

## INFORME TÉCNICO

**PROYECTO : PRUEBAS DE POTENCIA MÁXIMA  
UNIDADES GENERADORAS DE CENTRAL  
LAS LAJAS, ALTO MAIPO**

**PARA : COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL**

**OT. : 2021-289-1**

**Dr. Ing. Cristian G. Rodríguez  
Jefe de Proyecto**

**Departamento de Ingeniería Mecánica  
Universidad de Concepción**

Versión	Fecha	Autor	Observaciones
1	11 / 03 / 2022	C. Rodríguez	Para revisión y comentarios del CEN y Alto Maipo
2	13 / 04 / 2022	C. Rodríguez	Con correcciones e información adicional solicitada por el CEN

## Información general

Fecha de reunión de inicio	12 / 10 / 2021
Fecha de envío protocolo de pruebas, versión 1	27 / 10 / 2021
Fecha de envío protocolo de pruebas, versión 2	23 / 11 / 2021
Fecha de pruebas en unidad n° 1	25 / 01 / 2022
Fecha de pruebas en unidad n° 2	24 / 02 / 2022
Fecha de pruebas en unidades n° 1 y n° 2	07 / 03 / 2022
Fecha de envío de informe, versión 1	11 / 03 / 2022
Fecha de envío de informe, versión 2	12 / 04 / 2022

Informe Elaborado por: Experto Técnico, Dr. Ing. Cristian Rodríguez Godoy, [crrodrig@udec.cl](mailto:crrodrig@udec.cl)

## Índice

Resumen Ejecutivo .....	3
1. Introducción .....	4
1.1. Antecedentes .....	4
1.2. Objetivos .....	5
1.3. Alcances.....	5
1.4. Descripción de los equipos principales.....	6
2. Desarrollo de las pruebas de potencia máxima .....	8
2.1. Responsables de las pruebas.....	8
2.2. Medición y registro de variables operacionales.....	9
2.3. Secuencia de operación durante las pruebas de potencia máxima .....	9
3. Resultados de las pruebas de potencia máxima .....	10
3.1. Potencia Bruta medida y corregida.....	10
3.2. Potencia Neta medida y corregida.....	12
Anexo 1 Referencias .....	14
Anexo 2 Disposición general.....	15
Anexo 3 Curva de colina .....	17
Anexo 4 Diagramas unilineales.....	18
Anexo 5 Mediciones .....	22
Anexo 6 Acta de Pruebas.....	23

## Resumen Ejecutivo

Las pruebas de potencia máxima en las unidades de central Las Lajas se efectuaron los días 25 de enero de 2022, 24 de febrero de 2022 y 7 de marzo de 2022.

Durante las pruebas fue posible operar las unidades bajo las condiciones definidas en el protocolo de pruebas, confeccionado según los requerimientos del Anexo Técnico del Coordinador Eléctrico Nacional [1].

Una vez realizadas las pruebas es posible concluir que la potencia máxima bruta, la potencia máxima bruta corregida, la potencia máxima neta y la potencia máxima neta corregida son las siguientes:

### Unidad n° 1, Central Las Lajas

- Potencia máxima bruta 138,86 MW
- Potencia máxima bruta corregida 138,86 MW
  
- Potencia máxima neta **138,75 MW**
- Potencia máxima neta corregida **138,75 MW**

### Unidad n° 2, Central Las Lajas

- Potencia máxima bruta 138,81 MW
- Potencia máxima bruta corregida 138,81 MW
  
- Potencia máxima neta **138,71 MW**
- Potencia máxima neta corregida **138,71 MW**

### Unidades n° 1 y n° 2, Central Las Lajas

- Potencia máxima bruta 100,51 MW
- Potencia máxima bruta corregida 100,51 MW
  
- Potencia máxima neta **100,30 MW**
- Potencia máxima neta corregida **100,30 MW**

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

El “Anexo Técnico: Pruebas de Potencia Máxima en Unidades Generadoras” [1] publicado por la Comisión Nacional de Energía en 2016, establece la metodología para efectuar pruebas que permitan verificar la Potencia Máxima de unidades generadoras. Para llevar a cabo esta verificación, el Coordinador Eléctrico Nacional gestiona las pruebas que son efectuadas por un Experto Técnico. El presente documento corresponde al Informe Técnico de las pruebas de potencia máxima efectuadas en la central Las Lajas.

“La central Las Lajas se encuentra en el sector alto del río Maipo y considera el aprovechamiento de las aguas de la zona alta del río Volcán, del río Yeso, de las aguas turbinadas por la central Alfalfal y de la cuenca intermedia del río Colorado.

La central Las Lajas, diseñada para un caudal de 65 m<sup>3</sup>/s recibe las aguas generadas de las centrales Alfalfal y Alfalfal II además de los aportes de la cuenca intermedia del río Colorado ubicada entre las bocatomas de la central Alfalfal (Colorado y Olivares) y la actual bocatoma de la Central Maitenes. A ello se agregan el aporte de la quebrada Aucayes.

La central Las Lajas considera una cámara de carga, la cual funciona, además, como estanque de contrapunta de la central Alfalfal II. A este estanque, ubicado en la ribera derecha del río Colorado, afluyen las aguas provenientes de la central Alfalfal lo que se realiza mediante una obra de empalme al canal de evacuación de ésta. Las aguas derivadas desde el Canal 1 (existente) de la Central Maitenes, son conducidas por un canal y desarenadas en una obra ubicada en la ribera izquierda del río Colorado. El cruce hacia la cámara de carga de Las Lajas se logra mediante un sifón bajo el río.

La aducción de la central Las Lajas se inicia en la cámara de carga del mismo nombre mediante un dueto de hormigón en presión. Este conducto cruza el río Colorado mediante sifón y enlaza con el túnel Las Lajas, que tiene escurrimiento en presión. El túnel Las Lajas recibe el aporte proveniente del túnel de descarga de la central Alfalfal II, además este túnel que recibe en su recorrido el aporte del estero Aucayes, posee una chimenea de equilibrio y termina en un pique de presión que alimenta las turbinas. La casa de máquinas está ubicada hacia la ribera izquierda del río Colorado en una caverna excavada en el macizo rocoso. El equipamiento de generación cuenta con dos turbinas de 6 chorros, velocidad 300 rpm, con un caudal nominal de 32,5 m<sup>3</sup>/s cada unidad y una caída bruta de 485 m.

El túnel de descarga de la Central Las Lajas descarga sus aguas directamente en el río Maipo. Tiene una longitud de 13,3 km y una sección herradura de 35 m<sup>2</sup> con escurrimiento a pelo libre.” [2]

La ubicación de la central Las Lajas se muestra en la Fig. 1.1. El acceso se encuentra en el kilómetro 7,6 camino a Los Maitenes.

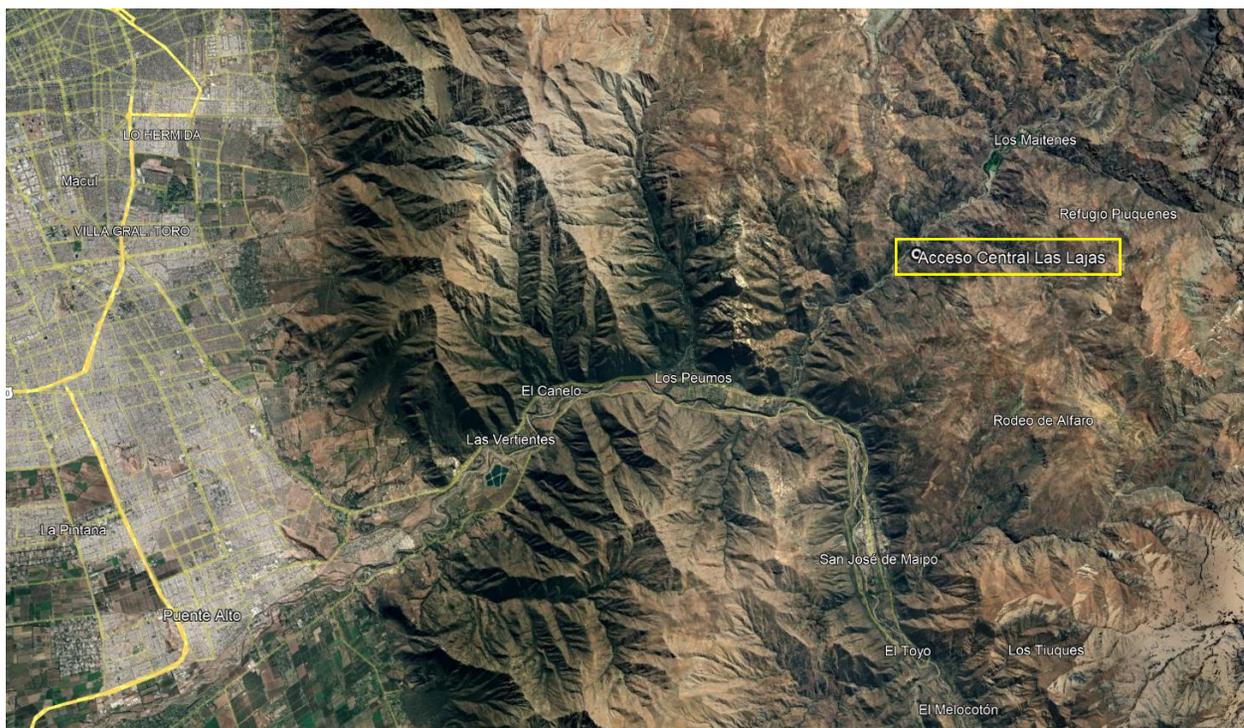


Figura 1.1. Ubicación de central Las Lajas

## 1.2. Objetivos

El Informe Técnico tiene como objetivo:

- Verificar la potencia máxima de las unidades generadoras de central Las Lajas

## 1.3. Alcances

El presente informe describe las pruebas de potencia máxima para las unidades de central Las Lajas. Estas pruebas son:

- Potencia máxima en unidad generadora n° 1
- Potencia máxima en unidad generadora n° 2
- Potencia máxima operando las unidades generadoras n° 1 y n° 2 en forma simultánea

Estas tres pruebas se llevan a cabo con metodologías similares, por lo que el presente informe describe las pruebas y entrega los resultados de las tres pruebas en una misma sección, pero en tablas diferentes.

Debido a que no es posible contar con el caudal necesario para operar a la potencia nominal / máxima del diseño de las unidades generadoras, las pruebas de potencia máxima se efectuaron a la máxima potencia que permitiera operar la unidad según los requerimientos del anexo técnico. Esta restricción se origina principalmente en la necesidad de generar la potencia máxima de prueba durante al menos cinco horas continuas. Por este motivo, no fue posible operar las unidades y la central a la potencia máxima que podría operar en el caso que se dispusiera del caudal suficiente. El caudal disponible difiere del caudal correspondiente a la potencia máxima / nominal de diseño, debido a que el diseño original consideraba un caudal mayor, que con las condiciones hidrológicas actuales no está disponible.

#### **1.4. Descripción de los equipos principales**

La central Las Lajas está conformada por dos unidades generadoras. Las dos unidades generadoras tienen el mismo diseño. El diseño corresponde a una turbina Pelton vertical conectada rígidamente a un generador sincrónico vertical de polos salientes. En la Tabla 1.1 se resumen las características principales del generador y turbina. En el Anexo 2 se muestra un plano general de las unidades. En la Fig. 1.2 se muestran fotos de la casa de máquinas donde se ubican las turbinas.

En la Tabla 1.1 se muestra que la potencia nominal / máxima de la unidad generadora de central Las Lajas es de 142,2 MW y 148,5 MW respectivamente, y corresponden a potencias de diseño de la turbina. La curva de colina de la turbina se muestra en el Anexo 3. Para llegar a estas potencias de operación, es necesario contar con el caudal de agua suficiente. Sin embargo, debido a que actualmente los caudales son menores que los necesarios para potencia nominal, no fue posible operar las unidades a la potencia máxima de diseño. La disponibilidad de caudal, sumado al requerimiento de cinco horas de operación continua a potencia máxima, significó que las pruebas se debieran efectuar a una potencia menor que la potencia nominal / máxima de diseño. En este caso, para una unidad se pudo asegurar las cinco horas de funcionamiento en

138,7 MW. Mientras que para las dos unidades operando simultáneamente se pudo asegurar cinco horas de funcionamiento en 100,5 MW.



Figura 1.2. Fotos de central Las Lajas

Tabla 1.1. Características principales de las unidades generadoras de central Las Lajas

Generador	
Número de polos	20
Potencia nominal / máxima	154000 / 162500 kVA
Tensión nominal	15000 V
Corriente nominal / máxima	5927 / 6255 A
Frecuencia	50 Hz
Factor de potencia	0,90 cos $\phi$
Velocidad nominal	300 rev/min
Tensión de excitación	184 V
Corriente de excitación	1917 A

Turbina	
Potencia nominal	142,2 MW
Potencia máxima	148,5 MW
Número de inyectores	6
Velocidad nominal	300 rev/min
Altura neta nominal	486,61 m

En el Anexo 4, Fig. A.4.1, se muestra el punto del sistema interconectado al cual se inyecta la potencia de central Las Lajas, a través de la subestación Alto Maipo. En el Anexo 4, Fig. A.4.2, se muestra el diagrama unilíneal de la central donde se muestra el punto de medición de potencia bruta en bornes del generador, y de potencia de servicios auxiliares de cada unidad.

## 2. Desarrollo de las pruebas de potencia máxima

Para la definición de las pruebas se consideraron los requisitos indicados en el:

- Anexo Técnico: Potencia Máxima en Unidades Generadoras [1]

En el caso de turbinas hidráulicas, el Anexo Técnico indica que se deberá referir a la norma internacional aplicable a turbinas hidráulicas:

- Norma internacional CEI/IEC 60041 “Pruebas de campo para determinar funcionamiento de turbinas hidráulicas, bombas de almacenamiento y turbinas-bombas”

Los aspectos indicados en el Anexo Técnico y en la norma CEI/IEC 60041 fueron considerados para la realización de las pruebas de potencia máxima. Le empresa generadora entregó la información necesaria para la correcta preparación de las pruebas. El cumplimiento de los requerimientos del Anexo Técnico, de la CEI/IEC 60041 y la entrega oportuna de la información solicitada a la empresa generadora, permitieron planificar y preparar correctamente las pruebas.

### 2.1. Responsables de las pruebas

En la preparación de las pruebas de potencia máxima participaron:

- Coordinador Eléctrico Nacional
- Empresa Generadora
- Experto Técnico

#### Coordinador Eléctrico Nacional

- fue el “responsable de coordinar las pruebas de Potencia Máxima de acuerdo a la programación de la operación y las condiciones del sistema” considerando el protocolo de pruebas

## **Empresa Generadora**

- fue la “responsable de coordinar personal a su mando en la operación de la central generadora, y de corroborar que exista personal calificado en la central de forma de poder efectuar íntegramente la prueba”

## **Experto Técnico**

- fue el “responsable de desarrollar el protocolo de pruebas de acuerdo a lo indicado en el Artículo 25” y supervisó en terreno las pruebas de potencia máxima

## **2.2. Medición y registro de variables operacionales**

Las pruebas de potencia máxima en Las Lajas se realizaron en unidades generadoras recientemente comisionadas. Por este motivo, la instrumentación de las unidades se encuentra recientemente verificada, y con certificados de calibración vigentes (estos documentos fueron considerados para la elaboración del protocolo de pruebas).

Antes de la realización de las pruebas, se solicitó a la empresa generadora enviar los datos solicitados en el Anexo 1 del Protocolo de Pruebas de manera de revisar y verificar la descarga de los datos en forma adecuada para efectuar la evaluación. Esta prueba de envío de datos se realizó una vez habilitadas las variables en el sistema de control, y una vez operativa la unidad. Las mediciones efectuadas se encuentran en el Anexo 5.

## **2.3. Secuencia de operación durante las pruebas de potencia máxima**

Las pruebas se efectuaron tomando en consideración el protocolo de pruebas. En cada una de las pruebas se operaron primero las unidades para estabilización de temperaturas y variables operacionales. Una vez lograda la estabilización, se registró en el acta de pruebas la hora en que se llegó a la estabilización. Después de la estabilización se dio inicio al periodo de prueba. En el Protocolo de Pruebas se definieron como 5 horas el tiempo mínimo requerido para cada prueba. El periodo de prueba en las tres pruebas de potencia máxima fue de al menos 5 horas de operación continua en forma ininterrumpida lo que requirió de una coordinación precisa entre el Coordinador, Coordinado y la gestión de las aguas provenientes del embalse el Yeso. Una vez terminado el periodo de pruebas se registró en el acta la hora de finalización de las pruebas. En el Anexo 6 de este Informe se adjuntan las actas de las tres pruebas efectuadas en la central Las Lajas.

### 3. Resultados de las pruebas de potencia máxima

Durante las pruebas fue posible evidenciar que todos los dispositivos de control y protecciones, incluyendo las alarmas, estaban habilitados y operativos.

Las pruebas de potencia máxima se realizaron con un factor de potencia de 0,95 por lo que no fue necesario corregir los valores de potencia obtenidos. Las pruebas de potencia máxima fueron realizadas en condiciones operativas nominales, manteniendo el flujo de agua estable, sin sobrepasar los límites de diseño, a velocidad nominal de rotación de la turbina y a la altura bruta de la central, de manera que no fuera necesario efectuar correcciones.

Durante las pruebas las temperaturas en los cojinetes de la turbina y del generador, y las temperaturas de los devanados del estator no excedieron los valores fijados en el protocolo de prueba de recepción de las unidades generadoras. No se operaron las unidades más allá de los límites operativos de las variables indicadas por el fabricante en las especificaciones de las unidades.

#### 3.1. Potencia Bruta medida y corregida

En las Tablas 3.1 a 3.3 se muestran las desviaciones de las variables principales que se deben mantener estabilizadas durante las pruebas de potencia máxima. Estas desviaciones fueron calculadas considerando la totalidad del tiempo de pruebas, es decir, al menos 5 horas. En las tablas se observa que las variaciones se ajustan a los límites exigidos por el Anexo Técnico, lo que permite validar la potencia máxima medida. No es necesario aplicar una corrección a los valores de potencia debido a que durante todo el periodo de pruebas fue posible operar con el factor de potencia requerido en el Anexo Técnico. Esto, debido a la corrección:

$$P_{B,c} = P_B \frac{\eta_{FP\ 0,95}}{\eta_{FP\ med}}$$

Donde:  $P_{B,c}$  es la potencia bruta corregida;  $P_B$  es la potencia bruta medida;  $\eta_{FP\ 0,95}$  es la eficiencia del generador con factor de potencia de 0,95 de referencia para las pruebas, y;  $\eta_{FP\ med}$  es la eficiencia del generador operando con el factor de potencia medido. Debido a que en este caso  $\eta_{FP\ med}$  corresponde a  $\eta_{FP\ 0,95}$ , entonces, para las pruebas de central Las Lajas:

$$P_{B,c} = P_B \frac{\eta_{FP\ 0,95}}{\eta_{FP\ 0,95}}$$

$$P_{B,c} = P_B$$

Tabla 3.1. Estabilidad de variables operacionales durante las pruebas, **unidad n° 1** en operación (unidad n° 2 detenida), central Las Lajas

	Valor promedio en 5 horas	Desviación estándar en 5 horas	Máximo en 5 horas	Mínimo en 5 horas	Desviación respecto al promedio	Cumple criterio
Potencia bruta (MW)	138,86	0,17	139,65	137,46	1,00%	✓
Factor de potencia	0,95	0,00	0,95	0,94	0,54%	✓
Velocidad de rotación (rev/min)	299,99	0,27	300,86	299,07	0,02%	✓
Posición media inyectores (%)	75,8	1,0	77,2	73,33	3,25%	✓
Nivel tubería (m)	1312,8	2,2	1318,2	1311,6	0,41%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	138,86	0,17	139,65	137,46	1,00%	✓

\*Nota: no fue necesario corregir la potencia bruta debido a que se logró operar con factor de potencia promedio 0,95

Tabla 3.2. Estabilidad de variables operacionales durante las pruebas, **unidad n° 2** en operación (unidad n° 1 detenida), central Las Lajas

	Valor promedio en 5 horas	Desviación estándar en 5 horas	Máximo en 5 horas	Mínimo en 5 horas	Desviación respecto al promedio	Cumple criterio
Potencia bruta (MW)	138,81	0,19	139,35	137,05	1,27%	✓
Factor de potencia	0,95	0,00	0,96	0,94	0,98%	✓
Velocidad de rotación (rev/min)	300,26	0,54	302,94	298,91	0,05%	✓
Posición media inyectores (%)	75,6	0,8	77,66	73,6	2,74%	✓
Nivel tubería (m)	1313,4	1,5	1314,4	1311,1	0,18%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	138,81	0,19	139,35	137,05	1,27%	✓

\*Nota: no fue necesario corregir la potencia bruta debido a que se logró operar con factor de potencia promedio 0,95

Tabla 3.3. Estabilidad de variables operacionales durante las pruebas, **unidades n° 1 y n° 2** en operación en forma simultánea, central Las Lajas

	Valor promedio en 5 horas	Desviación estándar en 5 horas	Máximo en 5 horas	Mínimo en 5 horas	Desviación respecto al promedio	Cumple criterio
Potencia bruta (MW)	100,51	0,13	100,99	99,83	0,68%	✓
Factor de potencia	0,95	0,00	0,95	0,94	0,54%	✓
Velocidad de rotación (rev/min)	300,29	0,44	301,44	298,91	0,03%	✓
Posición media inyectores (%)	41,9	0,1	42,1	41,7	0,64%	✓
Nivel tubería (m)	1324,8	0,0	1324,8	1324,8	0,00%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	100,51	0,13	100,99	99,83	0,68%	✓

\*Nota: no fue necesario corregir la potencia bruta debido a que se logró operar con factor de potencia promedio 0,95

### 3.2. Potencia Neta medida y corregida

Para la determinación de la potencia neta, se considera la potencia consumida por los servicios auxiliares, la que fue determinada a partir de las variables medidas en los transformadores de servicios auxiliares. Es decir:

$$P_N = P_B - P_{SSAA}$$

Donde:  $P_N$  es la potencia neta;  $P_B$  es la potencia bruta; y  $P_{SSAA}$  es la potencia de los servicios auxiliares. En la operación de las unidades de central Las Lajas, no existen consumos adicionales a los considerados en los servicios auxiliares.

Para la potencia neta corregida se tiene que:

$$P_{N,c} = P_{B,c} - P_{SSAA}$$

Donde:  $P_{N,c}$  es la potencia neta corregida;  $P_{B,c}$  es la potencia bruta corregida; y  $P_{SSAA}$  es la potencia de los servicios auxiliares. Como se mostró en la sección 3.1:  $P_{B,c} = P_B$ , por lo tanto:  $P_{N,c} = P_N$ . En las Tablas 3.4 a 3.6 se muestran los valores de potencia neta medida y corregida.

Tabla 3.4. Estabilidad de variables operacionales durante las pruebas, **unidad n° 1** en operación (unidad n° 2 detenida), central Las Lajas

	Valor promedio en 5 horas	Desviación estándar en 5 horas	Máximo en 5 horas	Mínimo en 5 horas	Desviación respecto al promedio	Cumple criterio
Potencia bruta (MW)	138,86	0,17	139,65	137,46	1,00%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	138,86	0,17	139,65	137,46	1,00%	✓
Potencia serv. auxiliares (MW)	0,11	0,00	0,12	0,11	N/A	N/A
Potencia neta (MW)	138,75	0,17	139,54	137,35	1,01%	✓
Potencia neta corregida (MW)	<b>138,75</b>	0,17	139,54	137,35	1,01%	✓

\*Nota: no fue necesario corregir la potencia bruta debido a que se logró operar con factor de potencia promedio 0,95

Tabla 3.5. Estabilidad de variables operacionales durante las pruebas, **unidad n° 2** en operación (unidad n° 1 detenida), central Las Lajas

	Valor promedio en 5 horas	Desviación estándar en 5 horas	Máximo en 5 horas	Mínimo en 5 horas	Desviación respecto al promedio	Cumple criterio
Potencia bruta (MW)	138,81	0,19	139,35	137,05	1,27%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	138,81	0,19	139,35	137,05	1,27%	✓
Potencia serv. auxiliares (MW)	0,10	0,00	0,11	0,10	N/A	N/A
Potencia neta (MW)	138,71	0,19	139,24	136,95	1,27%	✓
Potencia neta corregida (MW)	<b>138,71</b>	0,19	139,24	136,95	1,27%	✓

\*Nota: no fue necesario corregir la potencia bruta debido a que se logró operar con factor de potencia promedio 0,95

Tabla 3.6. Estabilidad de variables operacionales durante las pruebas, **unidades n° 1 y n° 2** en operación en forma simultánea, central Las Lajas

	Valor promedio en 5 horas	Desviación estándar en 5 horas	Máximo en 5 horas	Mínimo en 5 horas	Desviación respecto al promedio	Cumple criterio
Potencia bruta (MW)	100,51	0,13	100,99	99,83	0,68%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	100,51	0,13	100,99	99,83	0,68%	✓
Potencia serv. auxiliares (MW)	0,21	0,00	0,22	0,21	N/A	N/A
Potencia neta (MW)	100,30	0,13	100,78	99,62	0,68%	✓
Potencia neta corregida (MW)	<b>100,30</b>	0,13	100,78	99,62	0,68%	✓

\*Nota: no fue necesario corregir la potencia bruta debido a que se logró operar con factor de potencia promedio 0,95

## **Anexo 1**

### **Referencias**

[1] Anexo Técnico: Pruebas de Potencia Máxima en Unidades Generadoras. Comisión Nacional de Energía

[2] Descripción del proyecto en página web <https://conocealtomaipo.cl/proyecto/>. Consultado el 6 de abril de 2022, 14:00.