molinos instalados tienen las siguientes características<sup>24</sup>:

- Capacidad máxima de diseño de 25,8 toneladas/hora<sup>25</sup>.
- *Turndown ratio* 2:1 o carga mínima del pulverizador 50%<sup>25</sup>

Los resultados del flujo de carbón, en toneladas/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:

- En la operación en mínimo técnico actual con 2 molinos (50 MW con molino B y C) se tiene un flujo de carbón cercano a las 10 ton/hora en cada molino, lo que equivale a un 38,7% del valor de diseño, que está bajo el nivel de carga mínima indicado por MHI.
- Al operar con 1 molino en 38 MW, se alcanzan valores de flujo de carbón cercanos a las 16 ton/hora tanto en el molino C como en el molino D, lo que equivale a 62% del valor de diseño.
- Si bien en la operación con 1 molino los pulverizadores quedan operando sobre la carga mínima permitida, como se verá más adelante en este reporte, se identifican otros factores limitantes que restringen la reducción de carga en los pulverizadores. El uso de carbón de menor poder calorífico no es una solución debido a los factores limitantes que se indican

<sup>24</sup> Molino vertical MVM21F de MHI.

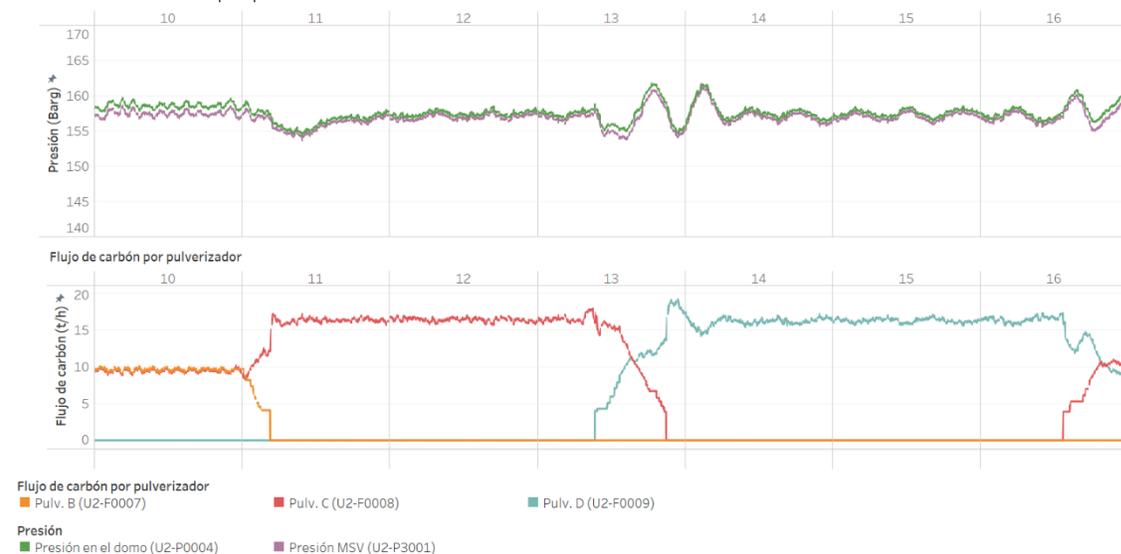
<sup>25</sup> Document NO. G1-11.02-MN0012, REV NO. 0

más adelante en este reporte. En particular, el uso de carbón con esa característica no contribuye a mejorar las condiciones del vapor (presión y temperatura) observadas en la turbina.

## 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 8 de noviembre.  
Fuente: Elaboración propia.



Se identificó lo siguiente para el periodo de transición:

- La desconexión de un molino (molino B - 11:11 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 (entre 50 y 45 MW).
- La conexión del molino que entra de operación (molino D - 13:23 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  $\pm 4$  barg respecto del set point<sup>26</sup>. 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.

## C Condiciones de presión y temperatura del vapor

Se analizó las condiciones de presión y temperatura en la caldera y la turbina. Para realizar una comparación objetiva se utilizó documentación MHI para cada sistema.

En general, se observó un comportamiento anormal del sistema de atemperación, lo que no permite un óptimo control de la temperatura del vapor en esta nueva condición de operación (mínimo técnico reducido). El desvío de las temperaturas del vapor en la turbina requiere de un análisis particular<sup>27</sup>.

### 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. La Figura 19 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.

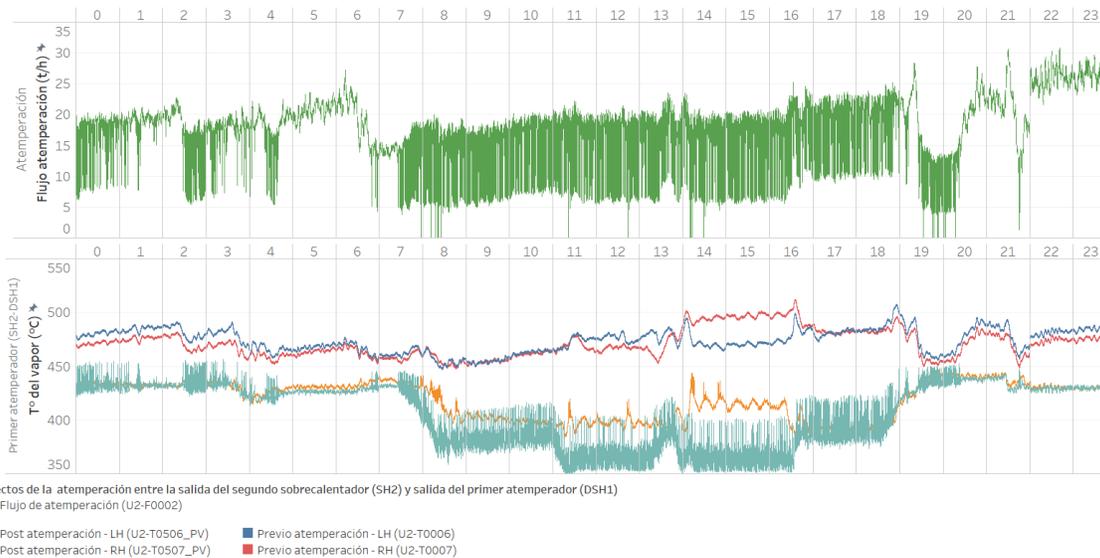
---

Figura 19  
Efectos de la atemperación entre la salida del segundo sobrecalentador (SH2) y salida del primer atemperador (DSH1) durante la prueba del 08-11-2023.  
Fuente: Elaboración propia.

---

<sup>26</sup> Un aspecto por evaluar a futuro tiene relación a 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.

<sup>27</sup> No es parte del alcance de esta evaluación realizar dicho análisis.



El análisis del efecto de la atemperación ilustrado en la Figura 19, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

### Operación con el molino C (11:30 a 13:00 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 19, para una medición puntual en operación con el molino C, 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 C.

Fuente: Elaboración propia.

Hora	Fuente	T° en salida de sobrecalentador 2	T° posterior a atemperador 1
13:00	Medición en línea izquierda de vapor	474,7°C (curva azul)	361,6 °C (curva turquesa) <sup>28</sup>
	Medición en línea derecha de vapor	466,9°C (curva roja)	398,3 °C (curva naranja)
	Balance MHI	433°C	412°C

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Entre las 11:30 y las 13:00, se observa la operación de la atemperación con un flujo variable (sensor F0002 - curva verde).
- Se registra una reducción de la temperatura del vapor en la línea izquierda que sale del segundo sobrecalentador. Lo anterior se puede apreciar al comparar la curva azul (anterior al atemperador) con la curva turquesa (posterior al atemperador)<sup>29</sup>.

<sup>28</sup> Valor promedio.

<sup>29</sup> La atemperación de la Unidad 2 tiene un comportamiento anormal, el cual se ve acentuado en operación a bajas cargas. Guacolda indica que con ajustes y mantenimiento del sistema de atemperación se puede normalizar la condición del vapor.

- Se sugiere revisar la banda de control de la temperatura del vapor en el sistema de atemperación (ver efectos en temperatura de vapor post atemperación LH, curva calipso).
- Durante el funcionamiento del molino C a las 13:00, se observa que la temperatura de salida del segundo sobrecalentador presenta una diferencia de 7,8 °C promedio (lado izquierdo más caliente).

### Operación con el molino D (14:30 a 16:00 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la gráfica inferior de la Figura 19, para una medición puntual en operación con el molino D, 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
16:00	Medición en línea izquierda de vapor	471,4 °C (curva azul)	365,2°C (curva turquesa)
	Medición en línea derecha de vapor	496,3 °C (curva roja)	413,4°C promedio (curva naranja)
	Balance MHI	433°C	412°C

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

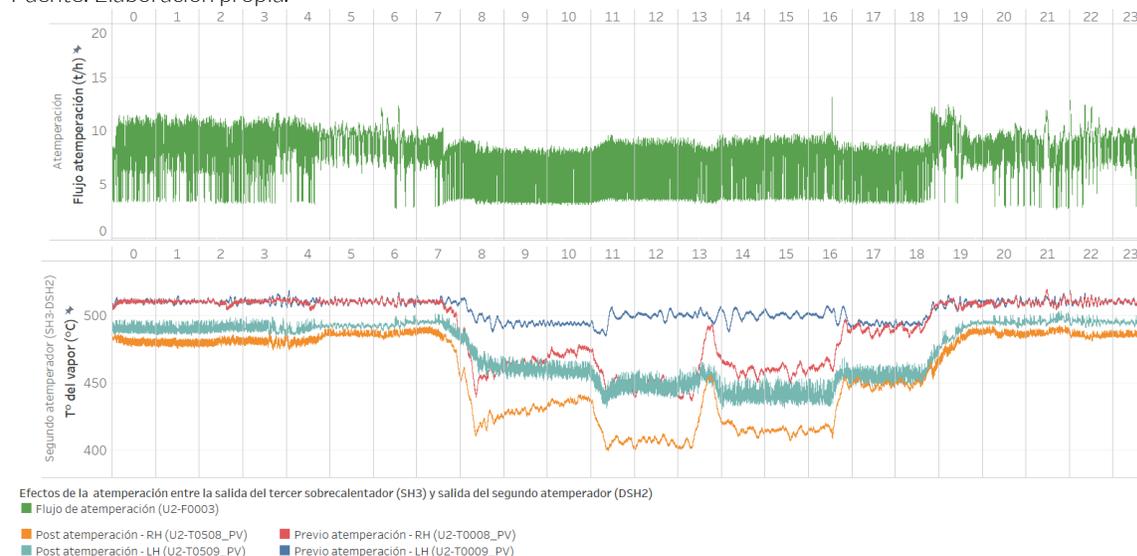
- Entre las 14:30 y las 16:00, se observa la operación de la atemperación con un flujo variable (sensor F0002 - curva verde).
- Se registra una reducción de la temperatura del vapor en la línea izquierda que sale del segundo sobrecalentador. Lo anterior se puede apreciar al comparar la curva azul (anterior al atemperador) con la curva turquesa (posterior al atemperador).
- Se sugiere revisar la banda de control del sistema de atemperación (ver efectos en temperatura de vapor post atemperación LH, curva calipso).
- Durante el funcionamiento del molino D a las 16:00, se observa que la temperatura de salida del segundo sobrecalentador presenta una diferencia de 25 °C promedio (lado izquierdo más caliente).

## 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.

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. El atemperador aplica agua para reducir la temperatura del vapor (curva azul y roja) y producir vapor atemperado (curva turquesa y naranja).

Figura 20  
Efectos de la atemperación entre la salida del tercer sobrecalentador (SH3) y salida del segundo atemperador (DSH2) durante las pruebas del 08-11-2023.  
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 C (11:30 a 13:00 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 11  
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
13:00	Medición en línea izquierda de vapor	500 °C (curva azul)	447,6°C (curva turquesa) <sup>30</sup>
	Medición en línea derecha de vapor	440°C (curva roja)	402,5°C (curva naranja)
	Balance MHI	493 °C	493 °C

<sup>30</sup> Valor promedio.

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante el funcionamiento del molino C, entre las 11:30 y las 13:00, se observa la operación de la atemperación con un flujo variable (sensor F0003 - curva verde).
- Durante la operación del molino C se observa que la línea izquierda que sale del tercer sobrecalentador posee una temperatura mayor respecto a la línea derecha. Además, se observa que la línea de vapor izquierda manteniendo una T° de vapor en un nivel constante durante la operación con un molino.
- Se sugiere revisar la banda de control de la temperatura del vapor en el sistema de atemperación (ver efectos en temperatura de vapor post atemperación LH, curva calipso).

### Operación con el molino D (14:30 a 16:00 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 D, 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 D.

Fuente: Elaboración propia.

Hora	Fuente	T° en salida de sobrecalentador 3	T° posterior a atemperador 2
16:00	Medición en línea izquierda de vapor	501,3°C (curva azul)	441,2°C (curva turquesa) <sup>30</sup>
	Medición en línea derecha de vapor	459,2°C (curva roja)	413,9°C (curva naranja)
	Balance MHI	493°C	493°C

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante el funcionamiento del molino D, entre las 14:30 y las 16:00, se observa la operación de la atemperación con un flujo variable (sensor F0003 - curva verde).
- Durante la operación del molino D se observa que la línea izquierda que sale del tercer sobrecalentador posee una temperatura mayor respecto a la línea derecha. Además, se observa que la línea de vapor izquierda manteniendo una T° de vapor en un nivel constante durante la operación con un molino.
- Se sugiere revisar la banda de control del sistema de atemperación (ver efectos en temperatura de vapor post atemperación LH, curva calipso).

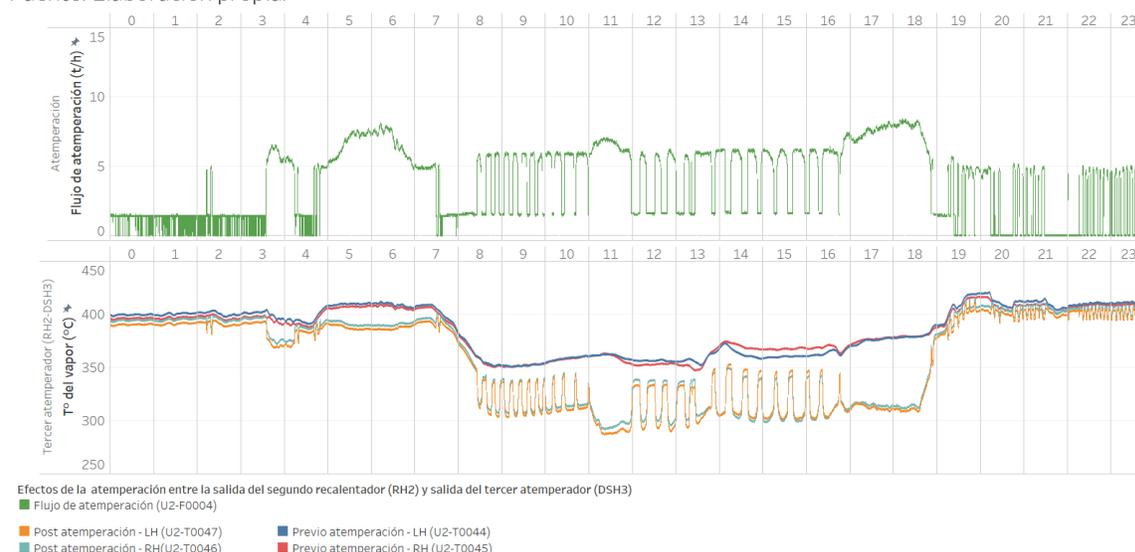
### **3** Condiciones de vapor a la entrada y salida del tercer atemperador

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 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. El atemperador aplica agua para reducir según control la temperatura del vapor a las líneas que vienen del segundo recalentador (curva azul y roja), y producir vapor atemperado (curva turquesa y naranja).

Figura 21  
Efectos de la atemperación entre la salida del segundo recalentador (RH3) y salida del tercer atemperador (DSH3) durante las pruebas del 08-11-2023.

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 C (11:30 a 13:00 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 13  
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
13:00	Medición en línea izquierda de vapor	355,6°C (curva azul)	302,2°C (curva turquesa)
	Medición en línea derecha de vapor	353,5°C (curva roja)	302,2°C (curva naranja)
	Balance MHI	342 °C	342 °C

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante el funcionamiento del molino C, entre las 11:30 y las 13:00, se observa la operación de la atemperación con un flujo pulsante (sensor F0004 - curva verde). Se sugiere a revisar el origen de este régimen pulsante en la operación de la atemperación.

#### Operación con el molino D (14:30 a 16:00 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 D, 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 D.

Fuente: Elaboración propia.

Hora	Fuente	T° en salida de recalentador 2	T° posterior a atemperador 3
16:00	Medición en línea izquierda de vapor	360,7 °C (curva azul)	337,4°C (curva turquesa)
	Medición en línea derecha de vapor	368,0 °C (curva roja)	344,3°C (curva naranja)
	Balance MHI	342°C	342°C

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Durante el funcionamiento del molino D, entre las 14:30 y las 16:00, se observa la operación de la atemperación con un flujo pulsante (sensor F0004 – curva verde). Se sugiere a revisar el origen de este régimen pulsante en la operación de la atemperación.

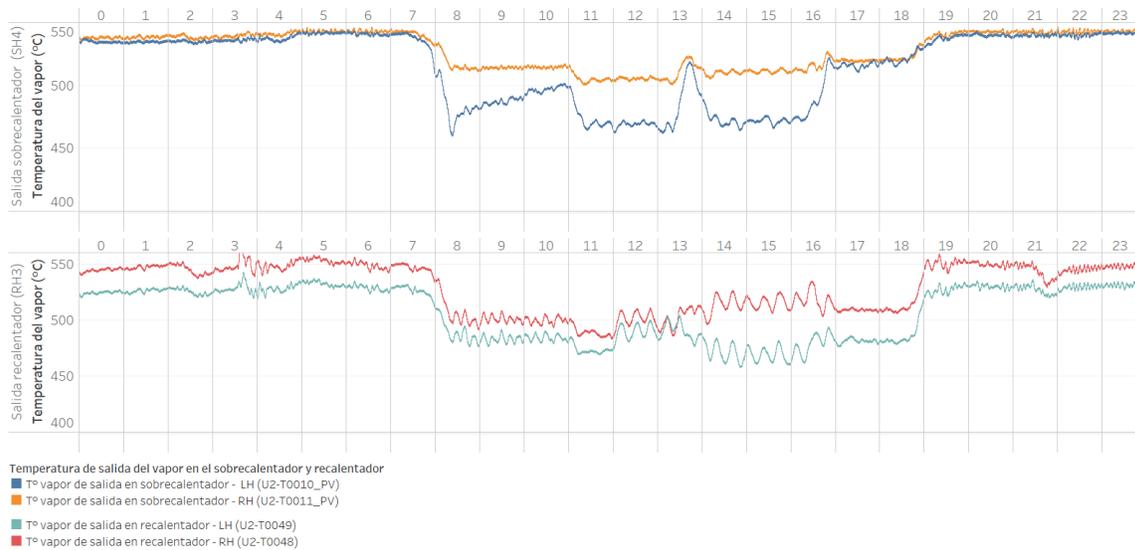
#### 4 Condiciones de vapor a la salida de la caldera

A continuación, se analiza la temperatura final de salida del vapor en el cuarto sobrecalentador y tercer recalentador. La Figura 22 muestra el comportamiento de la temperatura del vapor en la salida del cuarto sobrecalentador y tercer recalentador como función del tiempo.

Figura 22

Temperatura de salida del vapor del cuarto sobrecalentador y tercer recalentador Unidad 2 durante las pruebas del 08-11-2023.

Fuente: Elaboración propia.



El análisis de la temperatura del vapor ilustrada en la Figura 22, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

### Operación con el molino C (11:30 a 13:00 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la Figura 22, para una medición puntual en operación con el molino C, 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 C.

Fuente: Elaboración propia.

Hora	Fuente	T° en salida de sobrecalentador 4	T° en salida de recalentador 3
13:00	Medición en línea izquierda de vapor	467,5°C (curva azul)	483,7°C (curva turquesa)
	Medición en línea derecha de vapor	504,5°C (curva naranja)	490,3°C (curva roja)
	Balance MHI	520°C	480°C

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Entre las 11:30 y las 13:00 se observa una temperatura de salida del vapor en el cuarto sobrecalentador que se encuentra por debajo de los valores de referencia establecidos por el balance MHI.
- Entre las 11:30 y las 13:00 se observa una temperatura de salida del vapor tercer recalentador entre 3,7- 10,3 °C sobre los valores especificados en los balances de MHI.
- Se observa que la línea de vapor derecha (curva naranja) que sale del sobrecalentador posee una temperatura en torno a 30°C superior respecto a la línea izquierda (curva azul).

- Se observa que la operación en mínimo técnico con los molinos C-D entre las 17 y 18 h genera temperaturas similares en las dos líneas de salida del sobrecalentador. Esto no se observa en la operación a mínimo técnico con los molinos B-C entre las 9 y 10 h.

#### Operación con el molino D (14:30 a 16:00 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la Figura 22, para una medición puntual en operación con el molino D, 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 D.

Fuente: Elaboración propia.

Hora	Fuente	T° en salida de sobrecalentador 4	T° en salida de recalentador 3
16:00	Medición en línea izquierda de vapor	470,8 °C (curva azul)	461,6 °C (curva turquesa)
	Medición en línea derecha de vapor	509,9 °C (curva naranja)	508,6 °C (curva roja)
	Balance MHI	520°C	480°C

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Entre las 14:30 y las 16:00, se observa una temperatura de salida del vapor en el sobrecalentador que se encuentra bajo a los valores de indicados por el balance MHI.
- Se observa que la línea de vapor derecha (curva naranja) que sale del sobrecalentador posee una temperatura en torno a 30°C superior respecto a la línea izquierda (curva azul).

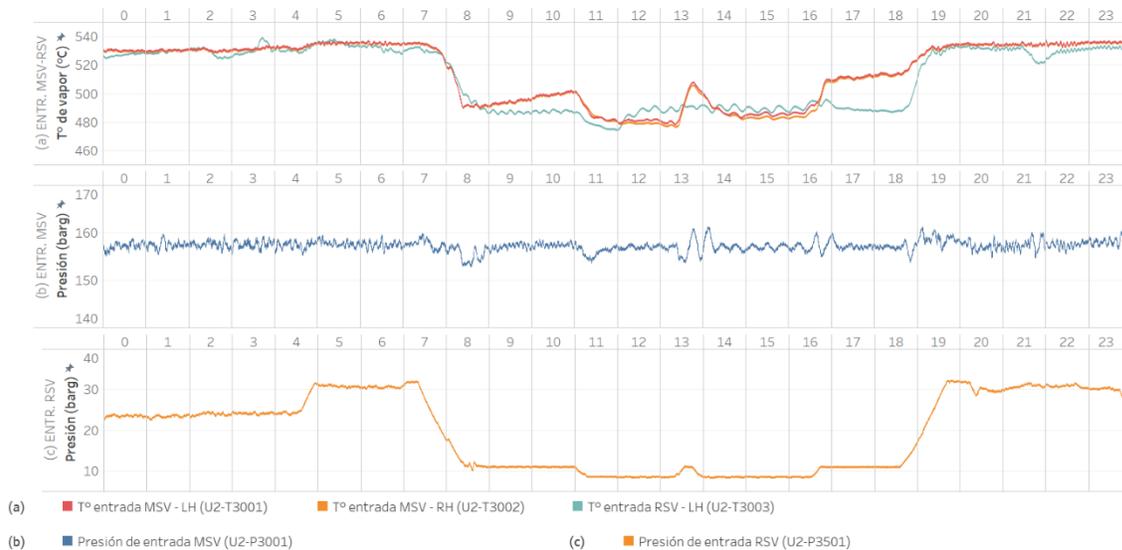
### 5 Condiciones de vapor a la entrada de la turbina

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 23 presenta la evolución de la presión y temperatura de vapor en las válvulas MSV y RSV de la turbina.

Figura 23

Evolución de la temperatura del vapor en la turbina de la Unidad 2 para las pruebas del 08-11-2023.  
Fuente: Elaboración propia.



El análisis de la evolución de la temperatura y presión del vapor en la turbina ilustrado en la Figura 23, dividido por cada molino en operación, se presenta a continuación:

### Operación con el molino C (11:30 a 13:00 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 17  
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	
13:00	Medición en la Entrada de MSV	479°C	-	157,4 barg	-
	Medición en la entrada de RSV	-	488,3°C	-	8,5 barg
	Balance MHI	517°C	477,8°C	160 bar	10,3 bar

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Entre las 11:30 y las 13:00 la temperatura de vapor de entrada MSV se encuentra por debajo de los valores establecidos por el balance MHI.
- Entre las 11:30 y las 13:00 la temperatura de vapor de entrada RSV se encuentra sobre los valores establecidos por el balance MHI.

- Entre las 12:00 y las 13:30 la temperatura de vapor de entrada RSV es mayor que la temperatura de entrada MSV<sup>31</sup>. Dado los desafíos de atemperación identificados en la unidad, se identifica como un aspecto a revisar.

### Operación con el molino D (14:30 a 16:00 hrs)

Los valores de temperatura del vapor observados en la Figura 23, para una medición puntual en operación con el molino D, 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 D.

Fuente: Elaboración propia.

Hora	Fuente	Temperatura		Presión	
16:00	Medición en la Entrada de MSV	484 °C	-	157,6 barg	-
	Medición en la entrada de RSV	-	487°C	-	8,5 barg
	Balance MHI	517 °C	477,8 °C	160 bar	10,3 bar
	Instruction Manual MHI	497 °C	451 °C	97 barg	7,9 barg

Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- Entre las 14:30 y las 16:00, se observa que la temperatura de entrada MSV se encuentra bajo los valores indicados por MHI.
- Entre las 14:30 y las 16:00, se observa que la temperatura de entrada RSV se encuentra en torno a 10°C sobre los valores indicados por el balance MHI y 30°C sobre los valores indicados en el *instruction manual* de MHI. Esta dinámica es un aspecto que se sugiere monitorear producto de que podría haber un riesgo de recalentamiento en los tubos en operación a carga reducida..
- Entre las 14:30 y las 16:00 la temperatura de vapor de entrada RSV es mayor que la temperatura de entrada MSV. Dado los desafíos de atemperación identificados en la unidad, se identifica como un aspecto a revisar.

## 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<sup>32</sup>. La operación del atemperador en el escape de la turbina es relevante a baja carga porque si el flujo de vapor es bajo se pueden producir problemas de recirculación de gotas.

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

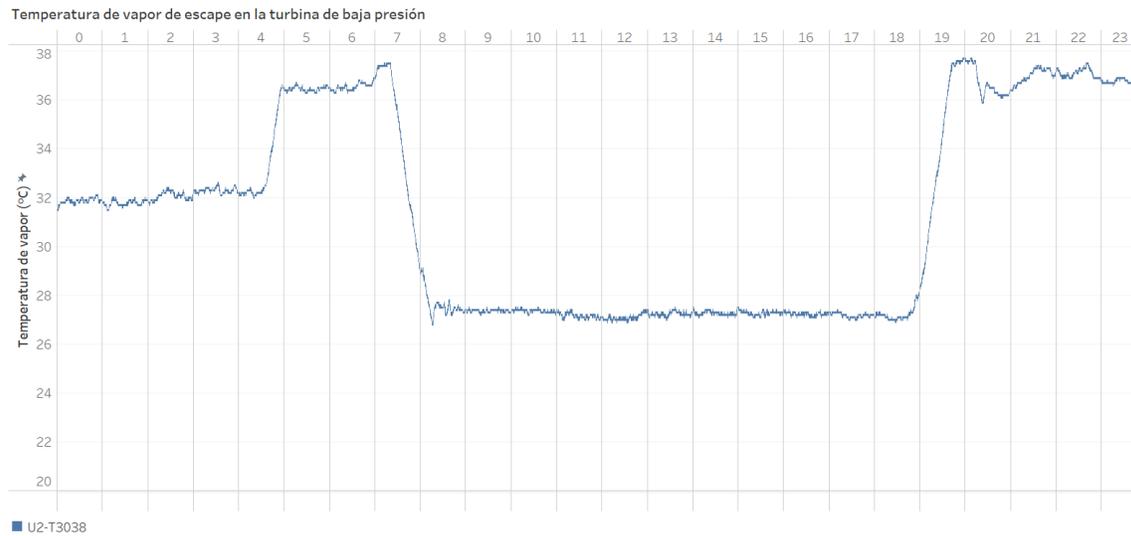
<sup>31</sup> Actualmente Guacolda se encuentra trabajando en revisar este aspecto.

<sup>32</sup> Manual de mantenimiento de la turbina de Guacolda 1, IWE-93010-18B

Figura 24

Temperatura del vapor de escape en turbina de baja presión durante las pruebas del 08-11-2023.

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°C<sup>33</sup>.
- En el periodo de operación a plena carga (a las 07:15 am), la temperatura máxima observada fue 37,4°C.
- En la operación con 1 molino, la temperatura de vapor de escape se mantiene constante, cercana 27,4°C.

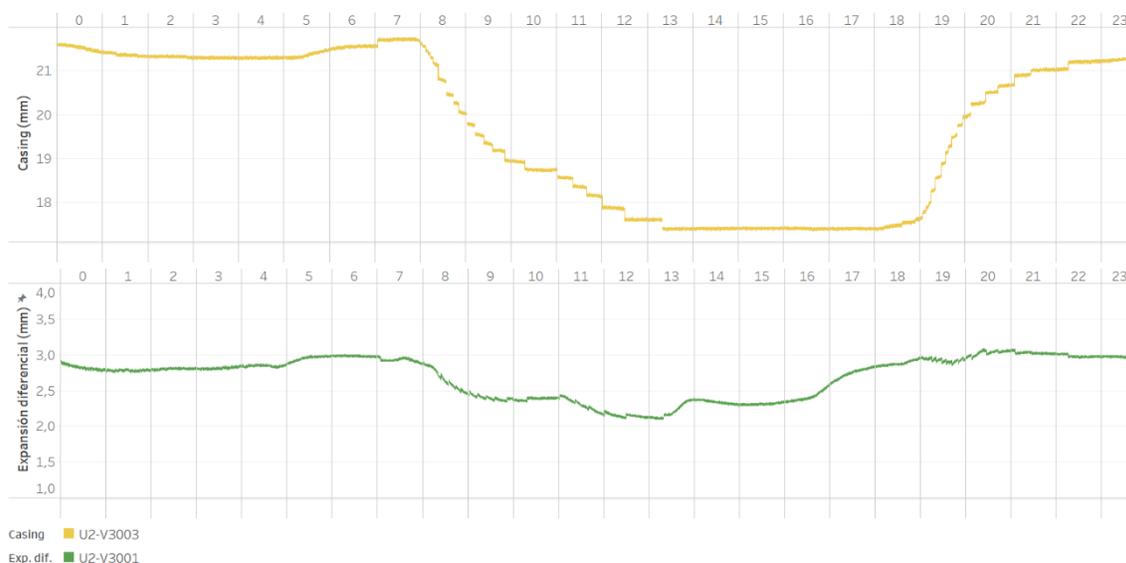
Es crítico notar que un aumento de la tasa de atemperación puede disminuir la pureza del vapor.

## D Expansión de la turbina

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

<sup>33</sup> MHI especifica activación de la atemperación para vapor de escape a 70°C, alarma a 80 °C y trip para 120°C. Se revisa la lógica de control y se encuentra la condición de atemperación a 70°C, junto a eso se identifica una condición extra de rpm y nivel de generación de la turbina que no se identifica en el manual MHI. Se sugiere revisar la alarma indicada por el manual de turbina para la temperatura del vapor de escape (Manual de mantenimiento de la turbina de Guacolda 1, IWE-93010-18B)

Figura 25  
 Expansión de carcasa y diferencial en la turbina durante las pruebas del 08-11-2023.  
 Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- MHI define alarma para una expansión diferencial de 11,1 mm (calentamiento) y -2,3 mm (enfriamiento).
- El valor máximo medido de expansión diferencial es de 2,99 mm, por ejemplo, durante a la operación a plena carga a las 06:30 am.
- Durante la operación con un molino (C o D) la expansión diferencial se mantiene cerca de un valor promedio de 2,24 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 1). Es importante tener en consideración que las unidades 1 y 2 de Guacolda comparten chimenea, por lo que las emisiones se pueden controlar manipulando actuadores en la Unidad 1 y/o 2. Lo anterior hace que eventuales desafíos en el control de emisiones no sean directamente atribuibles a una unidad cuando la otra unidad se encuentra en servicio.

### 1 Temperatura de los gases en la salida de la caldera

La Unidad 2 no cuenta con SCR. La Unidad 1 cuenta con un SCR que permite controlar los niveles de NOx. El SCR posee una temperatura de gases mínima de operación<sup>34</sup>; por lo tanto, el

<sup>34</sup> A 320°C se corta la inyección amoníaco.

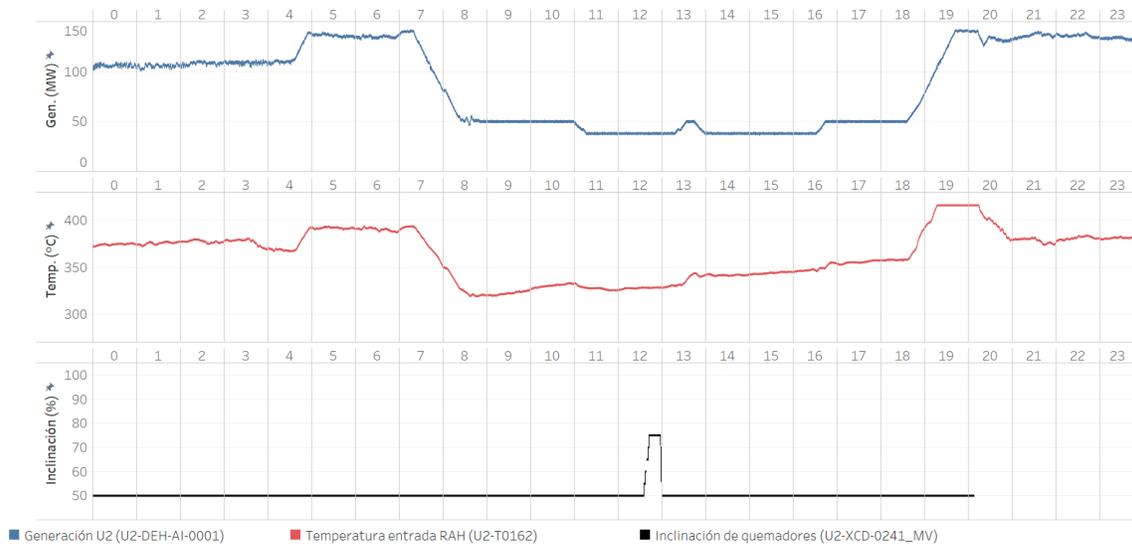
SCR sale de servicio cuando la temperatura de los gases está por debajo de los valores mínimos requeridos.

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 2

Figura 26

Evolución de la temperatura en la entrada del calentador regenerativo durante las pruebas de 08-11-2023.

Fuente: Elaboración propia.



A partir de la figura, se identifica lo siguiente:

- Durante el período de funcionamiento del molino C, entre las 11:30 y las 13:00, se observa una temperatura promedio de 327 °C.
- Durante el período de funcionamiento del molino D, entre las 14:30 y las 16:00, se observa una temperatura promedio de 345°C (valor mínimo de 340).
- 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 en servicio. Como prueba, entre las 12:30-13:00 se inclinan los quemadores mediante accionamiento manual en el DCS, sin observar efectos debido a que con el estado actual del sistema la posibilidad de ajuste fue limitada.

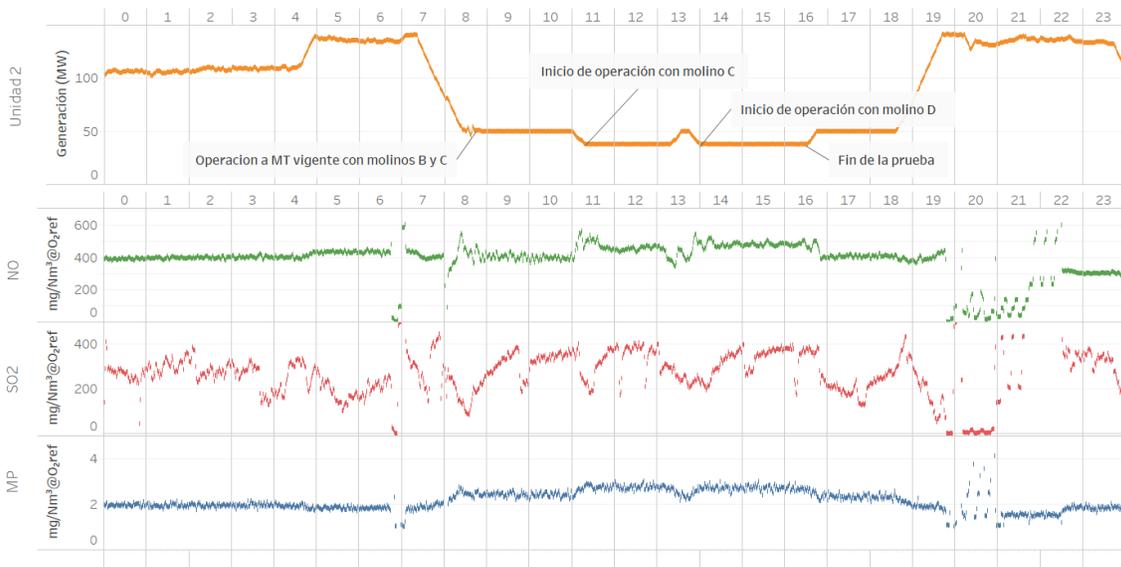
## 2 Emisión de MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>

En la Sección 6.1 se indicó los límites de emisiones para la Unidad 2. En la Figura 27 se presenta la generación de la Unidad 2 durante el desarrollo de la prueba. Además, se presenta la concentración instantánea de MP, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub>.

Figura 27

Flujo de gases (Nm<sup>3</sup>/h) y concentración (mg/Nm<sup>3</sup>@O<sub>2</sub>ref) durante la prueba del 08-11-2023.

Fuente: Elaboración propia.



- 1) La unidad 1 no operó entre las 08:00 y las 19:00, los datos de emisiones corresponden sólo a la unidad 2
- 2) Las condiciones normales (N) corresponden a 25°C y 1 atm (DS13, Artículo 14).
- 3) La concentración es corregida por oxígeno en base seca (DS13, Artículo 14)

Se identifica lo siguiente:

- Durante las pruebas del 08-11-2023 solo operó la Unidad 2, por lo tanto, fue posible comparar el nivel de emisiones entre molinos.
- Durante la operación del molino C entre las 11:30 y las 13:00 la concentración promedio de NO<sub>x</sub> es de 457 mg/Nm<sup>3</sup>@O<sub>2</sub>ref. Guacolda utiliza los registros de aire de los niveles superiores como OFA para controlar los niveles de NO<sub>x</sub>.
- Durante la operación del molino D entre las 14:30 y las 16:00 la concentración promedio de NO<sub>x</sub> es de 482 mg/Nm<sup>3</sup>@O<sub>2</sub>ref. En esta condición de operación, dado que se está utilizando el nivel superior de quemadores, Guacolda no puede utilizar los registros de aire superiores como OFA para controlar los niveles de NO<sub>x</sub>.

## F Operación del sistema de agua de alimentación

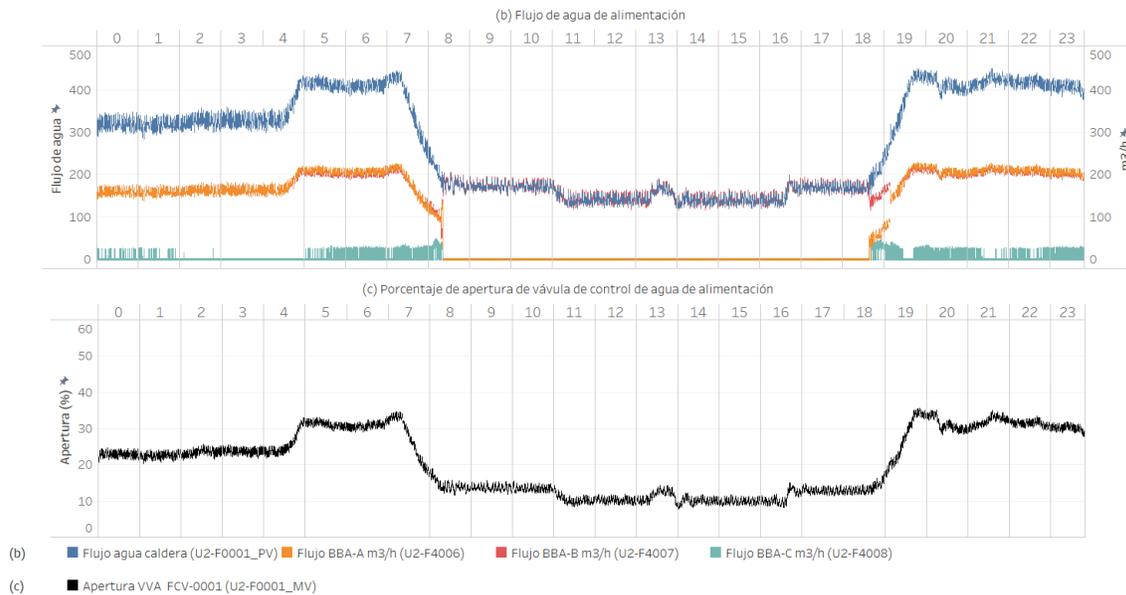
Se analizó el comportamiento de variables del sistema de agua de alimentación, particularmente en las bombas de agua de alimentación, válvulas de control de agua de alimentación, y calentadores de alta presión.

### 1 Operación de la bomba de agua de alimentación

La operación del sistema de agua de alimentación se representa en la Figura 28, 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 28  
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 C y D se observa que la apertura de la válvula de control de agua de alimentación está sobre 9% para lecturas por sistema de control<sup>35</sup>. En estudios previos de reducción de mínimo técnico, se recomendó no operar la válvula de agua de alimentación bajo 5% de apertura<sup>36</sup>.
- Se observa que durante la operación con el molino C y D, el flujo total generado por la bomba B es 140 ton/hora en promedio (se considera medición U1-F0001\_PV). MHI define el caudal mínimo de la bomba como 75 ton/hora<sup>37</sup>.
- Se observa que durante la operación con el molino C y D la presión de salida en la bomba es en promedio 250 barg. MHI define que para un caudal de 140 ton/hora se tiene una presión de 237 bar para el diámetro nominal de rodete, y 255 bar para el diámetro máximo de rodete.
- Es importante notar que en el proceso de ajustes a la Unidad 2, previo a las pruebas del 08-11-2023, la válvula de agua de alimentación presentaba desafíos de estabilidad en operación a mínimo técnico reducido respecto de la condición actual. Producto de lo anterior, la válvula fue intervenida para mejorar su condición de operación.

## 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

<sup>35</sup> Se realiza inspección en terreno y se observa un porcentaje de apertura físico de aproximadamente 10%.

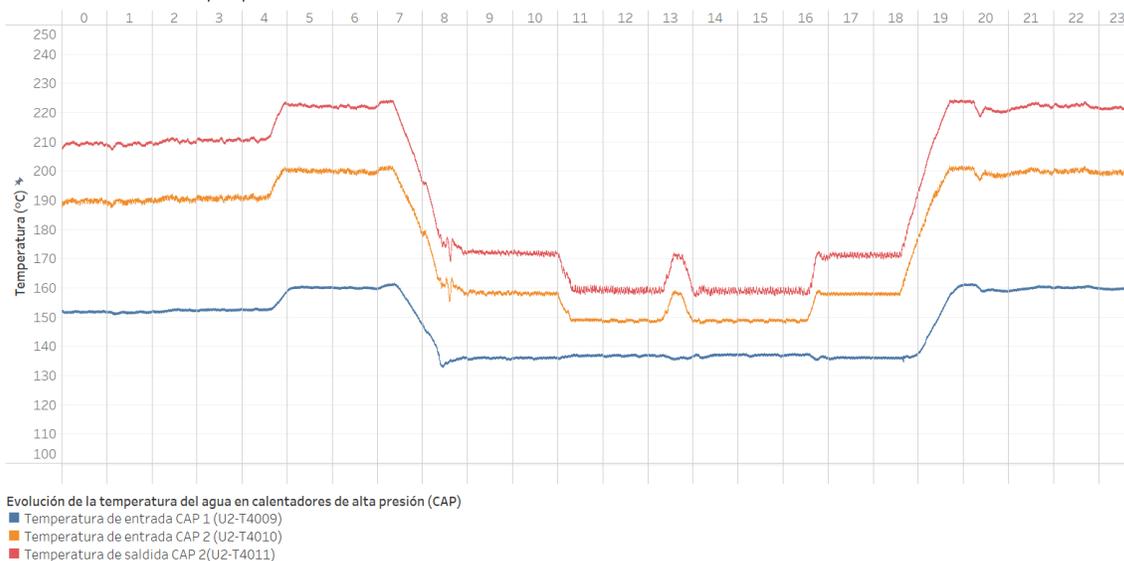
<sup>36</sup> Informe Mínimo Técnico, Sargent & Lundy, 2017.

<sup>37</sup> Data sheet boiler feed water pump. Document NO. G1-11.07-MH0001, REV. C

presión que alimentan a los calentadores. La siguiente figura resume el comportamiento de las variables de interés.

Figura 29  
Temperatura de agua en la entrada y salida a los calentadores de alta presión durante las pruebas de 08-11-2023.

Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- En la operación con un molino, se observa que la temperatura de entrada del calentador primario de alta presión (CAP 1) posee un valor promedio de 136 °C.
- En la operación con un molino, se observa que la temperatura de salida del calentador primario de alta presión posee un valor promedio de 148 °C. El fenómeno de FAC (corrosión acelerada por flujo) puede verse amplificado cerca de los 150 °C, al combinarse con otros factores<sup>38</sup>.

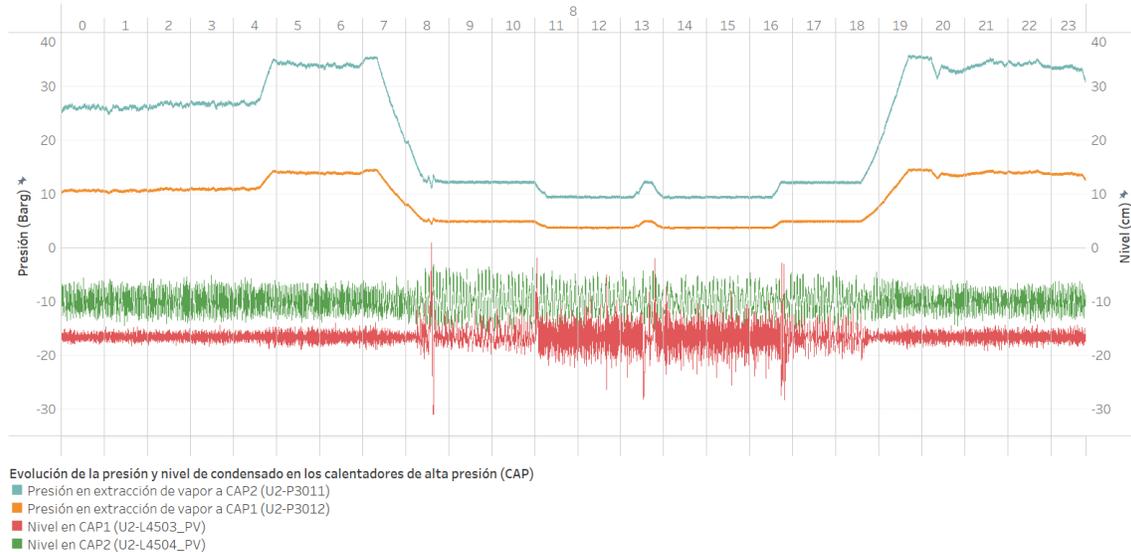
Un aspecto relevante en los calentadores de alta presión es la presión del vapor que llega desde las extracciones de la turbina de alta presión. Si la presión de vapor en el calentador es baja, existe la posibilidad de acumulación de condensado dado que no existe presión suficiente para mover el líquido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

<sup>38</sup> *Guidelines for Control of Flow Accelerated Corrosion in Fossil and Combined Cycle Plants*, EPRI, pág. 2-1, 2-11.

Figura 30

Evolución de la presión en extracción de vapor hacia el calentador de alta presión 1 y 2 durante las pruebas de 08-11-2023.

Fuente: Elaboración propia.



Se identifican los siguientes aspectos de interés:

- En la operación con 1 molino, la presión de vapor hacia el primer calentador de alta presión es 3,6 barg. El balance MHI muestra un valor de presión de 4,81 bar.
- En la operación con un molino, la presión de vapor hacia el segundo calentador de alta presión es de 9,3 barg. El balance MHI muestra un valor de presión de 11,4 bar.
- Se observa un aumento del nivel de condensado en el calentador primario durante los procesos de transición entre molinos (peak).

## G Control químico

Se monitorearon los parámetros químicos en 144 MW operando con 3 molinos; en 50 MW operando con molinos B y C; en 38 MW operando con el molino C; y en 38 MW con el molino D. 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 139 MW operando con los molinos B-C-D.

Tabla 19

Control químico para un nivel de carga de 139 MW operando con el molino B, C y D.

Fuente: Elaboración propia.

Fecha: 08-11-2023		Hora: 05:00		MW: 139		Presión domo: 168	
Variable de control	Norma	Unidad	Condensado	Agua Alimentación caldera	Agua Domo	Vapor Saturado	Vapor sobrecalentado
pH (a 25°C) (de lab.)		2	8,70 (a 24,1 °C)	8,65 (a 25,4 °C)	9,49 (a 22,3 °C)	8,76 (at 23,9 °C)	8,79 (at 23,7 °C)
TDS (sólidos suspendidos totales)		ppm		3			
Conductividad específica		uS/cm	1,664	1,502	11,44	1,668	1,548
Dureza (como CaCO <sub>3</sub> )		ppm		0,088			
Oxígeno disuelto (como O <sub>2</sub> ) (línea)		ppb		-0,61			
Fosfato (como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )		ppm			2,2		
Sílice (como SiO <sub>2</sub> )		ppb	12		156		18
Hierro (como Fe)		ppm	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Cobre (como Cu)		ppb	0	2	0	0	0
Hidracina (como N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )		ppb		11			
Conductividad catiónica (línea)		uS/cm	0,074	0,103	11,36	0,07	0,094
Sodio (línea)		ppb	0,21				0,11
Cloruro		ppm	0,2				

b) Control químico medido a 51 MW operando con los molinos B-D.

Tabla 20

Control químico para un nivel de carga de 50 MW operando con el molino B y C.

Fuente: Elaboración propia.

Fecha: 08-11-2023		Hora: 09:45		MW: 50		Presión domo: 158	
Variable de control	Norma	Unidad	Condensado	Agua Alimentación caldera	Agua Domo	Vapor Saturado	Vapor sobrecalentado
pH (at 25°C) (de lab.)		1	8,54 (a 23,8 °C)	8,64 (a 24,7°C)	9,35 (a 23,5°C)	8,44 (a 23,1 °C)	8,75 (a 22,9 °C)
TDS (sólidos suspendidos totales)		ppm		0			
Conductividad específica		uS/cm	2,36	2,87	8,63	1,72	1,25
Dureza (como CaCO <sub>3</sub> )		ppm		0,175			
Oxígeno disuelto (como O <sub>2</sub> ) (línea)		ppb		2,67			
Fosfato (como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )		ppm			1,6		
Sílice (como SiO <sub>2</sub> )		ppb	14		96		17
Hierro (como Fe)		ppm	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Cobre (como Cu)		ppb	1	1	2	1	1
Hidracina (como N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )		ppb		14			
Conductividad catiónica (línea)		uS/cm	0,10	0,10	8,86	0,08	0,09
Sodio (línea)		ppb	0,14				0,014
Cloruro		ppm	0,6				

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: 08-11-2023		Hora: 12:10		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.)		2	8,51 (a 23,1°C)	- (a 24,8°C)	9,41 (a 23,1°C)	8,59 (a 22,8°C)	8,69 (a 22,7°C)
TDS (sólidos suspendidos totales)		ppm		0			
Conductividad específica		uS/cm	1,4	2,55	10,02	1,65	1,17
Dureza (como CaCO <sub>3</sub> )		ppm		0,152			
Oxígeno disuelto (como O <sub>2</sub> ) (línea)		ppb		0,15			
Fosfato (como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )		ppm			2,1		
Sílice (como SiO <sub>2</sub> )		ppb	28		38		16
Hierro (como Fe)		ppm	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
Cobre (como Cu)		ppb	2	2	2	2	1
Hidracina (como N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )		ppb		7			
Conductividad catiónica (línea)		uS/cm	0,11	0,09	9,78	0,09	0,09
Sodio (línea)		ppb	0,19				0,15
Cloruro		ppm	0,2				

d) Control químico medido a 38 MW operando con el molino D.

Tabla 22

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

Fuente: Elaboración propia.

Fecha: 08-11-2023		Hora: 15:30		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.)		1	- (a 24,2°C)	8,30 (a 25,2°C)	9,34 (a 23,5°C)	8,75 (a 24,1°C)	8,75 (a 23,9°C)
TDS (sólidos suspendidos totales)		ppm		0			
Conductividad específica		uS/cm	1,25	2,92	9,9	1,46	1,12
Dureza (como CaCO <sub>3</sub> )		ppm		0,192			
Oxígeno disuelto (como O <sub>2</sub> ) (línea)		ppb		0,75			
Fosfato (como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )		ppm			2,1		
Sílice (como SiO <sub>2</sub> )		ppb	26		153		24
Hierro (como Fe)		ppm	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Cobre (como Cu)		ppb	2	3	3	2	2
Hidracina (como N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )		ppb		23			
Conductividad catiónica (línea)		uS/cm	0,13	0,09	10,84	0,09	0,1
Sodio (línea)		ppb	0,21				0,27
Cloruro		ppm	0				

El control de la química del agua de la Unidad 2 de Guacolda también requiere atención. Se identifica que el condensado en la entrada del desaireador es controlado correctamente en la

actualidad, pero podría requerir mejora dado que no se tiene instalado pulidores de condensado o filtros para la limpieza en partida.

Las Unidades 1 y 2 tienen un control semiautomático que utiliza muestras de laboratorio, el control de la dosificación química de estas unidades es manual y no óptimo.

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 desarrollando y evaluando un programa de control de FAC.

# 5 Conclusión

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

## 5.1 Factores limitantes identificados<sup>39</sup>

Los resultados permiten validar una operación de la Unidad 2 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 superiores.

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 el próximo periodo de mantenimiento que se ha programado. 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. Válvula de agua de alimentación.
- C. Temperatura y presión de vapor en las válvulas MSV y RSV de la turbina.
  - o Uso de molinos que alimentan quemadores inferiores.
  - o Estado de los sistemas de inclinación de los quemadores.
  - o Estado de las válvulas de atemperación<sup>40</sup>.
  - o Temperatura en tubos de caldera.
- D. Control de emisiones mediante uso de chimenea compartida con la Unidad 1

---

<sup>39</sup> Un factor limitante es aquel que impide una mayor flexibilización (reducción de mínimo técnico) u operar en la condición de operación con un molino.

<sup>40</sup> La atemperación de la Unidad 2 tiene un comportamiento anormal, el cual se ve acentuado en operación a bajas cargas. Actualmente, se ha implementado una solución temporal que influye sobre las válvulas de atemperación. Guacolda indica que con ajustes y mantención del sistema de atemperación se puede normalizar la condición del vapor.

- E. Estado pulverizadores - Granulometría de carbón en nueva condición de operación.
- F. Temperatura de salida del calentador primario de alta presión y riesgo de FAC.
- G. Presión del vapor que llega desde las extracciones de la turbina de alta presión en los calentadores de alta presión,
- H. Uso de los registros de aire del molino D como OFA.

### **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 operación<sup>41</sup>. 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 interconectado en forma continua en horizontes mayores de tiempo<sup>42</sup>.

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.

---

<sup>41</sup> Condiciones de temperatura, flujo, presión, vibración, voltaje, y/o corriente en los sistemas que corresponda.

<sup>42</sup> Por ejemplo, oscilaciones singulares, eventos con peaks breves, diferencias respecto de condiciones nominales.

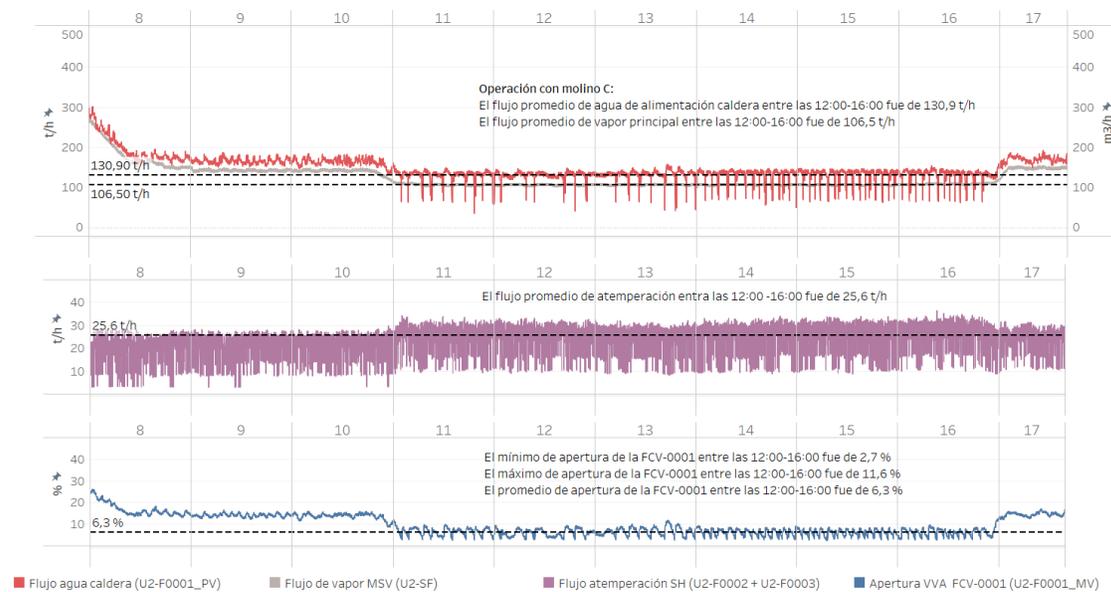
Finalmente, modos de operación más exigentes requieren un mayor esfuerzo de coordinación. Es deseable fortalecer prácticas de mantenimiento predictivo y de normalización del estado de equipamiento con síntomas incipientes de desgaste o mal funcionamiento.

## B Válvula de agua de alimentación

En la última prueba se observó que el punto de operación de la válvula de agua de alimentación fue entre 8,9% y 11,4 % de apertura. No obstante, como se ilustra en la siguiente figura, durante el proceso de validar el nuevo mínimo técnico de la unidad, en pruebas previas (20 de octubre) se identificó desafíos en la operación a bajas cargas ya que en promedio la apertura de la válvula de agua de alimentación estaba en 6% aproximadamente y había instantes en que el nivel era inferior al 3%.

Figura 31

La gráfica superior muestra problemas de reducción de flujo de agua de alimentación caldera (20 de octubre). La gráfica central muestra el flujo de atemperación durante las pruebas. La gráfica inferior muestra la operación de la válvula de agua de alimentación operando con problemas por bajo porcentaje de apertura. Fuente: Elaboración propia.



En vista de lo anterior, el equipo de Guacolda procedió a realizar una detención de la unidad por 5 días para realizar trabajos de mantenimiento en la válvula, actuadores y otros elementos que tienen impacto en la dinámica de funcionamiento de la válvula con el objetivo de mejorar su condición operativa.

Si bien los desafíos identificados fueron superados mediante un mantenimiento en la válvula, en la nueva condición de mínimo técnico se recomienda monitorear el estado y la operación de la válvula de agua de alimentación de la caldera. Durante la operación se sugiere verificar la posición de la válvula indicada en el DCS con lectura en terreno.

## C Temperatura de vapor en las válvulas MSV y RSV de la turbina

Al desarrollar las pruebas de operación con 1 molino se identificó que la temperatura de entrada RSV y MSV se encontraba bajo los valores de referencia establecidos por el balance MHI. Una situación similar se identificó para la presión, particularmente la presión de entrada RSV. Tres factores contribuyen a la condición indicada; los cuales debieran ser abordarlos en el próximo mantenimiento de la unidad.

Al desarrollar las pruebas en operación con un molino se observó que la temperatura de vapor de entrada a MSV posee valores menores respecto al valor de temperatura del vapor de entrada RSV. Considerando especificaciones MHI<sup>43</sup>, se sugiere como un aspecto a revisar.

### 1 Uso de molinos que alimentan los quemadores ubicados en la sección inferior de la caldera

En las pruebas realizadas, la mejor condición de operación, respecto de menores brechas de presión y temperatura en las válvulas MSV y RSV de la turbina, se logró con los pulverizadores C<sup>44</sup> y D. Se debe definir en qué medida dichas condiciones de operación pueden mantener la confiabilidad de la unidad en el mediano y largo plazo.

Luego, la operación con 1 molino requiere maximizar la disponibilidad de los pulverizadores que alimentan los quemadores ubicados en la sección superior de la caldera. En la medida que se normalicen los sistemas de inclinación de los quemadores y las válvulas de atemperación, se debería contribuir a mejorar las condiciones de operación de la unidad con los pulverizadores C y D. Se debe evaluar en qué medida también se mejoran las condiciones de operación mediante el uso del pulverizador A y B.

### 2 Estado de los sistemas de inclinación de los quemadores

La condición normal de operación en modo automático considera los quemadores en posición horizontal (inclinación de 50%). En la prueba del 8 de noviembre, el ajuste normal de la inclinación de los quemadores fue posición horizontal (con el VRG en servicio). Entre las 12:30-13:00 se inclinó los quemadores mediante accionamiento manual en el DCS, sin observar efectos debido a que, dado el estado actual del sistema, la posibilidad de ajuste fue limitada. Por lo tanto, en un próximo mantenimiento se debiera mejorar la condición de operación del sistema de inclinación de los quemadores de la unidad.

### 3 Estado de las válvulas de atemperación

Como parte del desarrollo de las pruebas que se han realizado en la Unidad 2 se identificó que existe una brecha en el sistema de válvulas de atemperación, el cual no permite un control óptimo en este nuevo punto de operación (38 MW con un molino). Guacolda se encuentra

---

<sup>43</sup> Instruction Manual for Operator, Section2, pág 71.

<sup>44</sup> Aunque la temperatura MSV fue levemente inferior con la operación del molino C.

trabajando en mejorar la condición del sistema de atemperación en el próximo mantenimiento de la unidad.

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

#### **4 Temperatura en tubos de caldera**

Durante las pruebas con el molino D se observó que la temperatura de entrada RSV se encontraba en torno a 10°C sobre los valores indicados por el balance MHI y 30°C sobre los valores indicados en el *instruction manual* de MHI. Esta dinámica es un aspecto que se sugiere monitorear producto de que podría haber un riesgo de recalentamiento en los tubos en operación a carga reducida. Se sugiere revisar la calibración del control de carga de combustible a la caldera, la medición de temperatura en los tubos de la caldera, y evaluar la instalación de sistemas para medir la temperatura en la salida del hogar (FEGT).

#### **D Control de emisiones mediante uso de chimenea compartida con la Unidad 1**

La Unidad 2 no tiene SCR y comparte chimenea con la Unidad 1. Las unidades de Guacolda deben cumplir los requerimientos establecidos en el DS 13 (detalles en el Anexo 1). Dado que la Unidad 2 comparte chimenea con la Unidad 1, cuando ambas unidades se encuentran en funcionamiento el control de emisiones se realiza mediante acciones en ambas unidades<sup>45</sup>.

#### **E Estado pulverizadores - Granulometría de carbón en nueva condición de operación.**

Dada las condiciones observadas, se debe fortalecer el mantenimiento a los pulverizadores. En las condiciones actuales de la unidad, una falla en el pulverizador D deja disponibles pulverizadores que no permiten lograr las condiciones nominales de temperatura en la turbina.

También se debe verificar que las condiciones de granulometría de carbón se mantengan dentro de las especificaciones recomendadas.

#### **F Temperatura de salida del calentador primario 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 factores.

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

---

<sup>45</sup> Respecto de los desafíos de control de NOx en la Unidad 1 se sugiere revisar el Informe de "Flexibilización de la Unidad 1 de Central Guacolda - Mínimo Técnico de Unidad 1 mediante operación con 1 molino", desarrollado por Inodú en octubre de 2023. Link: [https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2023/11/Informe\\_minimo\\_tecnico\\_U1\\_38\\_MW\\_26\\_10.pdf](https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2023/11/Informe_minimo_tecnico_U1_38_MW_26_10.pdf)

## G Presión del vapor que llega desde las extracciones de la turbina de alta presión en los calentadores de alta presión

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 mover el líquido al desaireador que está a mayor altura. Se recomienda monitorear esta condición.

## H Reevaluar la práctica actual de uso de los registros de aire del molino D como OFA

La Unidad 2 de Guacolda, por diseño, no cuenta con un sistema de inyección de aire por sobre los niveles de los quemadores (OFA<sup>46</sup>, por sus siglas en inglés) que colabore con el control de las emisiones de NOx. Luego, con el objetivo de controlar las emisiones de NOx por debajo de los valores límite permitidos por la normativa de emisiones, Guacolda utiliza los registros de aire del molino D como OFA, cuando el molino D no se encuentra en operación.

Si bien la práctica utilizada es una innovación para abordar la problemática de control de emisiones; en la medida que se introduzcan mejoras a otros factores limitantes observados se sugiere reevaluar la validez y necesidad de esta práctica<sup>47</sup>.

## 5.2 Mínimo técnico revisado en condición de operación con un molino

El Anexo Técnico de Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras<sup>48</sup> 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 32**).

<sup>46</sup> *Over Fire Air* o *SOFA*, por *Separated Over Fire Air*. Este sistema está presente en las Unidades 3, 4, 5.

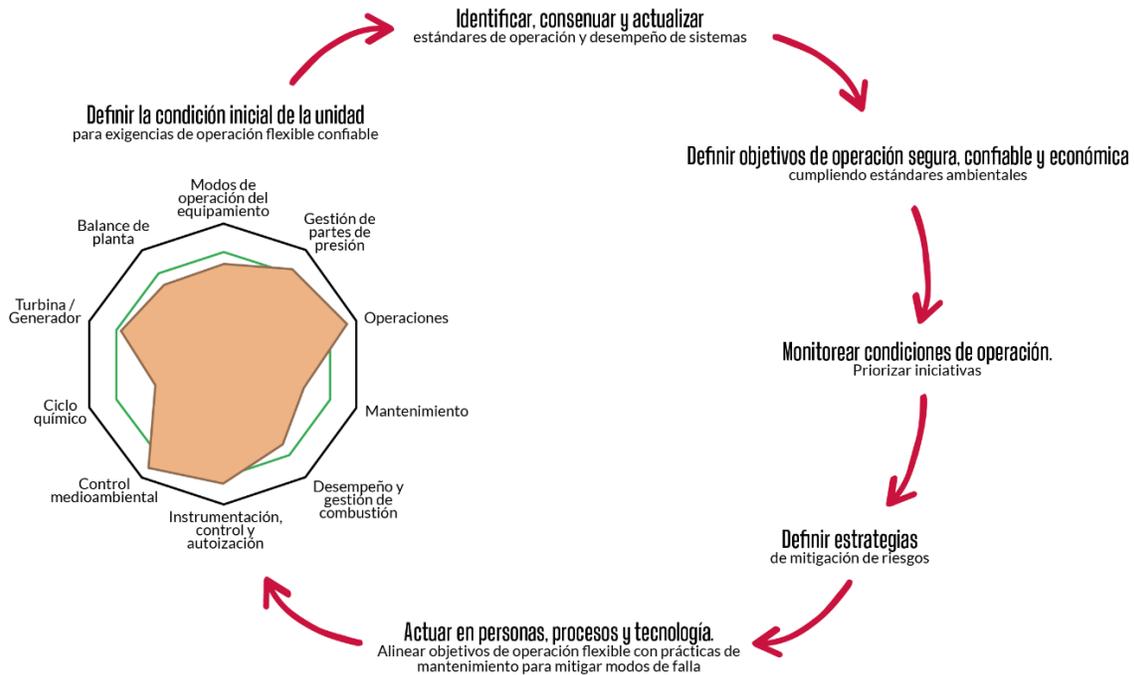
<sup>47</sup> El uso de registros de aire del molino D como OFA podría reducir la calidad de la combustión, aumentar la cantidad de carbón no quemado en ceniza, entre otros factores.

<sup>48</sup> Versión 2019: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/DETERMINACIÓN-DE-MÍNIMOS-TÉCNICOS-EN-UNIDADES-GENERADORAS.pdf>

Figura 32

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 molino<sup>49</sup> 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.

Parte de las mejoras requeridas pueden ser implementadas transitoriamente durante la operación; otras en el siguiente mantenimiento programado. Posterior al mantenimiento programado es deseable verificar si la implementación de mejoras permite una operación confiable con el molino A y B.

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<sup>50</sup>.

<sup>49</sup> Particularmente los que alimentan los quemadores ubicados en la parte superior de la caldera.

<sup>50</sup> Entre los factores a revisar se encuentra la interacción de las emisiones que se producen en la Unidad 1 operando a 38 MW, por ejemplo, con el molino D, y la operación de la unidad 2 de Guacolda.

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.

## 6 Anexos

### 6.1 Anexo 1: 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 33 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 23).

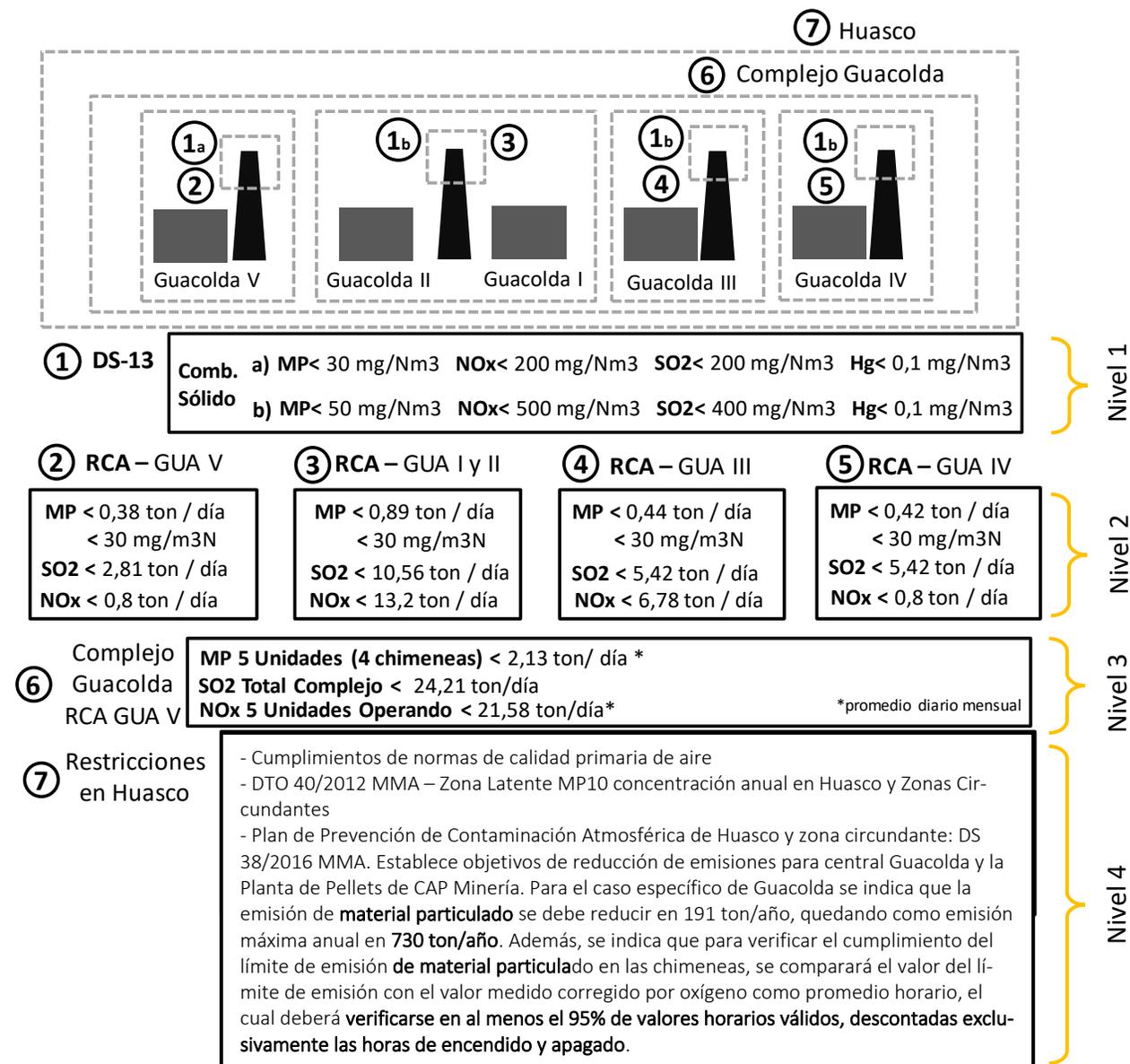
Tabla 23  
Límites de emisión establecidos en el DS13/2011 que aplican a las unidades de Guacolda.  
Fuente: Elaboración propia.

Unidad	Límite MP (mg/Nm <sup>3</sup> )	Límite NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )	Límite SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )
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/Nm<sup>3</sup> en todas las chimeneas. También se establece una emisión estimada en toneladas por día para MP, NOx y SO<sub>2</sub> en cada unidad.

La RCA no entrega información respecto del potencial de emisiones en modos de operación distintos a potencia nominal.

Figura 33  
 Síntesis de requerimientos relacionados a emisiones atmosféricas en Complejo Guacolda.  
 Fuente: Elaboración propia.



## **6.2 Anexo 2: 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.

### **6.2.1 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 34 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.

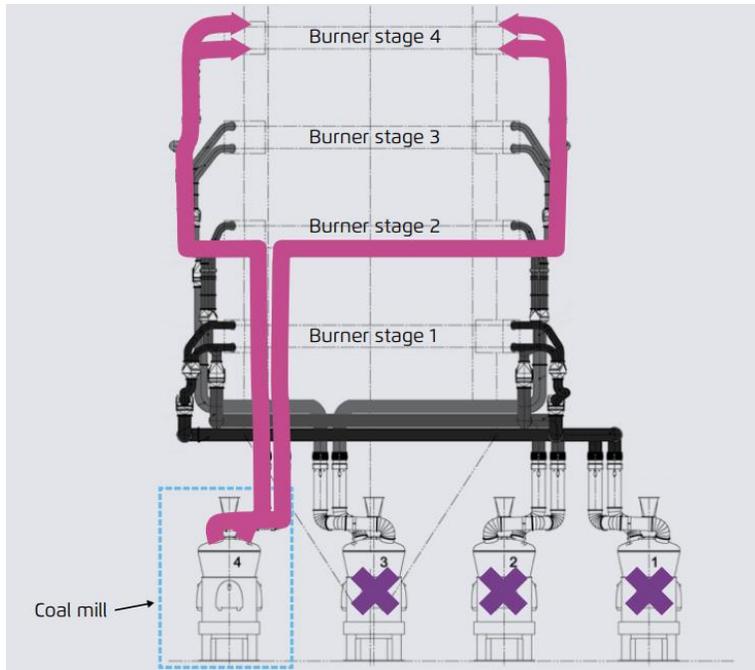


Figura 34: Disposición de los molinos y el sistema de quemadores en la operación con un molino. Fuente: (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012) en (Agora Energiewende, 2017).

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 35).

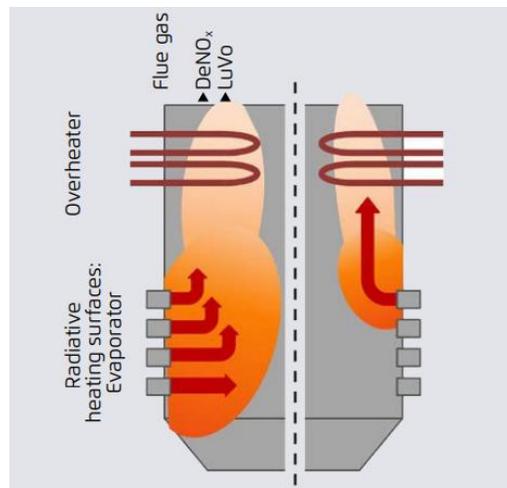


Figura 35: Comparación entre el funcionamiento con 1 y 4 niveles de quemadores. Fuente: (Agora Energiewende, 2017).

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

## 6.2.2 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 34), 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 36, 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.

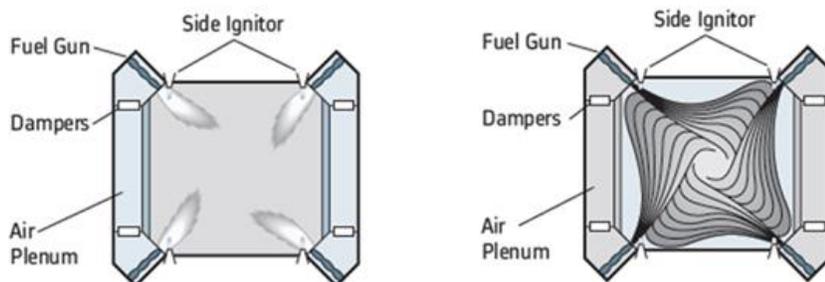


Figura 36: Patrón de quemado tangencial a bajas cargas y en condiciones de operación normal. Fuente: (Bozzuto, 2009).

Este desafío puede ser compensado parcialmente aumentando el exceso de aire a baja carga<sup>51</sup>, 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 unidad<sup>52</sup>. Por lo tanto, se prevén modificaciones en el sistema de control para permitir este tipo de funcionamiento y se

<sup>51</sup> 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.

<sup>52</sup> 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.

### **6.2.3 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.

## **6.2.4 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 Unidos<sup>53</sup> (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 37).

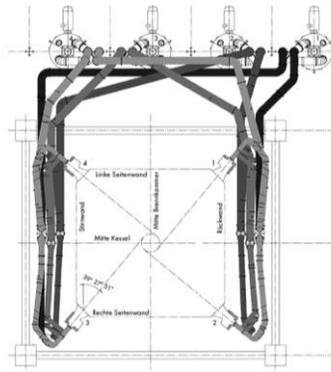


Figura 37: Disposición del sistema de quemadores tangenciales en la central de Heilbronn. Fuente: (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

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 38). 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.

---

<sup>53</sup> 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.

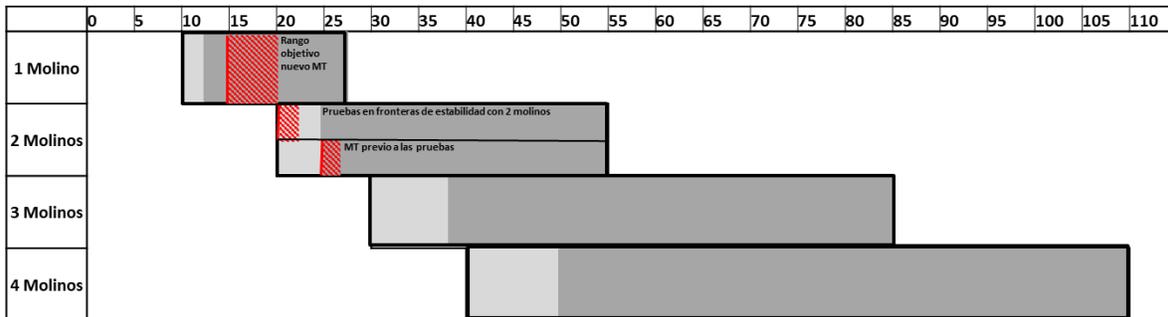


Figura 38: Rangos de carga definidos como objetivo para las pruebas en Heilbronn Block 7. Fuente: Elaboración propia a partir de (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

La Figura 38 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 39), además de manifestar un encendido estable.

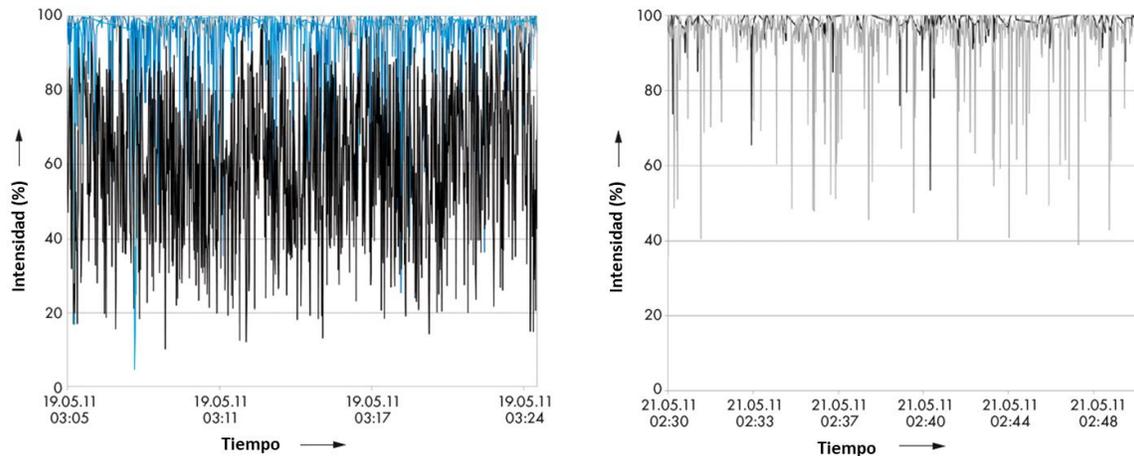


Figura 39: Intensidad de llama a lo largo de las pruebas de la operación con un molino en Heilbronn. Fuente: Adaptado a partir de (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

En la Figura 39 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 37).

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 24 (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

Tabla 24: Resumen de las experiencias operativas con el nuevo mínimo técnico. Fuente: elaboración propia a partir de (Heinzel, Meiser, Stamatelopoulos, & Buck, 2012).

<b>Desplazamiento de la entrada de calor en la caldera y en los gases de combustión para estabilizar las temperaturas de la caldera</b>	<b>Efectos de la reducción de la carga mínima en el ciclo agua-vapor</b>	<b>Influencia sobre los componentes auxiliares</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 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.</li> <li>▪ Debido al exceso de aire la llama es más fría y se produce más gas de combustión.</li> <li>▪ 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<sub>x</sub> 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 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.</li> <li>▪ 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.</li> <li>▪ El suministro de vapor auxiliar de las plantas debe estar garantizado incluso con una carga mínima.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El sistema de abatimiento de las emisiones de NO<sub>x</sub> 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.</li> <li>▪ 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.</li> <li>▪ 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.</li> </ul>

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<sub>x</sub>.
- 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).

## 6.3 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.

## 6.4 Anexo 3: 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 25: Datos del carbón australiano de alta ceniza utilizado por Guacolda.

Carbón con alto contenido de cenizas. Certificado N° 230614008E			
Parámetro de control	Clasificación	Resultado	Unidad
Poder calorífico bruto	ARB (As Received Basis)	5852	Kcal/kg
Poder calorífico neto	ARB	5602	Kcal/kg
Humedad total	ARB	10,1	%
Humedad inherente	ADB (Air Dry Basis)	2,5	%
Ceniza	ARB	17,9	%
Sulfuros totales	ARB	0,5	%
Materia volátil	ARB	27,7	%
Dureza	HGI	49	
Cloro	ARB	0,02	%
Fluor	ARB	79	ppm
Tamaño	0 x 50 mm	98	%
Carbón	DB (Dry basis)	67,0	%
Hidrógeno	DB	4,17	%
Nitrógeno	DB	1,53	%
Oxígeno	DB	6,85	%

### b) Carbón para generación de vapor colombiano al por mayor (Drummond)

Tabla 26: Datos del carbón Drummond utilizado por Guacolda.

Carbón Drummond. Certificado N° 2305293260SA			
Parámetro de control	Clasificación	Resultado	Unidad
Poder calorífico bruto	ARB (As Received Basis)	-	Kcal/kg
Poder calorífico neto	ARB	5274	Kcal/kg
Humedad total	ARB	15,96	%
Humedad inherente	ADB (Air Dried Basis)		%
Ceniza	ARB	10,78	%
Sulfuros totales	ARB	0,73	%
Materia volátil	ARB	-	%
Dureza	HGI	49	
Cloro	ARB		%
Fluor	ARB		ppm
Tamaño	Passing 2 in (50 mm), round	96,3	%
Carbón	DB (Dry basis)	68,8	%
Hidrógeno	DB	4,67	%
Nitrógeno	DB	1,48	%
Oxígeno	DB	11,38	%

c) Carbón para generación de vapor de estados unidos al por mayor (Alto azufre)

Tabla 27: Datos del carbón de alto azufre utilizado por Guacolda.

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	10,20	%
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)	72,89	%
Hidrógeno	DB	5,02	%
Nitrógeno	DB	1,58	%
Oxígeno	DB	6,98	%

d) Carbón para generación de vapor de Canadá al por mayor (Canadian)

Tabla 28: Datos del carbón Canadian utilizado por Guacolda.

Carbón de alto azufre. Certificado N° 399181/1			
Parámetro de control	Clasificación	Resultado	Unidad
Poder calorífico bruto	AR (As Received)	5706	Kcal/kg
Poder calorífico neto	AR	5444	Kcal/kg
Humedad total	AR	13,6	%
Humedad inherente	AD (Air Dried)	6,2	%
Ceniza	AR	10,1	%
Sulfuros totales	AR	0,42	%
Materia volátil	AR	30,5	%
Dureza	HGI	41	
Cloro	AR		%
Fluor	AR		ppm
Tamaño	> 2 inch	2,6	%
Carbón	DB (Dry Basis)	69,6	%
Hidrógeno	DB	4,18	%
Nitrógeno	DB	1,06	%
Oxígeno	DB	13,0	%