

INFORME TÉCNICO

**PROYECTO : PRUEBAS DE POTENCIA MÁXIMA
UNIDADES GENERADORAS DE CENTRAL
ALFALFA II, 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	14 / 03 / 2022	C. Rodríguez	(unidad n° 2) Para revisión y comentarios del CEN y Alto Maipo
2	08 / 04 / 2022	C. Rodríguez	(unidad n° 1 y 2) Para revisión y comentarios del CEN y Alto Maipo
3	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	31 / 03 / 2022
Fecha de pruebas en unidad n° 2	24 / 02 / 2022
Fecha de pruebas en unidades n° 1 y n° 2	30 / 03 / 2022
Fecha de envío de informe, versión 1 (unidad n° 2)	14 / 03 / 2022
Fecha de envío de informe, versión 2 (unidad n° 1 y central)	08 / 04 / 2022
Fecha de envío de informe, versión 3	12 / 04 / 2022

Informe Elaborado por: Experto Técnico, Dr. Ing. Cristian Rodríguez Godoy, 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	7
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	9
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
Anexo 6 Mediciones	27
Anexo 7 Eficiencia del generador.....	28

Resumen Ejecutivo

Las pruebas de potencia máxima en las unidades de central Alfalfal II se efectuaron los días 24 de febrero de 2022, 30 y 31 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 Alfalfal II

- Potencia máxima bruta 130,53 MW
- Potencia máxima bruta corregida 129,62 MW

- Potencia máxima neta **130,44 MW**
- Potencia máxima neta corregida **129,53 MW**

Unidad n° 2, Central Alfalfal II

- Potencia máxima bruta 129,96 MW
- Potencia máxima bruta corregida 129,96 MW

- Potencia máxima neta **129,85 MW**
- Potencia máxima neta corregida **129,85 MW**

Unidades n° 1 y n° 2 en operación simultánea, Central Alfalfal II

- Potencia máxima bruta 115,02 MW
- Potencia máxima bruta corregida 115,02 MW

- Potencia máxima neta **114,93 MW**
- Potencia máxima neta corregida **114,93 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 Alfalfal II.

“La Central Alfalfal II está diseñada para un caudal de 27 m³/s, recibe las aguas captadas desde esteros ubicados en la parte alta del río Volcán, las que se conducen hasta el valle del río Yeso a través del túnel El Volcán. En el sector alto del río Volcán, se captan hasta un máximo de 12,8 m³/s, por medio de 4 bocatomas que interceptan los diversos brazos de esteros que confluyen y forman la rama norte del río Volcán, el que a su vez descarga en el río Maipo. Los cuatro esteros captados son: Engorda, Colina, Las Placas y El Morado. El caudal recolectado se conduce hasta el túnel El Volcán por medio de un acueducto enterrado. Los caudales captados son desripados en los sitios de las bocatomas y desarenados en conjunto, antes de entrar al túnel Volcán. El túnel Volcán recoge las aguas captadas en la zona alta del río Volcán y las conduce hasta el valle del río Yeso, donde se recibe el aporte de este último a través de un dueto enterrado que se desarrolla entre la bocatoma ubicada en el río Yeso y un pozo de toma ubicado a la salida del túnel Volcán que reúne ambos caudales.

Desde el pozo de toma el flujo es conducido hasta el túnel Alfalfal II a través de un conducto en presión hasta el túnel de aducción de la central Alfalfal II el cual tiene una longitud de 13.600 m hasta alcanzar el extremo superior del pique en presión.

Ligeramente aguas arriba del comienzo del pique, se ubica la chimenea de equilibrio y la cámara de carga de la Central. La altura bruta de caída se estima en 1.146 m. La casa de máquinas está instalada en una caverna excavada en el macizo rocoso en un sector ubicado hacia el oeste del estero Aucayes, en el valle del río Colorado.

El túnel de descarga de la central Alfalfal II tiene una longitud de aproximadamente 2,5 Km y entrega su caudal al túnel de aducción a la central Las Lajas. El caudal generado por la Central Alfalfal II puede direccionarse hacia la casa de máquinas de la central Las Lajas, o bien, hacia la cámara de carga de esta última, ubicado en la orilla derecha del río Colorado, en ambos casos vía el túnel antes mencionado.” [2]

La ubicación de la central se muestra en la Fig. 1.1. El acceso se encuentra en el kilómetro 16,5 después del desvío del camino al Volcán en dirección a Los Maitenes.

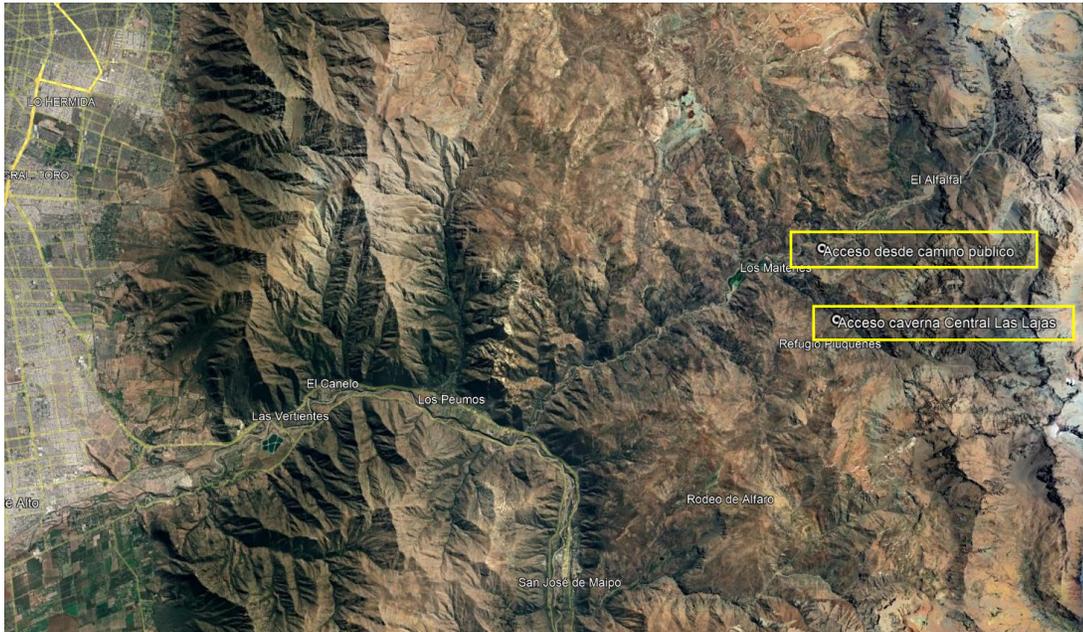


Figura 1.1. Ubicación de central Alfalfal II

1.2. Objetivos

El Informe Técnico tiene como objetivo:

- Verificar la potencia máxima de las unidades generadoras de central Alfalfal II

1.3. Alcances

El presente informe describe las pruebas de potencia máxima para las unidades de central Alfalfal II. 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 Alfalfal II 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.



Figura 1.2. Fotos de central Alfalfal II

En la Tabla 1.1 se muestra que la potencia nominal / máxima de la unidad generadora de central Alfalfal II es de 139,8 MW y 154,2 MW respectivamente, y corresponden a

las 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 considerados en el diseño, 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 máxima de diseño. En este caso, para una unidad se pudo asegurar las cinco horas de funcionamiento en 130,5 MW. Mientras que para las dos unidades operando simultáneamente se pudo asegurar cinco horas de funcionamiento en 115,0 MW.

En el Anexo 4, Fig. A.4.1, se muestra el punto del sistema interconectado al cual se inyecta la potencia de central Alfalfal II, 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.

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

Generador	
Número de polos	10
Potencia nominal / máxima	162100 / 170000 kVA
Tensión nominal	15000 V
Corriente nominal	6239 A
Frecuencia	50 Hz
Factor de potencia nominal	0,90 $\cos \phi$
Velocidad nominal	600 rev/min

Turbina	
Potencia nominal	139,8
Potencia máxima	154,2
Número de inyectores	6
Velocidad nominal	600 rev/min
Altura neta nominal	1150,78 m

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 Alfalfal II 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 Alfalfal II.

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 para la unidad n° 2, y para las unidades n° 1 y n° 2 en forma simultánea se realizaron con un factor de potencia de 0,95 por lo que no fue necesario corregir los valores de potencia obtenidos. Mientras que en las pruebas de potencia máxima en la unidad n° 1 se efectuaron con un factor de potencia distinto a 0,95 por lo que se llevó a cabo una corrección según la curva de capacidad del generador, en función del factor de potencia promedio obtenido en la prueba.

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 otras 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. En el caso de las pruebas de la unidad n° 1, es necesario efectuar una corrección por la operación a un factor de potencia distinto a 0,95. La corrección que se efectúa es la siguiente:

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

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. La eficiencia del generador es informada por el fabricante para un factor de potencia 0,90 (Anexo 7).

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

	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)	130,53	0,06	131,12	130,23	0,46%	✓
Factor de potencia	0,97	0,00	0,97	0,95	1,75%	✓
Velocidad de rotación (rev/min)	600,34	1,10	602,98	596,34	0,67%	✓
Posición media inyectores (%)	61,2	0,2	61,6	60,4	1,44%	✓
Caída (m)	1152,6	1,9	1159,4	1149,9	0,60%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	129,62	0,06	130,21	192,32	0,46%	✓

Para el caso de las pruebas de la unidad n° 2, y para las pruebas de las unidades n° 1 y n° 2 operando simultáneamente no fue necesario efectuar una corrección porque las pruebas se realizaron con un factor de potencia de 0,95. Por lo que en el caso de la prueba de la unidad n° 2 y de la prueba de las unidades n° 1 y n° 2 operando en forma simultánea: $P_{B,c} = P_B$.

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

	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)	129,96	0,07	130,48	129,63	0,40%	✓
Factor de potencia	0,95	0,00	0,96	0,94	1,52%	✓
Velocidad de rotación (rev/min)	600,50	0,93	605,68	597,82	0,86%	✓
Posición media inyectores (%)	62,9	0,0	62,9	62,8	0,14%	✓
Caída (m)	1141,9	0,3	1142,6	1140,9	0,08%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	129,96	0,07	130,48	129,63	0,40%	✓

*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 Alfalfal II

	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)	115,02	0,10	115,50	114,29	0,64%	✓
Factor de potencia	0,95	0,00	0,96	0,94	0,72%	✓
Velocidad de rotación (rev/min)	300,03	0,70	301,46	298,14	0,04%	✓
Posición media inyectores (%)	51,4	0,3	51,9	49,8	2,45%	✓
Caída (m)	1157,0	0,8	1157,7	1155,11	0,16%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	115,02	0,10	115,50	114,29	0,64%	✓

*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 Alfalfal II, 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. 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 Alfalfal II

	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)*	130,53	0,06	131,12	130,23	0,46%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	129,62	0,06	130,21	129,32	0,46%	✓
Potencia serv. auxiliares (MW)	0,09	0,00	0,09	0,09	N/A	✓
Potencia neta (MW)*	130,44	0,06	131,03	130,14	0,46%	✓
Potencia neta corregida (MW)*	129,53	0,06	130,12	129,23	0,46%	✓

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

	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)*	129,96	0,07	130,48	129,63	0,40%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	129,96	0,07	130,48	129,63	0,40%	✓
Potencia serv. auxiliares (MW)	0,10	0,00	0,10	0,10	N/A	N/A
Potencia neta (MW)*	129,85	0,07	130,38	129,52	0,40%	✓
Potencia neta corregida (MW)*	129,85	0,07	130,38	129,52	0,40%	✓

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

	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)*	115,02	0,10	115,50	114,29	0,64%	✓
Potencia bruta corregida (MW)	115,02	0,10	115,50	114,29	0,64%	✓
Potencia serv. auxiliares (MW)	0,09	0,00	0,10	0,09	N/A	✓
Potencia neta (MW)*	114,93	0,10	115,41	114,20	0,64%	✓
Potencia neta corregida (MW)*	114,93	0,10	115,41	114,20	0,64%	✓

*Nota: $P_{B,c} = P_B$ debido a que se logró operar con factor de potencia 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.