

## Pruebas de Consumo Específico Neto en Central Los Pinos

### CEN Los Pinos – Informe Técnico

Este documento tiene firma electrónica

Escrito por  
Thomas Grandry

Verificado por  
Alvaro Silva

Aprobado por  
Antonio Alarcón

### Versiones

Versión	Descripción
1	Primera versión

### Contenido

1.	Abreviaciones y Definiciones	3
	1.1. Abreviaciones	3
	1.2. Definiciones	3
2.	Introducción	4
	2.1. Objetivo	4
	2.2. Alcance de la prueba e informe técnico	4
3.	Documentos de referencia y normativa aplicable	4
4.	Descripción de la central	5
5.	Personal participante durante las pruebas y responsabilidad	6
6.	Desarrollo de la prueba Consumo Específico Neto	7
	6.1. Verificaciones previas al día de la prueba	8
	6.1.1. Curvas de corrección	8
	6.1.2. Instrumentación	8
	6.2. Verificaciones durante el día de la prueba, antes de la prueba	9
	6.3. Ejecución de la prueba	10
7.	Cálculo del Consumo Específico Neto	12
	7.1. Cálculo del Consumo Específico Neto por estado de carga	13
	7.2. Cálculo del Consumo Específico Neto Corregido	14

7.3.	Determinación de la incertidumbre expandida	16
7.3.1.	Determinación de la incertidumbre expandida CEN	16
7.3.2.	Determinación de la incertidumbre expandida CEN <sub>corr</sub>	17
8.	Discusión sobre las curvas de corrección	17
9.	Conclusiones	18
Anexo A.	Verificación de desconexión de consumos auxiliares no esenciales	19
Anexo B.	Criterios de estabilidad	20
Anexo C.	Actas de prueba CEN Los Pinos	27
Anexo D.	Operación de las válvulas VBV	27
Anexo E.	Operación manual de torres de enfriamiento	27
Anexo F.	Información entregada por Central Los Pinos para el cálculo del CEN y CEN corregido, y hojas de cálculo de trabajo de Laborelec	28
Anexo G.	Curvas de desempeño para la determinación de los factores de corrección para cada estado de carga	28
Anexo H.	Lista de Difusión	29

# 1. Abreviaciones y Definiciones

## 1.1. Abreviaciones

AP	:	Alta Presión
CEN	:	Consumo Específico Neto
DCS	:	Sistema de Control Distribuido
FP	:	Factor de Potencia
HMI	:	Human Machine Interface
HR	:	Humedad Relativa
IC	:	<i>Inter-Cooler</i>
MT	:	Mínimo Técnico
MTA	:	Mínimo Técnico Ambiental
ND	:	No Disponible
PCI	:	Poder Calorífico Inferior
PCS	:	Poder Calorífico Superior
PLC	:	<i>Programmable Logic Controller</i>
RTD	:	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SCADA	:	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SI	:	Sistema Interconectado
T	:	Temperatura
TG	:	Turbina a gas
VBV	:	<i>Variable Bleed Valve</i>

## 1.2. Definiciones

A continuación se indican definiciones principales que se utilizarán a lo largo de este informe.

**Mínimo Técnico (MT):** Se entenderá por Mínimo Técnico la potencia activa bruta mínima con la cual una unidad puede operar en forma permanente, segura y estable inyectando energía al Sistema Interconectado (SI) en forma continua.

**Mínimo Técnico Ambiental (MTA):** Mínimo Técnico que respete las restricciones ambientales exigidas a la central.

**Mediciones Primarias:** Mediciones necesarias para los cálculos y correcciones de consumo específico neto.

**Mediciones Secundarias:** Mediciones complementarias que se utilizan para corroborar el funcionamiento normal y estable de la unidad generadora durante cada etapa de carga.

**Unidad:** Unidad Generadora (turbina acoplada a su respectivo generador eléctrico).

## 2. Introducción

El día 11 de Abril de 2019 se realizó la prueba de Consumo Específico Neto (CEN) en Central Los Pinos, cuyo resultado se entrega en el presente Informe Técnico. El objetivo y el alcance de la prueba se describen a continuación.

### 2.1. Objetivo

Determinar el Consumo Específico Neto y el Consumo Específico Neto Corregido de Central Colbún Los Pinos en siete estados de carga, que van desde Mínimo Técnico hasta Potencia Máxima, de acuerdo a los requerimientos del Anexo Técnico “Determinación de Consumo Específico en Unidades Generadoras”, en adelante Anexo Técnico, y el Protocolo de Pruebas (Referencia LBE04130100, versión 4).

### 2.2. Alcance de la prueba e informe técnico

Velar por el cumplimiento de las definiciones establecidas en el Protocolo de Pruebas, dirigir las actividades realizadas el mismo día de la prueba, y entregar el informe final con los resultados del CEN y CEN corregido, que contenga lo requerido en el Anexo Técnico.

## 3. Documentos de referencia y normativa aplicable

Los documentos que son aplicables para la realización de las pruebas son los siguientes:

- Anexo Técnico: “Determinación De Consumos Específicos De Unidades Generadoras”
- Norma ISO 2314, ASME PTC 22 y PTC 17
- Norma ASME PTC 19.1
- Protocolo de Pruebas (Referencia LBE04130100, versión 4)

## 4. Descripción de la central

La Central Los Pinos es una central térmica compuesta por una turbina a gas en ciclo abierto acoplada a su respectivo generador eléctrico. En la Tabla 1 se indican las características principales de la central.

Es importante mencionar que, según lo informado por personal de Colbún, la turbina gas de los Pinos es la única turbina GE LMS100 en el mundo operando con combustible principal diésel.

Tabla 1: Características principales de la Central Los Pinos.

Descripción	Información	Unidad
Turbina a Gas en Ciclo Abierto	GE LMS100	--
Potencia Máxima	104	MW
Mínimo Técnico (MT)	3	MW
Mínimo Técnico Ambiental (MTA)	17	MW
Combustible	Diésel	--
Consumo Específico Referencial	0,2268	ton/MWh
Velocidad Nominal	3000	rpm
Generador Eléctrico	Hitachi	--
Sistema de Control	Speedtronic Mark VI	--
Punto de Conexión al SI	S/E Charrúa	--

En la Tabla 2 se indican las condiciones de referencia consideradas para la Central Los Pinos.

Tabla 2: Condiciones de referencia para la Central Los Pinos.

Parámetro	Valor	Unidad	Observación
Temperatura Ambiente	13,0	°C	Condición de Sitio - Promedio Anual <sup>1</sup>
	55,4	°F	
Humedad Relativa	60	%	Condición Referencia ISO
Presión Barométrica	101,325	kPa	Condición Referencia ISO
	14,70	PSI	
Altitud	160	msnm	Condición de Sitio
Depresión Admisión	9,96	mbar	Condición Referencia Fabricante
	4	inH2O	
Contrapresión Escape	14,94	mbar	Condición Referencia Fabricante
	6	inH2O	
Factor de Potencia Generador	0,95	-	Condición Anexo Técnico

## 5. Personal participante durante las pruebas y responsabilidad

El personal participante y sus responsabilidades se indican en la Tabla 3.

<sup>1</sup> Temperatura promedio anual del sitio. Fuente: Explorador Solar de la Universidad de Chile. <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>

Tabla 3: Personal y responsabilidades de los participantes de la prueba CEN.

Participante	Responsabilidad
<b>Experto Técnico</b> Laborelec	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisar y supervisar la ejecución de todas las actividades descritas en el protocolo.</li> <li>Realizar el Acta de Pruebas.</li> <li>Realizar informe técnico de las pruebas.</li> <li>Cumplir con las normativas de la planta.</li> </ul>
<b>Coordinador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coordinar la prueba de Consumo Específico según lo indicado en el protocolo.</li> <li>Suspender o interrumpir la prueba de ser necesario (la empresa generadora no es responsable de la interrupción de las pruebas).</li> <li>Revisar y realizar observaciones al informe técnico.</li> </ul>
<b>Empresa Generadora</b> Central Los Pinos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coordinar al personal a cargo de la operación de las pruebas.</li> <li>Corroborar que el personal esté calificado para la realización de las pruebas.</li> <li>Proporcionar planos e información técnica de las instalaciones de cada una de las plantas o sitios de interés.</li> <li>Entregar la instrumentación requerida y certificados de calibración correspondientes.</li> <li>Coordinar el patrón de tiempo de todos los sistemas de adquisición de datos de la instrumentación externa y sincronizarlos respecto del SCADA de la central.</li> <li>Apoyar al personal técnico de cada una de las plantas, estos facilitarán el ingreso a salas eléctricas u otro tipo de instalación.</li> <li>Coordinar trabajos y permisos de ingreso a instalaciones propias y ajenas.</li> <li>Facilitar la tramitación de la solicitud de faena segura en el interior de la planta.</li> <li>Colectar los datos y parámetros de operación durante las pruebas; y cumplir con el plazo de entrega estipulado.</li> <li>Proveer el personal de seguridad calificado necesario durante la ejecución de las pruebas.</li> </ul>

## 6. Desarrollo de la prueba Consumo Específico Neto

Para la prueba se utilizaron medidores externos y propios de la unidad generadora.

Antes del día de la prueba, se revisó las curvas de corrección, y se corroboró que toda la instrumentación utilizada cumpla con la clase de precisión y fecha de calibración requeridas en el Protocolo de Pruebas.

El día de la prueba, antes de dar inicio a la misma, se revisó la correcta instalación, medición, y sincronización de los relojes de los distintos instrumentos y equipos de adquisición de datos.

Durante la prueba, se verificaron los criterios de estabilidad establecidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas antes de dar inicio a cada estado de carga. Además, se verificaron el cumplimiento de las condiciones definidas en la Sección 6 del Protocolo de Pruebas.

## **6.1. Verificaciones previas al día de la prueba**

### **6.1.1. Curvas de corrección**

Colbún entregó curvas de corrección realizadas por el fabricante de la turbina (General Electric), ver Anexo G. Estas curvas corresponden a una operación de la turbina a carga base. Si bien fueron solicitadas, no se dispone de curvas de corrección para operación a carga parcial. Este tema se discute con mayor detalle en la Sección 8.

### **6.1.2. Instrumentación**

Se verificó que la instrumentación externa y propia de la unidad generadora cumple con los requisitos de precisión, fecha de última calibración y número de instrumentos requeridos por el Protocolo de Pruebas. La Tabla 4 entrega el resultado de dicha verificación. Todos cumplen de acuerdo a lo definido por Laborelec.



Tabla 4: Verificación de cumplimiento de los instrumentos externos y propios de la unidad generadora vinculados a la prueba de CEN.

Instrumento	Error máximo permitido	Fecha de última calibración	Cumplimiento
Medición de potencia neta (medidor externo) <ul style="list-style-type: none"> <li>Transformadores de potencial y corriente</li> <li>Equipo de adquisición de datos externo</li> </ul>	Clase 0,2	20/08/2018	Cumple
Medición de potencia bruta (medidor externo) <ul style="list-style-type: none"> <li>Transformadores de potencial y corriente</li> <li>Equipo de adquisición de datos externo</li> </ul>	Clase 0,2	11/07/2017	Cumple
Flujo de combustible	± 1%	28/11/2018	Cumple
Temperatura combustible a la entrada de la turbina	± 0,5°C	27/09/2018	Cumple
Temperatura aire de entrada: 9 RTD	± 0,5°C	08/11/2018	Cumple
Humedad relativa aire de entrada	± 2%	03/08/2018	Cumple
Depresión en Aspiración	± 10%	26/02/2019	Cumple
Contrapresión de Escape	± 10%	26/02/2019	Cumple

## 6.2. Verificaciones durante el día de la prueba, antes de la prueba

Durante la mañana del día de la prueba, se verificó la correcta instalación y medición de los medidores externos y propios de la unidad generadora, tanto con la turbina fuera de servicio como en operación.

Con la turbina fuera de servicio, se examinaron las 9 mediciones de temperatura en la toma de aire y se corroboró que eran coherentes entre si, como se ejemplifica en la Figura 1.

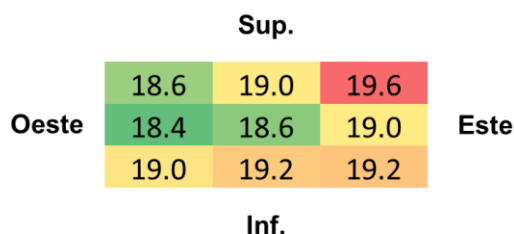


Figura 1: Mapeo de los promedios, en °C, de las nueve mediciones de temperatura en la toma de aire, durante la prueba a carga base.

Como se aprecia en la Figura 1, las temperaturas medidas en la toma de aire variaron dentro de un rango de ±0,6 °C con respecto al promedio de las nueve mediciones.

Se observó también que el medidor de humedad relativa MT-4000 no se movió desde el costado de la casa de filtro (su posición habitual) hacia el centro de la toma de aire, como se definió en el Protocolo de Pruebas Sección 7.4., de modo que esté ubicada en la proximidad de la medición de temperatura. No obstante, Laborelec aceptó esta desviación al Protocolo de Pruebas ya que esta medición de humedad relativa sigue siendo considerada como representativa del aire de entrada a la turbina.

Con la turbina en servicio a potencia máxima y antes de dar inicio a la prueba, se comprobó que los medidores externos y propios de la unidad miden correctamente dentro de los rangos normales de operación. Se verificó además el cumplimiento de las condiciones definidas en la Sección 6 del Protocolo de Pruebas, tales como: que la regulación primaria de frecuencia esté deshabilitada, que la unidad no presente alarmas relevantes, que las condiciones ambientales estén dentro de los límites definidos, entre otros.

Respecto de los consumos auxiliares no esenciales, estos se encontraban desconectados según lo acordado en el Protocolo de Pruebas antes de dar inicio a la prueba. En Anexo A se encuentra el documento de verificación de desconexión.

La central cuenta con cuatro torres de enfriamiento para enfriar el *Inter-Cooler*. La condición normal de operación según la guía de maniobra de las torres es que tres torres de enfriamiento están en servicio, y una queda de respaldo. Esta condición se mantuvo durante todo el desarrollo de las pruebas, en todos los estados de carga.

Como conclusión, se confirma que lo establecido en el Protocolo de Pruebas se cumplió y que las desviaciones, o fueron aceptadas por parte de Laborelec, o se zanjaron antes de dar inicio a la prueba.

### 6.3. Ejecución de la prueba

La prueba se realizó en los siete estados de cargas definidos en el Protocolo de Pruebas, desde la Potencia Máxima hasta el Mínimo Técnico. La Tabla 5 muestra el orden seguido de los estados de carga para la prueba.

Tabla 5: Orden de los estados de carga para la prueba en base al Protocolo de Pruebas. La prueba se realizó el día 11 de Abril de 2019.

Hora inicio	Hora fin	Estado de Carga	Potencia [MW]	Referencia
12:13	12:43	E7	104	Potencia Máxima
12:59	13:29	E6	87	--
13:45	14:15	E5	69	--
14:30	15:00	E4	51	--
16:15	16:45	E3	33	--
16:58	17:28	E2	17	Mínimo Técnico Ambiental
18:04	18:34	E1	3	Mínimo Técnico

Se dio inicio a cada estado de carga una vez cumplidos los criterios de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Las tendencias de las variables y sus desviaciones

se ilustran en las Figuras en el Anexo B. Las actas de la prueba se encuentran en el Anexo C.

Se resumen a continuación las principales desviaciones y observaciones relevantes durante el desarrollo de la prueba, por estado de carga:

- **Estado de carga a 104 MW, o carga base (E7):** La potencia activa bruta presenta valores fuera del rango del criterio de estabilidad un 7,5% del tiempo total de la prueba. Colbún justificó lo anterior con el hecho de que, por ser la única LMS100 con combustible diésel, los controles de la combustión y de la inyección de agua de DeNO<sub>x</sub> no son suficientemente estables en control de temperatura (T48), para mantener la carga de la unidad adentro del criterio de estabilidad de  $\pm 1\%$ . La explicación fue aceptada por Laborelec.
- **Estado de carga a 69 MW (E5):** Se abrieron las VBV (*Variable Bleed Valves*), liberando parte del aire de salida del compresor de baja presión hacia la atmósfera (a través de la chimenea de VBV). Las VBV se abren para controlar la presión de escape del compresor de baja presión, como parte de la operación normal de la TG, a fin de proteger los compresores de baja y de alta presión contra potenciales daños (*compressor stall*), a bajas cargas y durante los procesos de partida y detención. En el Anexo D se encuentra un documento explicativo por parte del fabricante.
- **Estado de carga a 33 MW (E3):** A esta carga y a las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolló la prueba, se comprobó que era factible operar la unidad con dos torres de enfriamiento, ahorrándose así el consumo de un motor de 56 kW (la operación normal considera la operación de tres torres de enfriamiento). Sin embargo, Los Pinos no conoce la carga límite ni las condiciones ambientales asociadas en que puede operar con dos torres de enfriamiento, ni cuanto tiempo operaría bajo esta carga límite antes que despache a una carga mayor. Adicionalmente, la puesta en marcha y detención de las torres de enfriamiento es manual (ver el Anexo E). Por estos motivos, se decidió en conjunto con Colbún continuar la prueba CEN en la condición normal con tres torres de enfriamiento en servicio.
- **Estado de carga a 3 MW (E1 – Mínimo Técnico):** el factor de potencia mostró altas variaciones. No se logró estabilizar el factor de potencia a un valor constante de 0,95, aunque se haya probado el comportamiento de la unidad con el control tensión, y luego el control de reactivo. Siendo un estado de carga muy bajo, no se consideró relevante seguir probando de estabilizar el factor de potencia, y se realizó la prueba dejando constancia en el acta de prueba.

En los estados de carga E7 (Potencia Máxima) y E1 (Mínimo Técnico), se tomaron las muestras de combustible de forma distinta a lo establecido en el Protocolo de Pruebas. Sin embargo la metodología empleada fue aceptada por Laborelec ya que no altera de forma significativa la condición del combustible. La metodología consistió en tomar la muestra en el punto de muestreo antes del medidor de flujo de combustible, utilizando una botella de vidrio de 1L llenada hasta la boca, tras cebado de la botella con 500 mL (aproximadamente) de combustible. Cada muestra se tomó en duplicado: una se envió al Laboratorio OTI, entidad encargada de los análisis, y la otra quedó como contramuestra en la central. La Figura 2 muestra personal de Los Pinos tomando la muestra de combustible.



Figura 2: Personal de Colbún Los Pinos tomando la muestra de combustible en la etapa de carga E1, a 3 MW.

## 7. Cálculo del Consumo Específico Neto

Una vez finalizada la prueba, Los Pinos proporcionó a Laborelec los datos solicitados en el Protocolo de Pruebas en formato Excel y tal como se obtuvieron de los equipos de adquisición de datos. Estos datos en bruto eran coherentes con lo observado durante el desarrollo de la prueba. Posteriormente, Los Pinos entregó el reporte de los análisis de combustible realizado por el Laboratorio OTI.

En la Tabla 5 se muestran los periodos de 30 minutos considerados para cada estado de carga de la prueba. El tiempo considerado en el estado de carga a E1 (3 MW), considera el periodo en control de factor de potencia ya que presenta un valor de factor de potencia más estable que bajo los otros modos de control señalados en la Sección 6.3.

Los datos en bruto proporcionados por Central Los Pinos fueron puestos bajo la misma estampa de tiempo de 5 segundos, mediante una interpolación lineal, para un mejor análisis y procesamiento de la información.

Para el tratamiento de los datos se utilizaron los softwares Excel y Tableau. En el Anexo F se encuentra la información entregada por Los Pinos, tanto del proceso como los análisis de combustible, y la información procesada por Laborelec.

## 7.1. Cálculo del Consumo Específico Neto por estado de carga

El CEN se calcula según la siguiente ecuación:

$$CEN = 1,2618 \times 10^{-4} \frac{\dot{V}\rho}{P_{neta}} PCS \left[ \frac{kcal}{kWh} \right] \quad [1]$$

Donde,

$\dot{V}$  = flujo volumétrico del combustible en *gpm*

$\rho$  = densidad del combustible en *kg/m<sup>3</sup>*

$P_{neta}$  = Potencia neta en *MW*

$PCS$  = Poder calorífico superior del combustible en *BTU/lb*

Los análisis de las muestras de diésel en las etapas de carga E7 y E1 entregaron los mismos resultados en terminos de poder calorífico superior y densidades medidas a distintas temperaturas (ver Anexo F). La Tabla 6 muestra un resumen de los resultados entregados por el Laboratorio OTI, donde se muestra la dependencia de la densidad con la temperatura.

Tabla 6: Densidad respecto de la temperatura y Poder Calorífico Superior del combustible diésel utilizado en la prueba CEN.

Variable	Valor	Método
Densidad a 67,5 °F	835,6 kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052-18a
Densidad a 68,0 °F	835,4 kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052-18a
Densidad a 68,5 °F	835,2 kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052-18a
Densidad a 69,0 °F	835,0 kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052-18a
Densidad a 69,5 °F	834,8 kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052-18a
Poder Calorífico Superior	19 658 BTU/lb	ASTM D4868-17

Se realizó una regresión lineal para encontrar la función que relaciona la temperatura del combustible,  $T_{comb}$ , con la densidad:

$$\rho(T_{comb}) = -0,4T_{comb} + 862,6 \quad [2]$$

La Ecuación 2 es válida en el rango de 67,5 a 69,5 °F.

Se determinó el promedio del flujo volumétrico de combustible, temperatura de combustible, y potencia neta en cada estado de carga en el periodo de tiempo definido en la Tabla 5. Con la temperatura promedio de combustible, se determinó la densidad mediante la Ecuación 2. Con estos valores, se calculó el CEN para cada estado de carga utilizando la Ecuación 1. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Consumo Específico Neto para cada estado de carga

Estado de carga	Potencia neta promedio	Flujo de combustible promedio	Temperatura de combustible promedio	Densidad de combustible calculada	Consumo Específico Neto	Incertidumbre expandida
	MW	GPM	°F	kg/m <sup>3</sup>	kcal/kWh	kcal/kWh
<b>E7</b>	100,2	104	68,1	835,4	<b>2146</b>	<b>10</b>
<b>E6</b>	85,33	90,7	67,9	835,4	<b>2202</b>	<b>11</b>
<b>E5</b>	67,41	75,5	67,8	835,5	<b>2320</b>	<b>11</b>
<b>E4</b>	49,47	60,6	67,9	835,4	<b>2537</b>	<b>12</b>
<b>E3</b>	31,52	45,2	68,4	835,3	<b>2971</b>	<b>14</b>
<b>E2</b>	15,58	30,0	68,7	835,1	<b>3989</b>	<b>19</b>
<b>E1</b>	1,674	14,3	69,0	835,0	<b>17729</b>	<b>100</b>

## 7.2. Cálculo del Consumo Específico Neto Corregido

El Consumo Específico Neto Corregido,  $CEN_{corr}$ , se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CEN_{corr} = CEN \times f_{FP} \times f_{TA} \times f_{HR} \times f_{DA} \times f_{CE} \left[ \frac{kcal}{kWh} \right] \quad [3]$$

Donde,

$CEN$  = Consumo Específico Neto en  $kcal/kWh$

$f_{FP}$  = Factor de corrección por factor de potencia, en el lado de la potencia bruta

$f_{TA}$  = Factor de corrección por temperatura aire ingreso a la turbina

$f_{HR}$  = Factor de corrección por humedad relativa aire ingreso a la turbina

$f_{DA}$  = Factor de corrección por depresión a la aspiración

$f_{CE}$  = Factor de corrección por contrapresión al escape

La Tabla 8 muestra las condiciones de operación en cada estado de carga que fueron utilizados en la determinación de los factores de corrección.

Tabla 8: Variables utilizadas para la determinación de los factores de corrección.

	Factor de potencia bruto	Temperatura ingreso de aire °C	Humedad relativa del aire %	Depresión de aspiración de aire inH <sub>2</sub> O	Contrapresión de escape inH <sub>2</sub> O
<b>Valor de referencia<sup>2</sup></b>	0,95	13,0	60,0	4,0	6,0
<b>E7</b>	0,95	19,0	53,8	3,7	6,2
<b>E6</b>	0,95	20,2	52,2	3,3	4,9
<b>E5</b>	0,95	21,5	48,5	2,9	3,8
<b>E4</b>	0,95	22,9	41,4	2,4	2,4
<b>E3</b>	0,95	23,7	39,5	1,8	1,5
<b>E2</b>	0,96	22,7	40,8	1,3	0,6
<b>E1</b>	0,77	20,3	51,8	0,8	0,0

Los factores de corrección se determinan bajo el supuesto que la turbina se comporta de igual forma tanto a carga base como a carga parcial, afirmación que se discutirá en la Sección 8.

Los datos de la Tabla 8 sirven como variables de entrada para las curvas de desempeño a carga base disponible. En el Anexo G se entregan las curvas de desempeño con el detalle de la determinación de los factores de corrección. Finalmente, la Tabla 9 muestra los factores de corrección obtenidos para cada estado de carga y el valor del CEN<sub>corr</sub>.

Tabla 9: Factores de corrección calculados y CEN corregido, utilizando las curvas de desempeño de la turbina a carga base.

Estado de carga	Factor de potencia	Factores de corrección				Consumo Específico Neto Corregido kcal/kWh	Incertidumbre expandida kcal/kWh
		Temperatura ingreso de aire	Humedad relativa del aire	Depresión aspiración de aire	Contrapresión de escape		
<b>E7</b>	1,0000	1,0286	1,0003	1,0003	1,0002	<b>2209</b>	<b>35</b>
<b>E6</b>	1,0000	1,0470	1,0003	1,0004	0,9991	<b>2305</b>	<b>37</b>
<b>E5</b>	1,0000	1,0639	1,0005	1,0006	0,9983	<b>2467</b>	<b>19</b>
<b>E4</b>	1,0000	1,0727	1,0007	1,0009	0,9971	<b>2718</b>	<b>21</b>
<b>E3</b>	1,0000	1,0774	1,0008	1,0012	0,9964	<b>3196</b>	<b>25</b>
<b>E2</b>	0,9998	1,0717	1,0008	1,0015	0,9957	<b>4265</b>	<b>32</b>
<b>E1</b>	1,0028	1,0492	1,0003	1,0018	0,9952	<b>18603</b>	<b>308</b>

<sup>2</sup> Ver Tabla 2

### 7.3. Determinación de la incertidumbre expandida

La determinación de la incertidumbre expandida para el CEN y CEN<sub>corr</sub> se realizó de acuerdo a la norma ASME PTC 19.1.

La incertidumbre estándar aleatoria,  $s_{\bar{X}_i}$ , se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$s_{\bar{X}_i} = \frac{s_{X_i}}{\sqrt{N}} \quad [4]$$

Donde  $s_{X_i}$  representa la desviación estándar de una muestra de la variable  $X_i$ , y  $N$  es el número de medidas de la muestra.

La incertidumbre estándar sistemática,  $b_{\bar{X}_i}$ , se obtiene de la siguiente expresión:

$$b_{\bar{X}_i} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (b_{\bar{X}_{i_k}})^2} \quad [5]$$

Donde  $b_{\bar{X}_{i_k}}$  corresponde a cada una de las incertidumbres estándar sistemática que afecta a la variable  $X_i$ ; por ejemplo: variaciones por calibración de equipos de medición, distribución espacial de instrumentos, entre otros.

La combinación de la incertidumbre estándar aleatoria y la incertidumbre estándar sistemática entrega la incertidumbre total de la medición. Esta se obtiene de la siguiente manera:

$$u_{\bar{X}_i} = \sqrt{(s_{\bar{X}_i})^2 + (b_{\bar{X}_i})^2} \quad [6]$$

Sea  $R$  función que representa el resultado, y que depende múltiples variables  $R(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n)$ . La expresión para la incertidumbre total del resultado,  $u_R$ , es:

$$u_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( u_{\bar{X}_i} \frac{\partial R}{\partial \bar{X}_i} \right)^2} \quad [7]$$

Dada la complejidad de obtener algebraicamente las derivadas parciales de  $R$ , es que se realiza la siguiente aproximación:

$$\frac{\partial R}{\partial \bar{X}_i} u_{\bar{X}_i} \approx R(\bar{X}_i + u_{\bar{X}_i}) - R(\bar{X}_i) \quad [8]$$

Esta aproximación permite calcular numéricamente  $u_R$ .

Finalmente, se usa el factor de 2 para alcanzar un 95% de nivel de confianza:

$$U_R = 2u_R \quad [9]$$

$U_R$  corresponde a la incertidumbre expandida del resultado  $R$ .

#### 7.3.1. Determinación de la incertidumbre expandida CEN

Para el caso del CEN, la función  $R$  corresponde a la Ecuación 1 en combinación con la Ecuación 2.  $\bar{X}_i$  corresponde a  $P_{neta}$ ,  $\dot{V}$ ,  $T_{comb}$ , y  $PCS$ . El resultado del cálculo se entrega en la Tabla 7, y el detalle se encuentra en el Anexo F.



### 7.3.2. Determinación de la incertidumbre expandida $CEN_{corr}$

El factor de corrección más importante en  $CEN_{corr}$  es la corrección por temperatura de ingreso del aire a la turbina,  $f_{TA}$ . Utilizando la curva de desempeño por temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , proporcionada por Central Los Pinos, se determinó la siguiente función:

$$f_{TA}(T_{amb}) = \begin{cases} \frac{104840}{-1477,3T_{amb} + 129928} & \text{si } 19,0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq 20,3\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \frac{104840}{-571,2T_{amb} + 110824} & \text{si } 21,5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq 22,7\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad [10]$$

Esta función, en combinación con la Ecuación 1, 2, y 3, permiten calcular la incertidumbre expandida para  $CEN_{corr}$ . El resultado se encuentra en la Tabla 9, y el detalle en el Anexo F.

## 8. Discusión sobre las curvas de corrección

A fin de corregir lo más fielmente posible el Consumo Especifico Neto a cargas parciales, se recomienda usar curvas de desempeño a carga parcial, y no curvas construidas para carga base. Lo anterior porque el comportamiento de una TG no es similar a carga base y en control de carga, es decir a carga parcial. A modo de ilustración, en la Figura 3 se presenta una curva de desempeño de una turbina GE LMS 100PA+ a carga base, 100 MW, y a 80 MW en función de la temperatura del aire al ingreso, simuladas en el software Thermoflow, operada con gas natural (modelo ID#442).

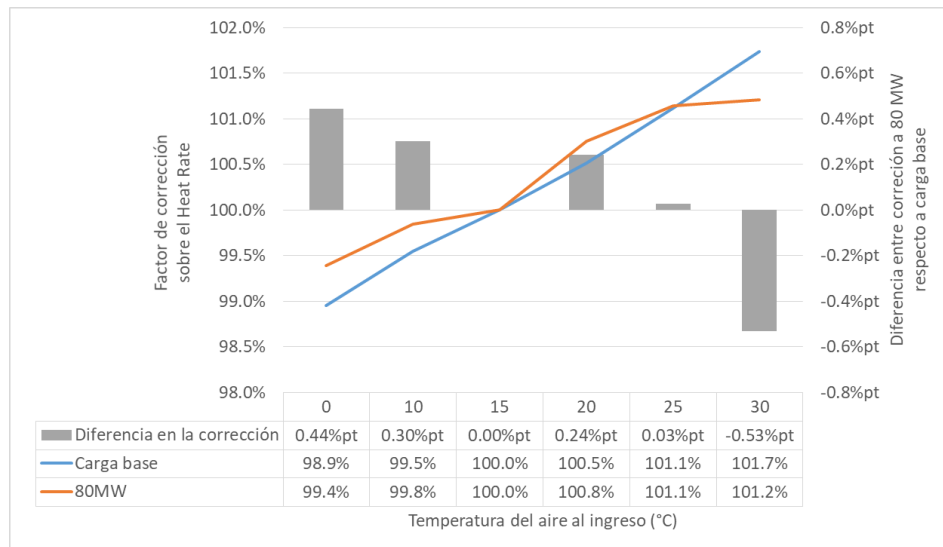


Figura 3: Simulación de curva de corrección de temperatura para LMS PA+, en carga base y control de carga, en 80 MW.

Se observa en la Figura 3 que la diferencia entre los factores de corrección aumenta a medida que la temperatura se aleja de su condición referencia (15 °C), hasta llegar a diferencias del orden de  $\pm 0,5\%$ pt. Lo anterior significa que usar curvas de corrección a carga base en vez de curvas a carga parcial conllevaría una sobre estimación (para temperatura baja) o una subestimación (para temperaturas altas) en este caso hasta un 0,5% del *heat rate* corregido de la TG (a 15°C).


## 9. Conclusiones

Las pruebas de CEN de los Pinos fueron exitosas ya que:

- Las pruebas cumplieron con lo establecido en el Protocolo de Pruebas. Las desviaciones observadas, o fueron aceptadas por parte de Laborelec, o se zanjaron antes de dar inicio a la prueba.
- Las pruebas permitieron determinar el CEN de la unidad para cada uno de los distintos estados de carga. Los valores de CEN encontrados se presentan en la Tabla 7, y los valores de CEN corregidos en base a las curvas de desempeño a carga base se presentan en la Tabla 9.

Es la opinión de Laborelec que, a fin de corregir lo más fielmente posible el Consumo Específico Neto a cargas parciales, es recomendable usar curvas de desempeño a carga parcial, y no curvas construidas para carga base. A modo de ejemplo, se demostró mediante una simulación y para una turbina similar que aplicar una corrección por temperatura ambiente a carga parcial con una curva de corrección para carga base conllevaría una sobre o una sub estimación hasta un 0,5% del *heat rate* corregido de la TG (a 15°C).

## Anexo A. Verificación de desconexión de consumos auxiliares no esenciales

Descripción	Archivo
Verificación de desconexión de consumos auxiliares no esenciales	 Desconexion auxiliares no esenci

## Anexo B. Criterios de estabilidad

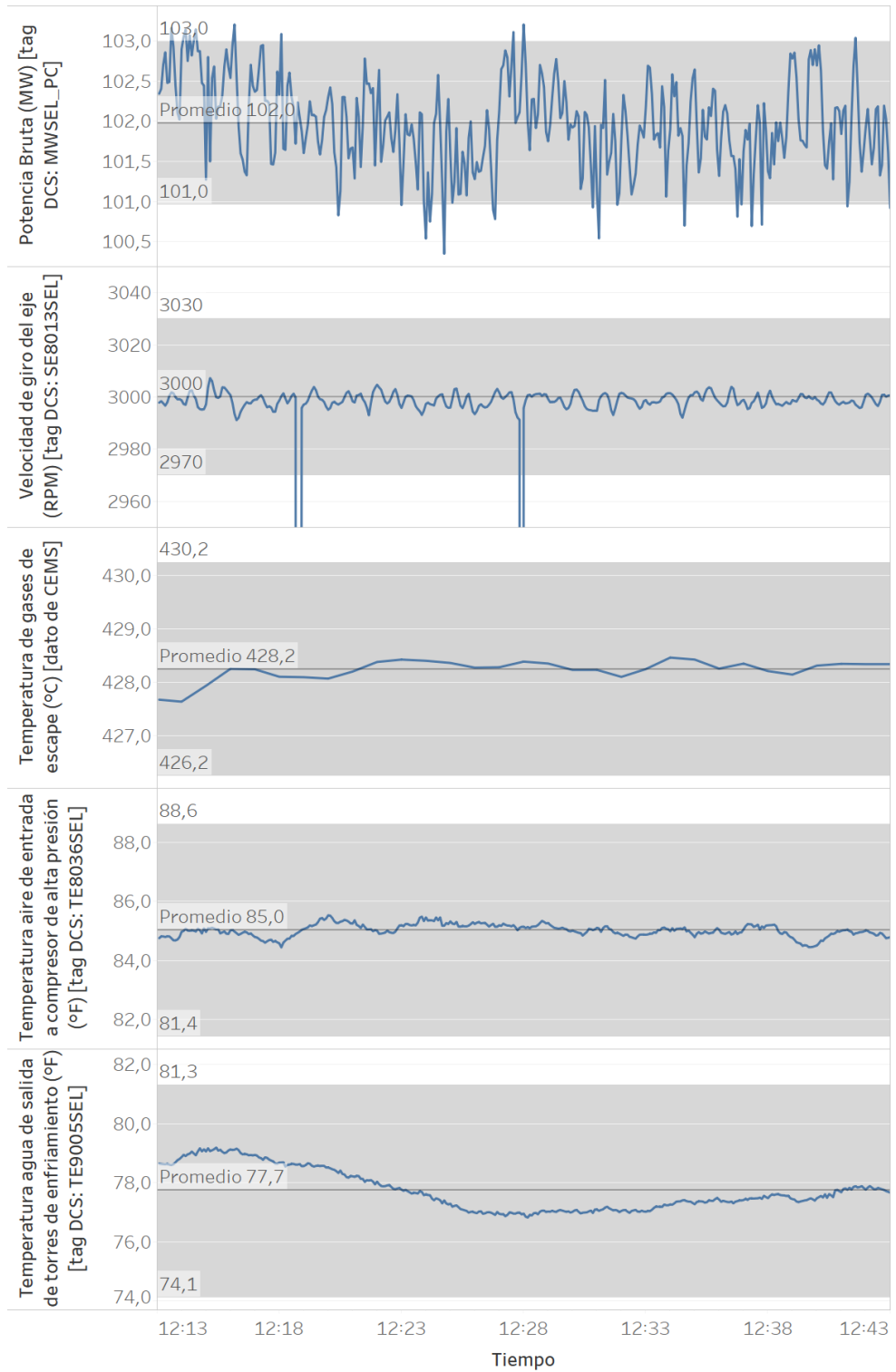


Figura 4: Criterios de estabilidad para estado de carga "carga base", E7. En gris se muestran los límites de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Se observa que la potencia bruta sobrepasa los límites un 7,5% del tiempo.

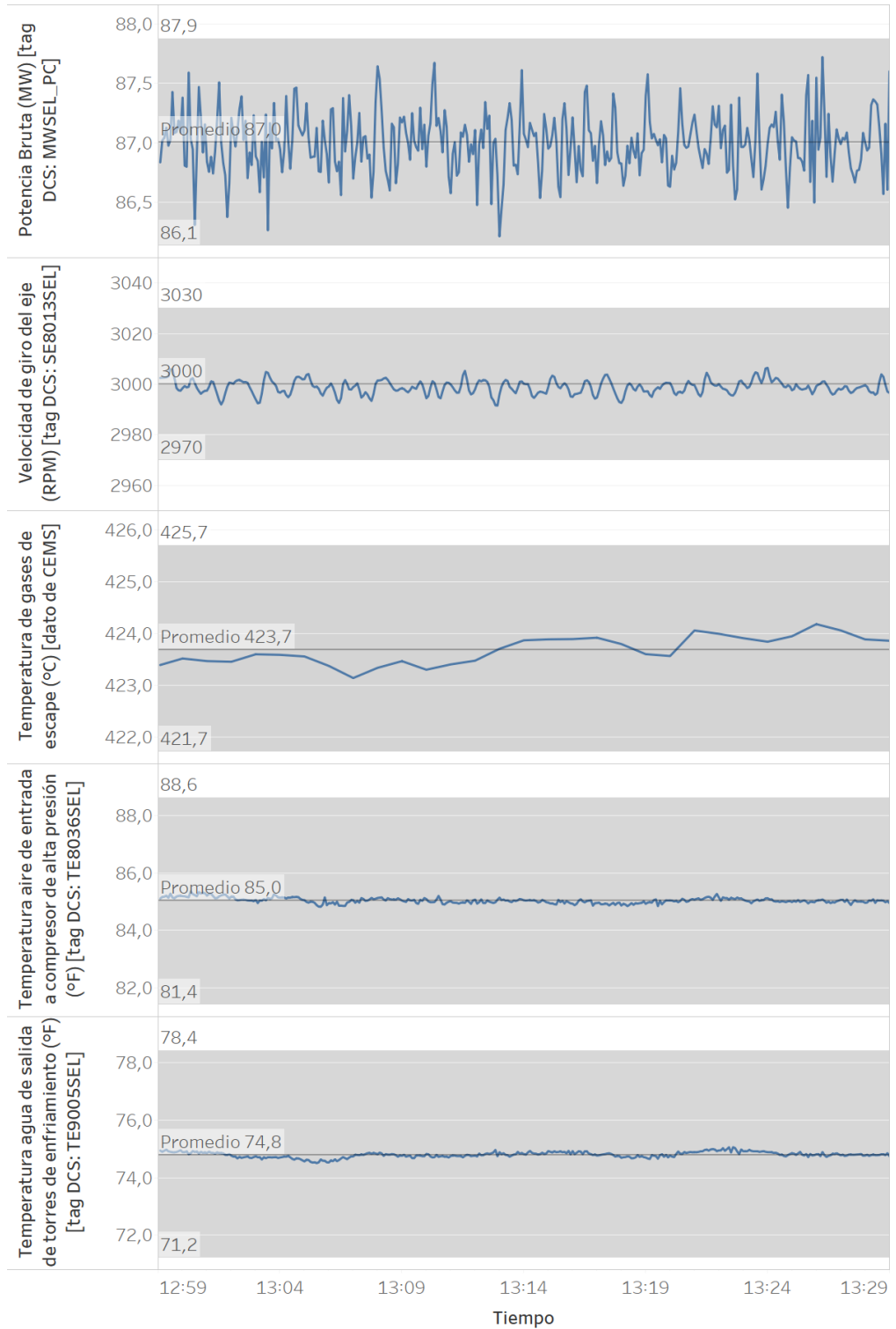


Figura 5: Criterios de estabilidad para estado de carga a 87 MW, E6. En gris se muestran los límites de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Ninguna variable supera los límites.

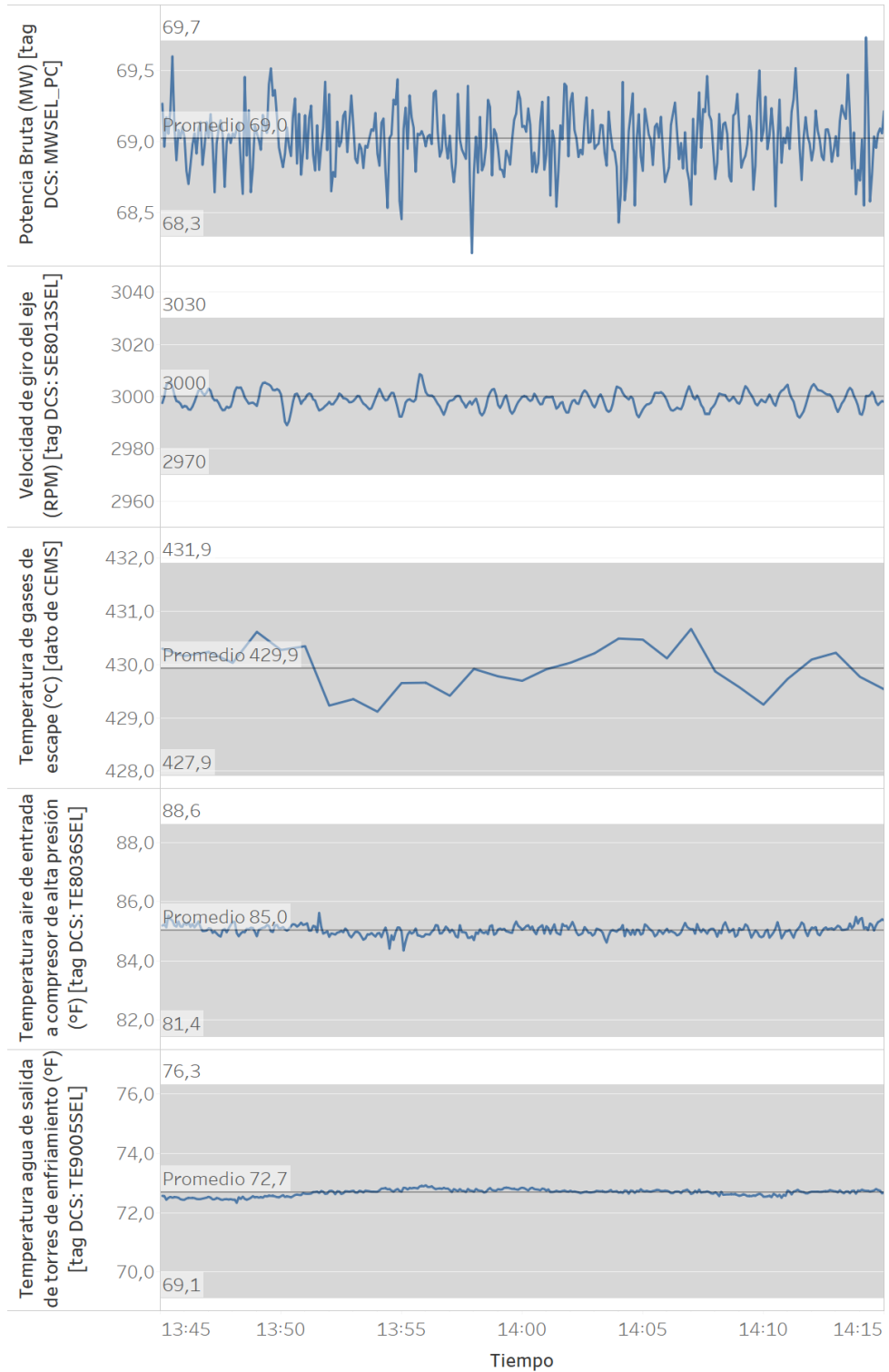


Figura 6: Criterios de estabilidad para estado de carga a 69 MW, E5. En gris se muestran los límites de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Se observa que la potencia bruta sobrepasa los límites un 0,6% del tiempo.

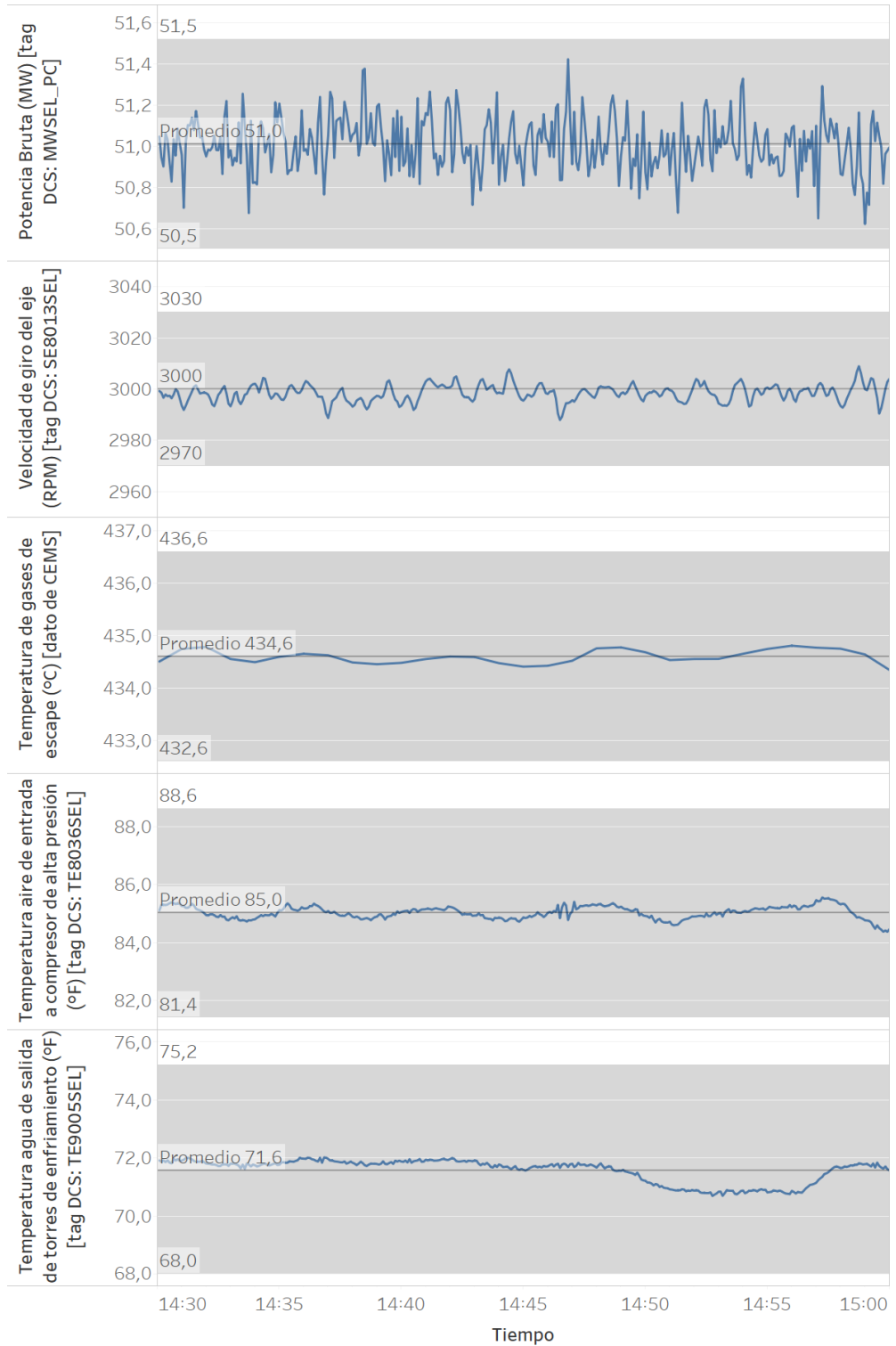


Figura 7: Criterios de estabilidad para estado de carga a 51 MW, E4. En gris se muestran los límites de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Se observa que la potencia bruta sobrepasa los límites un 7,5% del tiempo. Ninguna variable supera los límites.

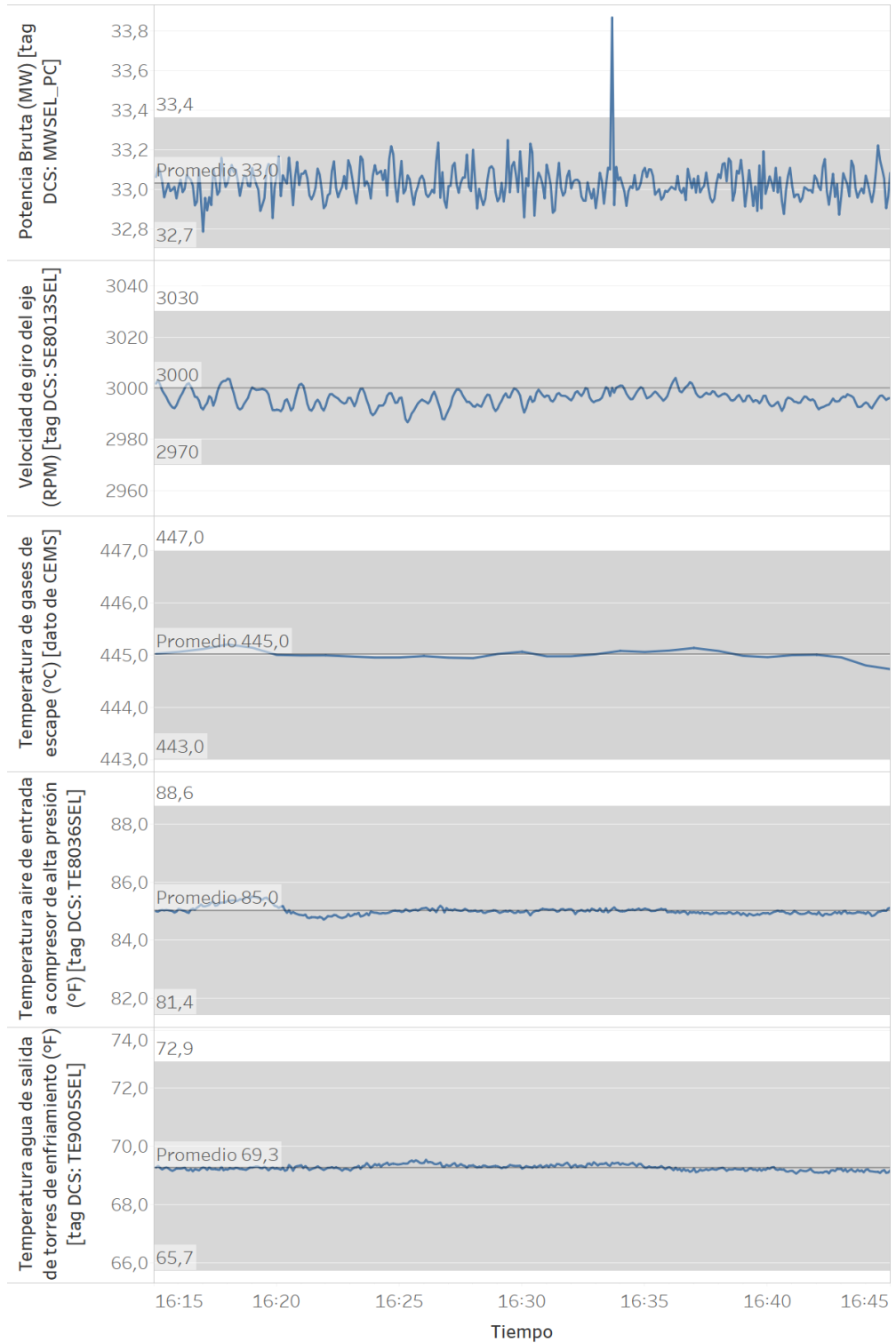


Figura 8: Criterios de estabilidad para estado de carga a 33 MW, E3. En gris se muestran los límites de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Se observa que la potencia bruta sobrepasa los límites un 0,3% del tiempo.



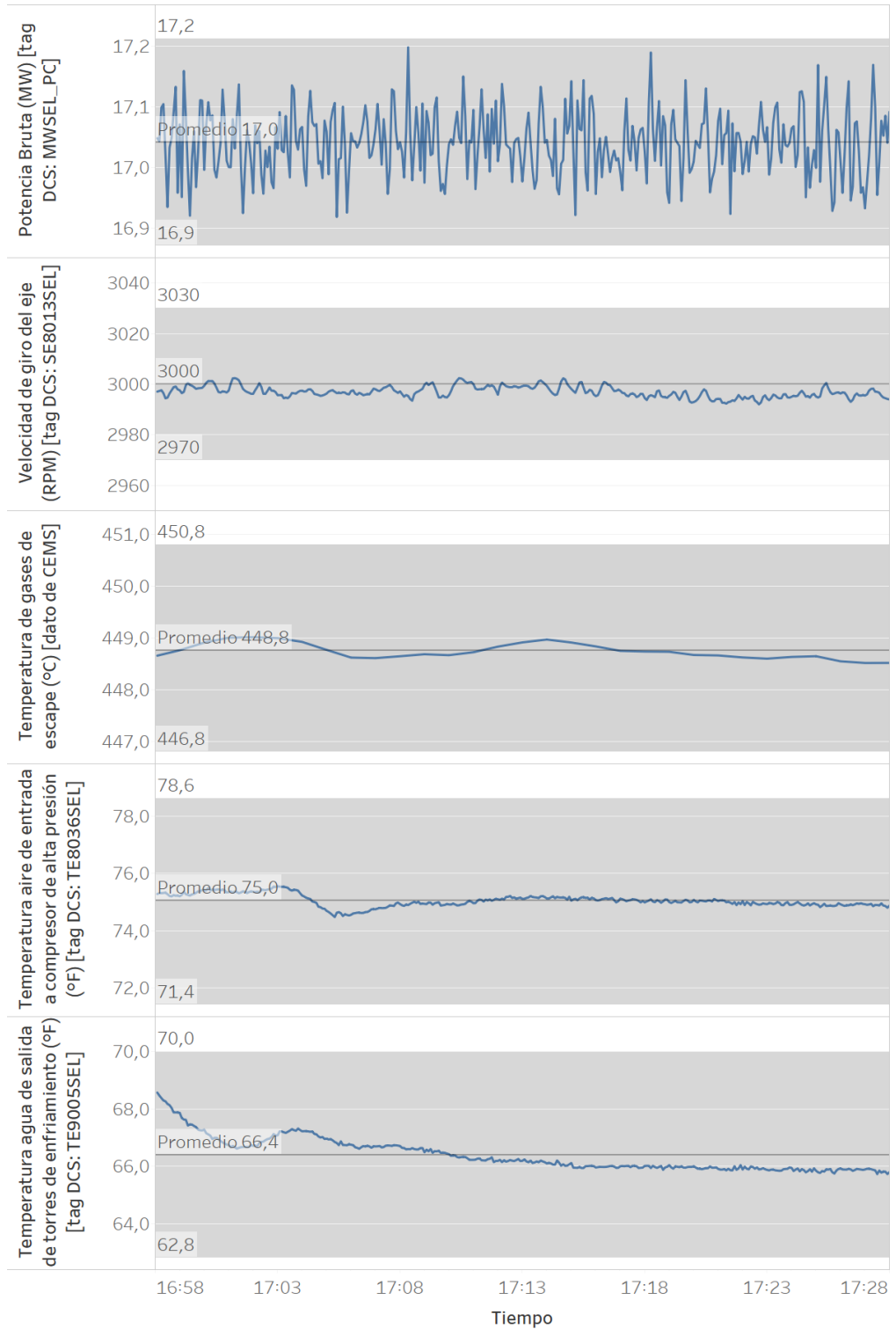


Figura 9: Criterios de estabilidad para estado de carga a 17 MW, E2. En gris se muestran los límites de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Se observa que la potencia bruta sobrepasa los límites un 7,5% del tiempo. Ninguna variable supera los límites.

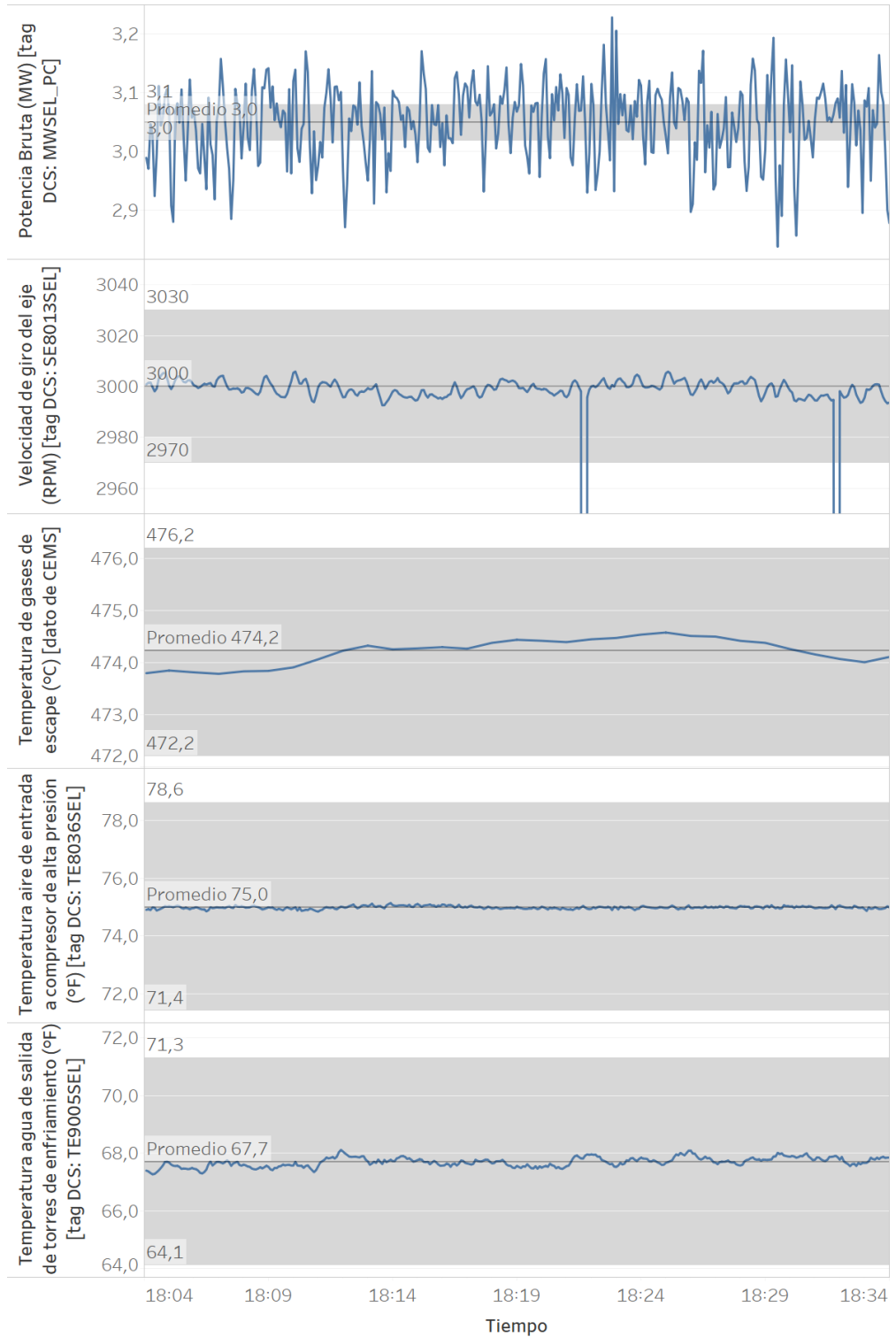




Figura 10: Criterios de estabilidad para estado de carga a 3 MW, E1. En gris se muestran los límites de estabilidad definidos en la Tabla 6 del Protocolo de Pruebas. Se observa que la potencia bruta sobrepasa los límites un 65% del tiempo debido a que es la potencia mínima de operación de la turbina.


## Anexo C. Actas de prueba CEN Los Pinos

Descripción	Archivo
Actas de prueba CEN Los Pinos	 Acta de pruebas





## Anexo D. Operación de las válvulas VBV

Descripción	Archivo
Operación de las válvulas VBV	 Intercooler and VBV system descript


## Anexo E. Operación manual de torres de enfriamiento

Descripción	Archivo
Operación manual de torres de enfriamiento	 Guia de maniobra verificacion puesta €

## Anexo F. Información entregada por Central Los Pinos para el cálculo del CEN y CEN corregido, y hojas de cálculo de trabajo de Laborelec

Descripción	Archivo
Información entregada por Central Los Pinos para el cálculo del CEN y CEN corregido	 Datos Prueba CEN Los Pinos
Informe análisis de combustible Laboratorio OTI	 Analisis de combustible Laborat
Base de datos utilizada por Laborelec	 Base de datos
Cálculo de incertidumbre expandida	 Calculo de incertidumbre expar

## Anexo G. Curvas de desempeño para la determinación de los factores de corrección para cada estado de carga

Descripción	Archivo
Curvas de desempeño	 Curvas de desempeño a carga

## Anexo H. Lista de Difusión

Lista de Difusión			
Destinatario		Dirección	Medio
<b>Externo</b>			
Gretchen Zbinden	<i>Coordinador Eléctrico Nacional</i>	gretchen.zbinden@coordinador.cl	PDF enviado por Thomas Grandry
Eduardo Verdugo	<i>Coordinador Eléctrico Nacional</i>	eduardo.verdugo@coordinador.cl	
Auditoría	<i>Coordinador Eléctrico Nacional</i>	auditoria@coordinador.cl	
<b>Interno</b>			
Antonio Alarcon Candia		antonio.alarcon@engie.com	SD link
Thomas Grandry		thomas.grandry@engie.com	SD link
Cristian Junge		cristian.junge@engie.com	SD link
Alvaro Silva		alvaro.silva.v@engie.com	SD link
Pieter-Jan Stockmans		pieter-jan.stockmans@engie.com	SD link
Sigrid Gijbels		sigrid.gijbels@engie.com	SD link