

CONSORCIO:	GENERADORA:
 Hamek <small>INGENIEROS ASOCIADOS SAC</small>	
AMADEO CARRILLO VILLENA	

PROYECTO:	CLIENTE:
PRUEBAS DE POTENCIA MÁXIMA EN UNIDADES GENERADORAS	

TITULO:	INFORME FINAL DE PRUEBAS DE POTENCIA MÁXIMA DE LA CENTRAL TÉRMICA TOCOPILLA UNIDAD GENERADORA U16
N° DE DOCUMENTO PROYECTO	U16-3-INF-HMK-001

REVISIÓN:	1	EDITADO PARA	Coordinador Eléctrico Nacional
FECHA:	12-03-2021		

REGISTROS DE REVISIONES

REV. N°	FECHA	REVISIONES	REVISADO POR	APROBADO POR
1	12-03-2021	Primera versión	Marco Quispe C.	Amadeo Carrillo V.

APROBACIÓN DE DOCUMENTOS

ENGIE ENERGÍA CHILE S.A.			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
CONSORCIO HAMEK AMADEO_CARRILLO			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consortio HAMEK - Amadeo Carrillo

CONTENIDO GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	5
1 INFORMACIÓN GENERAL	7
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	7
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA	7
2 OBJETIVO DE LAS PRUEBAS.....	8
2.1 PRUEBAS DE POTENCIA MÁXIMA	8
3 PROGRAMA DE LAS PRUEBAS.....	9
4 PARTICIPANTES EN LAS PRUEBAS Y ORGANIZACIÓN DEL PERSONAL.....	10
5 CONDICIONES DE DISEÑO Y REFERENCIA	10
6 FRONTERA DE PRUEBA, MEDICIONES REQUERIDAS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA	11
6.1 FRONTERA DE PRUEBA	11
6.1.1 <i>Frontera de Prueba y Mediciones Requeridas para la Unidad Generadora U16 en la Configuración Ciclo Abierto.....</i>	<i>11</i>
6.1.2 <i>Frontera de Prueba y Mediciones Requeridas para la Unidad Generadora U16 en la Configuración Ciclo Combinado.....</i>	<i>12</i>
6.2 VARIABLES MEDIDAS E INSTRUMENTACIÓN DE MEDICIÓN	13
6.2.1 <i>Variables Primarias.....</i>	<i>13</i>
7 METODOLOGÍA DE CÁLCULO	14
7.1 VALIDACIÓN DE DATOS	14
7.2 CÁLCULOS DE POTENCIA BRUTA MÁXIMA EN CICLO ABIERTO.....	14
7.3 CÁLCULOS DE POTENCIA BRUTA MÁXIMA EN CICLO COMBINADO.....	17
7.4 CÁLCULOS DE LA INCERTIDUMBRE	20
8 CÁLCULO DE POTENCIA MÁXIMA.....	22
9 RESULTADOS	22
9.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS POTENCIA MÁXIMA	22
9.2 RESULTADOS DE INCERTIDUMBRE	23

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

ANEXOS

- ANEXO A:** Actas de Ensayo
ANEXO B: Cuadros de Cálculo
ANEXO C: Protocolo de Pruebas

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1-1: Descripción de la Unidad Generadora U16 de la Central Termoeléctrica Tocopilla	8
Tabla 2-1: Variables primarias	8
Tabla 3-1: Programa de Pruebas de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla	9
Tabla 5-1: Condiciones de Referencia	10
Tabla 6-1: Variables e Instrumentos de Medición Utilizados en las Pruebas	13
Tabla 7-1: Condiciones de estabilidad de la Prueba de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 de la Central Termoeléctrica Tocopilla	14
Tabla 9-1: Resultados de las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla	22
Tabla 9-2: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Abierto con Gas de la Central Térmica Tocopilla	23
Tabla 9-3: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Combinado con Gas de la Central Térmica Tocopilla	24
Tabla 9-4: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Combinado con Diésel de la Central Térmica Tocopilla	25

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 4-1: Participantes y Organización del Personal durante las Pruebas	10
Ilustración 6-1: Frontera de Prueba de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Abierto de la Central Térmica Tocopilla	11
Ilustración 6-2: Frontera de Prueba de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Combinado de la Central Térmica Tocopilla	12

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

RESUMEN EJECUTIVO

Engie Energía Chile S.A. es la principal generadora eléctrica del Sistema Interconectado del Norte Grande (representa cerca del 50% de la oferta del SING) y cuarta a nivel nacional por capacidad instalada, con 2.129 MW de potencia bruta.

Actualmente, Engie Energía Chile S.A. mantiene presencia en Arica, Iquique, Antofagasta, Mejillones y Tocopilla, con una base productiva diversificada y un mix de generación balanceado. En 2010 se convirtió en la primera empresa en Chile en generar electricidad utilizando gas natural, gracias a la puesta en marcha del Terminal GNL Mejillones.

La Central Térmica Tocopilla cuenta con diez (10) unidades generadoras, con un total de 970 MW de potencia nominal instalada, de las cuales solo a la Unidad 16 se ha ejecutado el ensayo de potencia máxima.

Durante los ensayos se ha medido los siguientes parámetros:

- Potencia Bruta
- Factor de Potencia Bruta
- Potencia Neta
- Potencia de Servicios Auxiliares
- Potencia de Excitatriz
- Temperatura Ambiente
- Humedad Relativa Ambiente
- Presión Barométrica Ambiente
- Temperatura de Enfriamiento – Agua de Mar (Para el Ciclo Combinado)

Las condiciones de diseño y referencia que se ha considerado son las siguientes:

Tabla N° 1
 Condiciones de Diseño y de Referencia

Ítem	Unidades	Condiciones de Diseño TG	Condiciones de Diseño CC	Condiciones de Referencia
Factor de Potencia		0.80	0.80	0.95
Temperatura Ambiente	(°C)	22.74	18.17	18.00
Humedad Relativa Ambiente	(%)	97.80	80.00	75.00
Presión Ambiente	(mbara)	1014.22	1012.00	1013.00
Temperatura de Enfriamiento	(°C)		17.00	18.00

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

RESULTADOS

1.1. Resultados de las Pruebas de Potencia Máxima

Tabla N° 2
Resultados de la Prueba de Potencia Máxima de la
Unidad Generadora U16

Ítem	Potencia Bruta Medida (kW)	Potencia Bruta Corregida (kW)	Potencia Neta Medida (kW)	Potencia Neta Corregida (kW)	Potencia Máxima Corregida (kW)	Consumo Auxiliares (kW)
Unidad Generadora U16 (Ciclo Abierto) - Gas	224840.32	225427.72	219303.95	219891.35	225427.718 ± 1295.252	5536.37
Unidad Generadora U16 (Ciclo Combinado) - Gas	359180.19	357490.59	353205.25	351515.65	357490.588 ± 1273.616	5974.94
Unidad Generadora U16 (Ciclo Combinado) - Diésel	332810.07	332405.36	326080.04	325675.34	332405.365 ± 999.092	6730.03

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

1 INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Descripción de la Empresa

Engie Energía Chile S.A. es la principal generadora eléctrica del Sistema Interconectado del Norte Grande (representa cerca del 50% de la oferta del SING) y cuarta a nivel nacional por capacidad instalada, con 2.129 MW de potencia bruta.

Actualmente, Engie Energía Chile S.A. mantiene presencia en Arica, Iquique, Antofagasta, Mejillones y Tocopilla, con una base productiva diversificada y un mix de generación balanceado. En 2010 se convirtió en la primera empresa en Chile en generar electricidad utilizando gas natural, gracias a la puesta en marcha del Terminal GNL Mejillones.

Para salvar las restricciones energéticas de la zona donde opera, preponderantemente termo, Engie Energía Chile S.A. cuenta con una atractiva carpeta de proyectos de energías limpias, que tienen como fin disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar la matriz energética del SING.

Entre las iniciativas de la compañía destacan la producción de biocombustibles de segunda generación a partir de microalgas; la construcción de un parque eólico cercano a la ciudad de Calama, y el desarrollo de un proyecto de co-combustión con biomasa, utilizando cactus cultivados al pie de las centrales, en el desierto más árido del mundo, entre otros.

Además, la empresa cuenta con más de 2.000 kilómetros de líneas de transmisión; participa en el negocio de transporte de gas natural desde Argentina, con una capacidad de 8 millones de m³ al día, y está presente en el negocio de distribución y comercialización de gas para uso industrial.

1.2 Descripción de la Central Termoeléctrica Tocopilla

La Central Térmica Tocopilla se ubica dentro del complejo térmico en la región de Antofagasta, Chile. Se inauguró el 18 de mayo de 1915 como centro de trabajo de Chuquicamata.

La evolución de sus instalaciones, producto del crecimiento del yacimiento cuprífero la llevó a consolidar la denominada Planta de Baja Presión (unidades 1 a la 7) y la Topping Plant (Unidad 8) en 1938. En 1959 entró en servicio la Unidad 9, la primera de alta presión, hoy descontinuada. Más tarde se incorporan las Unidades 10 y 11, a petróleo N° 6; las turbinas a gas 1 y 2; las Unidades a carbón 12, 13 14 y 15; y la turbina a gas/Diesel N° 3. La Unidad 16, que entró en servicio en el 2000, de tipo Ciclo Combinado a gas natural, es la más poderosa y eficiente del sistema. Hoy, la poderosa central configura el principal núcleo generador del Norte Grande, entre cuyas fortalezas destacan la matriz energética diversificada (carbones, petróleos y gas natural) y la capacidad de respaldo.

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

Hoy, las instalaciones de la central cumplen funciones de respaldo ante caídas de carga y demandas especiales del sistema.

La unidad U16 está conformada por dos turbinas: una turbina a gas y una turbina a vapor, cuyas características se indican a continuación

Tabla 1-1: Descripción de la Unidad Generadora U16 de la Central Termoeléctrica Tocopilla

Unidad	Componentes	Marca/ modelo/ Serie	Potencia Nominal Generador	Tensión Nominal (KV)	Potencia Nominal Turbina (MW)	Factor de Potencia	Fecha de entrada en operación comercial
U16	TG Turbina a gas	ABB Alstom	500 000	21	280	0.8	23/02/2001
	TV Turbina a vapor	ABB Alstom		21	120	0.8	23/02/2001

2 OBJETIVO DE LAS PRUEBAS

2.1 Pruebas de Potencia Máxima

Estos ensayos tienen por objeto contar con toda la información necesaria para calcular la potencia máxima de la central térmica bajo condiciones de estabilidad requeridas. Durante los ensayos se ha medido los siguientes parámetros:

Durante los ensayos se han medido los siguientes parámetros:

Tabla 2-1: Variables primarias

Ítem	Variable	Ciclo Simple o Abierto	Ciclo Combinado
Variables de Condiciones Ambientales			
a)	Temperatura Ambiente	✓	✓
b)	Humedad Relativa Ambiente	✓	✓
c)	Presión Ambiente	✓	✓
d)	Temperatura de Enfriamiento		✓
Variables Eléctricas			
a)	Potencia Activa Bruta	✓	✓
b)	Potencia Reactiva Bruta	✓	✓
c)	Factor de Potencia Bruta	✓	✓
d)	Potencia Activa Neta	✓	✓
e)	Potencia Reactiva Neta	✓	✓
f)	Factor de Potencia Neta	✓	✓

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

Así mismo, se registraron las siguientes variables secundarias que son las que se miden, pero no entran en el cálculo de la Determinación de Potencia Máxima de Unidades Generadoras, pero se miden para asegurarse que no se ha violado la condición de prueba requerida:

- a. Tensión.
- b. Velocidad de rotación
- c. Consumos propios o auxiliares.
- d. Temperatura del combustible.
- e. Presión de descarga del compresor.
- f. Presión de Ingreso del fluido de trabajo.
- g. Caudal de condensado, agua de alimentación y vapor principal.
- h. Presión y Temperatura de condensado.
- i. Temperatura de agua de alimentación.
- j. Presión y Temperatura de vapor principal.
- k. Temperatura de gases de escape a la entrada de la caldera de recuperación de calor.
- l. Temperatura de gases de escape en chimenea.
- m. Posición de los álabes directores de entrada al (a los) compresor(es) de la(s) turbina(s) a gas.
- n. Temperatura de agua de refrigeración en entrada y salida.

3 PROGRAMA DE LAS PRUEBAS

Luego de coordinaciones previas y a la luz de las condiciones encontradas en las unidades se definió finalmente los cronogramas que se indican en el Acta de Ensayo, del cual se indica en el siguiente cuadro el programa general de ensayos.

Tabla 3-1: Programa de Pruebas de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla

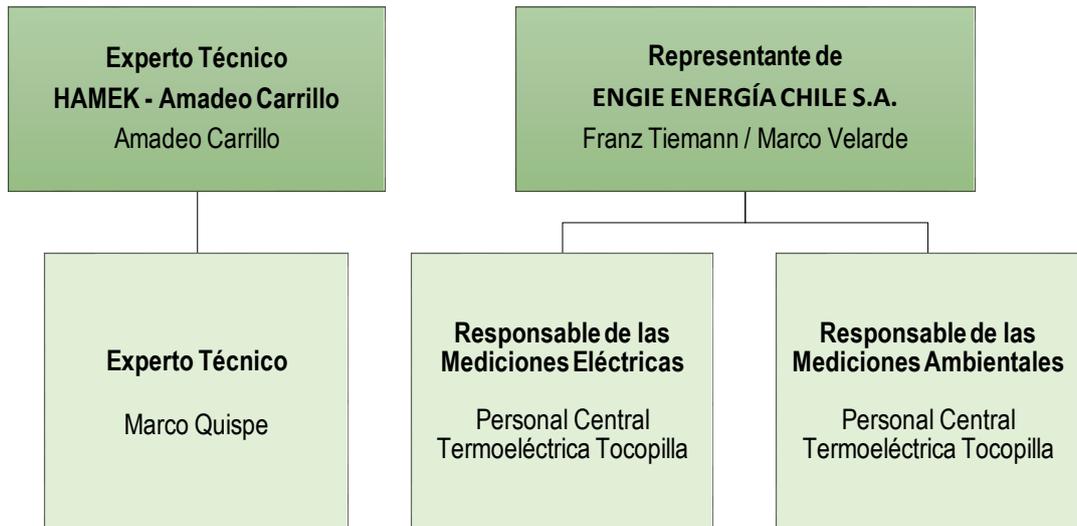
Unidad	Fecha de Prueba	Condición de Carga	Hora de Inicio	Hora de Finalización
U16 Ciclo Abierto operando con Gas	16-Feb-2021	Carga Base	19:30	00:30
U16 Ciclo Combinado operando con Gas	17-Feb-2021	Carga Base	23:00	04:00
U16 Ciclo Combinado operando con Diésel	20-Feb-2021	Carga Base	22:10	03:10

INFORME	PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.
			Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

4 PARTICIPANTES EN LAS PRUEBAS Y ORGANIZACIÓN DEL PERSONAL

Durante las pruebas han participado, el representante de ENGIE ENERGÍA CHILE S.A., el Experto Técnico y el Asistente de la CONSULTORA; como se indica en el siguiente gráfico.

Ilustración 4-1: Participantes y Organización del Personal durante las Pruebas



5 CONDICIONES DE DISEÑO Y REFERENCIA

Según el Artículo 34 del Anexo Técnico, el Potencia Máxima Bruta Medida en la prueba correspondiente, podrá ser corregido a fin de homologarla con los valores de referencia para los cuales fue calculada la Potencia Original de Garantía. Para ello se hace uso de las Curvas de Corrección de las Unidades Generadoras de la Central Termoelectrica.

Las condiciones de referencia a las cuales hay que corregir Potencia Máxima Medida son los que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 5-1: Condiciones de Referencia

Ítem	Unidades	Condiciones de Diseño TG	Condiciones de Diseño CC	Condiciones de Referencia
Factor de Potencia		0.80	0.80	0.95
Temperatura Ambiente	(°C)	22.74	18.17	18.00
Humedad Relativa Ambiente	(%)	97.80	80.00	75.00
Presión Ambiente	(mbara)	1014.22	1012.00	1013.00
Temperatura de Enfriamiento	(°C)		17.00	18.00

INFORME	PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.
			Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

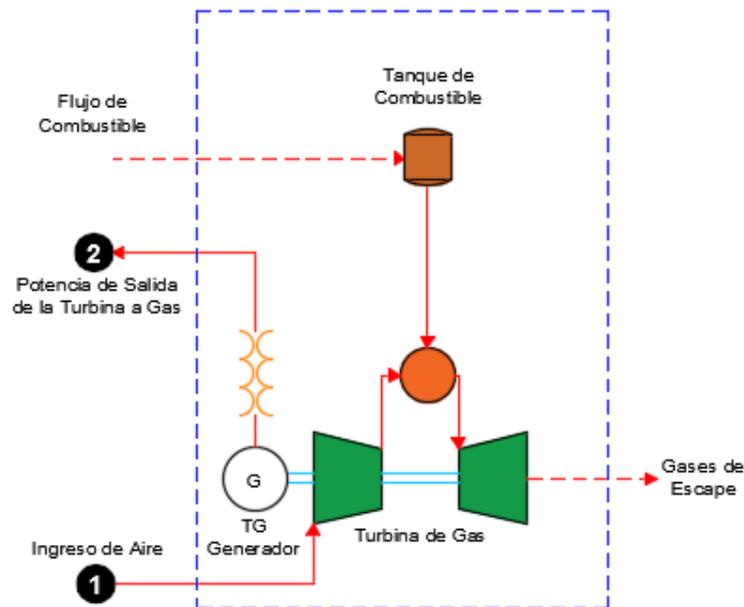
6 FRONTERA DE PRUEBA, MEDICIONES REQUERIDAS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

6.1 Frontera de Prueba

La frontera de prueba identifica los flujos de energía que deben ser medidos para calcular los resultados corregidos. En la siguiente figura se identifica dichos flujos, considerando que son los que atraviesan la frontera, los otros flujos que se quedan dentro de la frontera no se necesitan para obtener los resultados corregidos; sin embargo, sirven para verificar las condiciones operativas.

6.1.1 Frontera de Prueba y Mediciones Requeridas para la Unidad Generadora U16 en la Configuración Ciclo Abierto

Ilustración 6-1: Frontera de Prueba de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Abierto de la Central Térmica Tocopilla



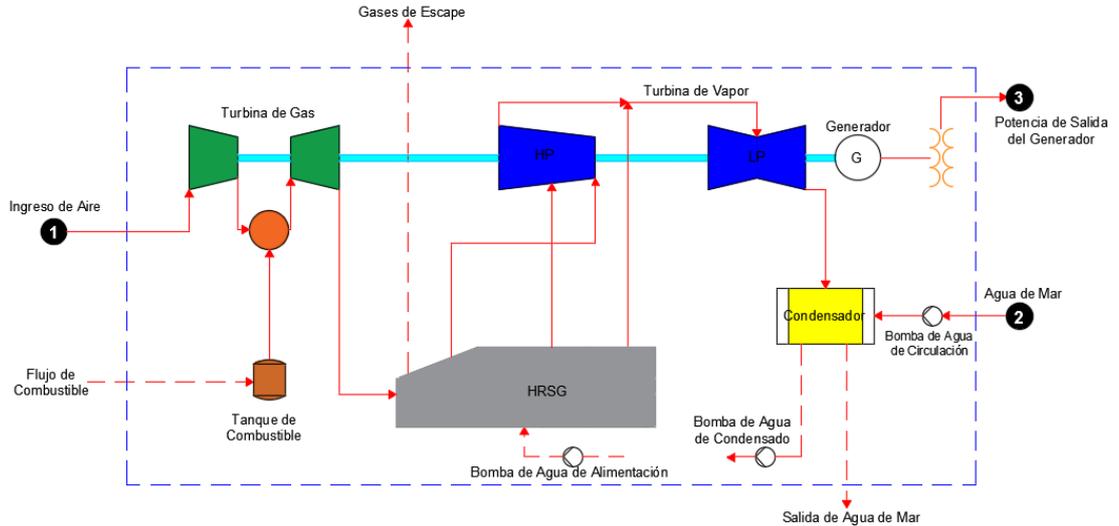
Para la obtención de los resultados corregidos, acorde con la frontera de prueba graficado anteriormente se requiere las siguientes mediciones:

1. Ingreso de aire para combustión, se requiere medir la temperatura, presión y humedad en donde el aire ingresa al compresor de la turbina a gas.
2. Potencia de salida del generador de la turbina a gas.

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

6.1.2 Frontera de Prueba y Mediciones Requeridas para la Unidad Generadora U16 en la Configuración Ciclo Combinado

Ilustración 6-2: Frontera de Prueba de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Combinado de la Central Térmica Tocopilla



Para la obtención de los resultados corregidos, acorde con la frontera de prueba graficado anteriormente se requiere las siguientes mediciones:

1. Ingreso de aire para combustión, se requiere medir la temperatura, presión y humedad en donde el aire ingresa al compresor de la turbina a gas.
2. Condiciones del absorbente de calor, en este caso siendo un ciclo de enfriamiento abierto corresponde a la temperatura del agua circulante (agua de mar), en el punto en donde cruza la frontera de prueba.
3. Potencia de salida del generador de la turbina a gas y turbina de vapor (la unidad U16 tiene 1 generador para las dos turbinas).

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

6.2 Variables Medidas e Instrumentación de Medición

6.2.1 Variables Primarias

Estas variables son las que se miden y se utilizan en los cálculos de resultados de la Determinación de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16, pertenecientes a la Central Termoeléctrica Tocopilla. En la siguiente tabla se indica estas variables y los instrumentos de medición utilizados.

Tabla 6-1: Variables e Instrumentos de Medición Utilizados en las Pruebas

Variables Medidas	Unidad	Marca	Modelo	Serie
Potencia Bruta				
Parámetros eléctricos: Potencia, factor de potencia	U16	AEMC	8335	212397
Potencia Neta				
Parámetros eléctricos: Potencia, factor de potencia	U16	AEMC	8336	155810MGH 1419
Potencia de Excitatriz				
Parámetros eléctricos: Potencia, factor de potencia	U16	AEMC	8335	212411
Condiciones Ambientales				
Parámetros ambientales: Temperatura ambiente, humedad relativa, presión ambiente y temperatura de enfriamiento (Agua de Mar)	U16	Sensor PT-100	E203950	OT-55547

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

7 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

7.1 Validación de Datos

Las mediciones de las Variables Primarias, cuyos datos registrados se encuentren fuera de los rangos de fluctuación indicados en la siguiente tabla serán eliminadas. Respecto a los datos que serán eliminados, se debe condicionar la prueba a la estabilidad exigida.

Las mediciones válidas serán todas las mediciones efectuadas menos las mediciones eliminadas.

Tabla 7-1: Condiciones de estabilidad de la Prueba de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 de la Central Termoeléctrica Tocopilla

Parámetro	Máxima fluctuación respecto al valor promedio
Potencia eléctrica de salida	± 1.3 %
Factor de Potencia	± 1.3 %
Presión barométrica	± 0.33 %
Temperatura de ingreso del aire	± 1.3 °F o ± 0.72 °C
Presión del combustible gaseoso suministrado a la turbina de gas	± 0.65 %
Flujo de combustible	± 1.3 %
Presión de descarga	± 0.33 %
Velocidad de rotación	± 0.65 %

7.2 Cálculos de Potencia Bruta Máxima en Ciclo Abierto

7.2.1 Resultados de las Potencia Bruta Máxima Medido ($PBM_{M,TG}$)

Para los datos validados se determinará la potencia bruta máxima considerando igual al promedio horario de la potencia bruta medida en los bornes del generador, donde cada promedio horario, es a su vez el promedio de mediciones de potencia tomadas cada 5 minutos.

$$PBM_{M,TG} = \frac{\sum_{i=1}^n PBM_{M,TG_i}}{n}$$

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

7.2.2 Cálculo de la Potencia Bruta Máxima Corregida ($PBM_{C,TG}$)

Para calcular el valor de Potencia Bruta Máxima Corregida, esta deberá ser ajustada por medio de la aplicación de factores de corrección multiplicativos. Para ello se aplicará la siguiente formula:

$$PBM_{C,TG} = \frac{PBM_{M,TG}}{\alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3}$$

Donde:

- $PBM_{C,TG}$: Potencia Bruta Máxima Corregida, kW.
- $PBM_{M,TG}$: Potencia Bruta Máxima Medida, kW.
- α_1 : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente.
- α_2 : Factor de Corrección por Humedad Relativa.
- α_3 : Factor de Corrección por Presión Ambiente.

Según la norma ASME PTC 22, el factor de corrección α_1 se deduce de la curva de corrección y es el resultado de dividir el factor de corrección de las condiciones de prueba a las condiciones de diseño entre el factor de corrección de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño; así por ejemplo el factor de corrección por temperatura ambiente se deduce de la siguiente manera:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_{1a}}{\alpha_{1b}}$$

Donde:

- α_1 : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente.
- α_{1a} : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente de las condiciones de pruebas a las condiciones de diseño.
- α_{1b} : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño.

Así mismo, factor de corrección por humedad relativa (α_2) se deduce de la siguiente manera:

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_{2a}}{\alpha_{2b}}$$

Donde:

- α_2 : Factor de Corrección por Humedad Relativa.
- α_{2a} : Factor de Corrección por Humedad Relativa de las condiciones de pruebas a las condiciones de diseño.
- α_{2b} : Factor de Corrección por Humedad Relativa de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño.

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

Finalmente, factor de corrección por presión ambiente (α_3) se deduce de la siguiente manera:

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_{3a}}{\alpha_{3b}}$$

Donde:

- α_3 : Factor de Corrección por Presión Ambiente.
- α_{3a} : Factor de Corrección por Presión Ambiente de las condiciones de pruebas a las condiciones de diseño.
- α_{3b} : Factor de Corrección por Presión Ambiente de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño.

7.2.3 Cálculo de la Potencia Neta Máxima Medida ($PNM_{M,TG}$)

Se determinará la potencia neta máxima considerando igual al promedio horario de la potencia neta medida en la subestación, donde cada promedio horario, es a su vez el promedio de mediciones de potencia tomadas cada 5 minutos.

$$PNM_{M,TG} = \frac{\sum_{i=1}^n PNM_{M,TG_i}}{n}$$

7.2.4 Cálculo de la Potencia Neta Máxima Corregida ($PNM_{C,TG}$)

Para calcular el valor de Potencia Neta Máxima Corregida, se aplicará la siguiente formula:

$$PNM_{C,TG} = PBM_{C,TG} - SSAA_{TG}$$

Donde:

- $PNM_{C,TG}$: Potencia Neta Máxima Corregida, kW.
- $PBM_{C,TG}$: Potencia Bruta Máxima Corregida, kW.
- $SSAA_{TG}$: Servicios Auxiliares Totales, kW.

Siendo:

$$SSAA_{TG} = PBM_{M,TG} - PNM_{M,TG}$$

- $SSAA_{TG}$: Servicios Auxiliares Totales, kW.
- $PBM_{M,TG}$: Potencia Bruta Máxima Medida, kW.
- $PNM_{M,TG}$: Potencia Neta Máxima Medida, kW

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

7.3 Cálculos de Potencia Bruta Máxima en Ciclo Combinado

7.3.1 Resultados de las Potencia Bruta Máxima Medido ($PBM_{M,CC}$)

Para los datos validados se determinará la potencia bruta máxima considerando igual al promedio horario de la potencia bruta medida en los bornes del generador, donde cada promedio horario, es a su vez el promedio de mediciones de potencia tomadas cada 5 minutos.

$$PBM_{M,CC} = \frac{\sum_{i=1}^n PBM_{M,CC_i}}{n}$$

7.3.2 Cálculo de la Potencia Bruta Máxima Corregida ($PBM_{C,CC}$)

Para calcular el valor de Potencia Bruta Máxima Corregida, esta deberá ser ajustada por medio de la aplicación de factores de corrección multiplicativos. Para ello se aplicará la siguiente formula:

$$PBM_{C,CC} = \frac{PBM_{M,CC}}{\alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4}$$

Donde:

- $PBM_{C,CC}$: Potencia Bruta Máxima Corregida, kW.
- $PBM_{M,CC}$: Potencia Bruta Máxima Medida, kW.
- α_1 : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente.
- α_2 : Factor de Corrección por Humedad Relativa.
- α_3 : Factor de Corrección por Presión Ambiente.
- α_4 : Factor de Corrección por Temperatura de Enfriamiento.

Según la norma ASME PTC 46, el factor de corrección α_1 se deduce de la curva de corrección y es el resultado de dividir el factor de corrección de las condiciones de prueba a las condiciones de diseño entre el factor de corrección de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño; así por ejemplo el factor de corrección por temperatura ambiente se deduce de la siguiente manera:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_{1a}}{\alpha_{1b}}$$

Donde:

- α_1 : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente.
- α_{1a} : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente de las condiciones de pruebas a las condiciones de diseño.
- α_{1b} : Factor de Corrección por Temperatura Ambiente de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño.

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

Así mismo, factor de corrección por humedad relativa (α_2) se deduce de la siguiente manera:

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_{2a}}{\alpha_{2b}}$$

Donde:

- α_2 : Factor de Corrección por Humedad Relativa.
- α_{2a} : Factor de Corrección por Humedad Relativa de las condiciones de pruebas a las condiciones de diseño.
- α_{2b} : Factor de Corrección por Humedad Relativa de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño.

Así mismo, factor de corrección por presión ambiente (α_3) se deduce de la siguiente manera:

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_{3a}}{\alpha_{3b}}$$

Donde:

- α_3 : Factor de Corrección por Presión Ambiente.
- α_{3a} : Factor de Corrección por Presión Ambiente de las condiciones de pruebas a las condiciones de diseño.
- α_{3b} : Factor de Corrección por Presión Ambiente de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño.

Finalmente, factor de corrección por temperatura de enfriamiento (α_4) se deduce de la siguiente manera:

$$\alpha_4 = \frac{\alpha_{4a}}{\alpha_{4b}}$$

Donde:

- α_4 : Factor de Corrección por Temperatura de Enfriamiento.
- α_{4a} : Factor de Corrección por Temperatura de Enfriamiento de las condiciones de pruebas a las condiciones de diseño.
- α_{4b} : Factor de Corrección por Temperatura de Enfriamiento de las condiciones de referencia a las condiciones de diseño.

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consortio HAMEK - Amadeo Carrillo

7.3.3 Cálculo de la Potencia Neta Máxima Medida ($PNM_{M,CC}$)

Se determinará la potencia neta máxima considerando igual al promedio horario de la potencia neta medida en la subestación, donde cada promedio horario, es a su vez el promedio de mediciones de potencia tomadas cada 5 minutos.

$$PNM_{M,CC} = \frac{\sum_{i=1}^n PNM_{M,CCi}}{n}$$

7.3.4 Cálculo de la Potencia Neta Máxima Corregida ($PNM_{C,CC}$)

Para calcular el valor de Potencia Neta Máxima Corregida, se aplicará la siguiente formula:

$$PNM_{C,CC} = PBM_{C,CC} - SSAA_{CC}$$

Donde:

- $PNM_{C,CC}$: Potencia Neta Máxima Corregida, kW.
- $PBM_{C,CC}$: Potencia Bruta Máxima Corregida, kW.
- $SSAA_{CC}$: Servicios Auxiliares Totales, kW.

Siendo:

$$SSAA_{CC} = PBM_{M,CC} - PNM_{M,CC}$$

- $SSAA_{CC}$: Servicios Auxiliares Totales, kW.
- $PBM_{M,CC}$: Potencia Bruta Máxima Medida, kW.
- $PNM_{M,CC}$: Potencia Neta Máxima Medida, kW

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

7.4 Cálculos de la incertidumbre

La incertidumbre del resultado de la prueba, es un cálculo matemático que calcula con una confianza específica, el rango dentro del cual se encuentra los resultados reales.

Según la norma ASME PTC 19.1 "Test Uncertainty"; para la unidad que estamos evaluando en el modo de ciclo simple y ciclo combinado, la incertidumbre más grande deseada es igual a 0.8%.

A continuación, se muestra la metodología utilizada en el cálculo de la Incertidumbre de la prueba de Potencia Máxima

7.4.1 Incertidumbre de la Prueba

El cálculo de la incertidumbre total de una prueba, así como la composición de la incertidumbre sistemática y aleatoria, e obtendrán de la siguiente expresión:

$$U_{95} = \sqrt{B_R^2 + (t \cdot S_R)^2}$$

Donde el primer término corresponde a la contribución de la incertidumbre sistemática y el segundo, a la del azar.

La expresión anterior nos muestra la incertidumbre absoluta, es decir, en la unidad del resultado de la prueba (Potencia Máxima Corregido), para calcular la incertidumbre relativa porcentual se aplica lo siguiente:

$$U_R \% = \frac{U_R}{R}$$

a) Cálculo de la Incertidumbre Sistemática Absoluta

La incertidumbre sistemática absoluta se calcula con la siguiente expresión:

$$B_R = \sqrt{\sum_i (\theta_i \cdot B_{\bar{P}i})^2}$$

Donde:

- B_R : Incertidumbre sistemática total, %.
- θ_i : Coeficiente de sensibilidad % / %.
- $B_{\bar{P}i}$: Incertidumbre sistemática de cada variable individual %.
- i : La sumatoria al ejecutar todas las variables que intervienen en el cálculo del resultado.

La incertidumbre Sistemática Instrumental de cada variable que interviene en el cálculo del resultado final se obtendrá de:

$$B_{\bar{P}i} = \frac{\text{Precisión}\%}{100} \cdot \bar{X}_i$$

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

El coeficiente de sensibilidad absoluto se obtendrá de:

$$\theta_i = \frac{\partial R}{\partial \bar{X}_i} \approx \frac{\Delta R}{\Delta \bar{X}_i}$$

Así también, el coeficiente de sensibilidad relativa se obtendrá de:

$$\theta_i' = \frac{\bar{X}_i}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial \bar{X}_i}$$

Donde:

- \bar{X}_i : Valor medio de la variable obtenida durante la prueba.
- R : Resultado de los cálculos de la prueba.

El valor de \bar{X}_i , llamado Valor Medio, será calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{N_j} \cdot \sum_{k=1}^{N_j} P_{ik}$$

Donde:

- N_j : Número total de lecturas de la variable i.
- P_{ik} : Valor de la lectura k de la variable i.
- P_{ik} : La sumatoria al ejecutar todas las lecturas registradas durante la prueba de la variable i.

b) Cálculo de la Incertidumbre Aleatoria Absoluta

La incertidumbre aleatoria absoluta se dará por:

$$tS_R = \sqrt{\sum_i (\theta_i \cdot S_{\bar{x}_i} \cdot t_{95,v})^2}$$

Donde:

- N_j : Número total de lecturas de la variable i.
- tS_R : Incertidumbre aleatoria Absoluta.
- $S_{\bar{x}_i}$: Desviación estándar de la media de la variable Xi.
- $t_{95,v}$: t Student's con 95% de Confiabilidad y $v = N_j - 1$ grados de libertad.

La desviación estándar de la media se obtendrá de:

$$S_{\bar{X}_i} = \frac{1}{\sqrt{N_j}} \sqrt{\sum_{k=1}^{N_j} \frac{(X_{ik} - \bar{X}_i)^2}{N_j - 1}}$$

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

8 CÁLCULO DE POTENCIA MÁXIMA

Los cuadros de cálculo de la prueba de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 de la Central Termoeléctrica Tocopilla, se muestran en el Apéndice B.

9 RESULTADOS

9.1 Resultados de las Pruebas Potencia Máxima

Tabla 9-1: Resultados de las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla

Ítem	Potencia Bruta Medida (kW)	Potencia Bruta Corregida (kW)	Potencia Neta Medida (kW)	Potencia Neta Corregida (kW)	Potencia Máxima Corregida (kW)	Consumo Auxiliares (kW)
Unidad Generadora U16 (Ciclo Abierto) - Gas	224840.32	225427.72	219303.95	219891.35	225427.718 ± 1295.252	5536.37
Unidad Generadora U16 (Ciclo Combinado) - Gas	359180.19	357490.59	353205.25	351515.65	357490.588 ± 1273.616	5974.94
Unidad Generadora U16 (Ciclo Combinado) - Diésel	332810.07	332405.36	326080.04	325675.34	332405.365 ± 999.092	6730.03

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

9.2 Resultados de Incertidumbre

Tabla 9-2: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Abierto con Gas de la Central Térmica Tocopilla

Prueba de Potencia Máxima de la Unidad U16 - Ciclo Simple o Abierto OPERANDO CON GAS NATURAL

Descripción	Valor Nominal	PBM _{cc} Potencia Bruta Corregida	Unidad	B _R Incertidumbre Sistemático de Cada Prueba	t S _R Incertidumbre Aleatorio de Cada Prueba	U _R Incertidumbre Absoluta Total de Cada Prueba	Nota
Potencia Bruta Corregida - Primera Prueba	220000	224683.795	kW	1044.703	246.633	1073.421	Del cálculo de Incertidumbre de la Primera Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Segunda Prueba	220000	224857.158	kW	1038.965	249.404	1068.481	Del cálculo de Incertidumbre de la Segunda Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Tercera Prueba	220000	225679.757	kW	1041.382	138.090	1050.497	Del cálculo de Incertidumbre de la Tercera Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Cuarta Prueba	220000	225828.173	kW	1039.495	184.947	1055.819	Del cálculo de Incertidumbre de la Cuarta Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Quinta Prueba	220000	226089.706	kW	1040.439	174.930	1055.042	Del cálculo de Incertidumbre de la Quinta Prueba de la Potencia Máxima
Promedio de Potencia Bruta Corregida		225427.718	kW				
Desviación Estándar de Potencia Bruta Corregida		277.586	kW				
Student's t de Potencia Bruta Corregida		2.7765	kW				
Incertidumbre Sistemática de la Potencia Bruta Corregida			kW	1040.997			
Incertidumbre Aleatoria de la Potencia Bruta Corregida			kW		770.717		
Incertidumbre Absoluta total de la Potencia Bruta Corregida			kW			1295.252	
Incertidumbre Relativa total de la Potencia Bruta Corregida			%			0.575	

INFORME	PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.
			Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

Tabla 9-3: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Combinado con Gas de la Central Térmica Tocopilla

Prueba de Potencia Máxima de la Unidad U16 - Ciclo Combinado OPERANDO CON GAS NATURAL

Descripción	Valor Nominal	PBM _{cc} Potencia Bruta Corregida	Unidad	B _R Incertidumbre Sistemático de Cada Prueba	t S _R Incertidumbre Aleatorio de Cada Prueba	U _R Incertidumbre Absoluta Total de Cada Prueba	Nota
Potencia Bruta Corregida - Primera Prueba	360000	356466.781	kW	992.432	493.215	1108.234	Del cálculo de Incertidumbre de la Primera Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Segunda Prueba	360000	357324.252	kW	983.490	615.586	1160.258	Del cálculo de Incertidumbre de la Segunda Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Tercera Prueba	360000	357560.228	kW	977.033	653.238	1175.293	Del cálculo de Incertidumbre de la Tercera Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Cuarta Prueba	360000	358104.332	kW	975.716	451.684	1075.193	Del cálculo de Incertidumbre de la Cuarta Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Quinta Prueba	360000	357997.345	kW	973.803	478.323	1084.936	Del cálculo de Incertidumbre de la Quinta Prueba de la Potencia Máxima
Promedio de Potencia Bruta Corregida		357490.588	kW				
Desviación Estándar de Potencia Bruta Corregida		292.761	kW				
Student's t de Potencia Bruta Corregida		2.7765	kW				
Incertidumbre Sistemática de la Potencia Bruta Corregida			kW	980.495			
Incertidumbre Aleatoria de la Potencia Bruta Corregida			kW		812.851		
Incertidumbre Absoluta total de la Potencia Bruta Corregida			kW			1273.616	
Incertidumbre Relativa total de la Potencia Bruta Corregida			%			0.356	

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

Tabla 9-4: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Potencia Máxima de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Combinado con Diésel de la Central Térmica Tocopilla

Prueba de Potencia Máxima de la Unidad U16 - Ciclo Combinado OPERANDO CON DIÉSEL

Descripción	Valor Nominal	PBM _{cc} Potencia Bruta Corregida	Unidad	B _R Incertidumbre Sistemático de Cada Prueba	t S _R Incertidumbre Aleatorio de Cada Prueba	U _R Incertidumbre Absoluta Total de Cada Prueba	Nota
Potencia Bruta Corregida - Primera Prueba	330000	331852.014	kW	913.035	187.302	932.048	Del cálculo de Incertidumbre de la Primera Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Segunda Prueba	330000	332637.895	kW	919.747	189.389	939.043	Del cálculo de Incertidumbre de la Segunda Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Tercera Prueba	330000	332525.153	kW	922.550	182.172	940.365	Del cálculo de Incertidumbre de la Tercera Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Cuarta Prueba	330000	332445.314	kW	918.383	163.590	932.839	Del cálculo de Incertidumbre de la Cuarta Prueba de la Potencia Máxima
Potencia Bruta Corregida - Quinta Prueba	330000	332566.448	kW	917.506	173.070	933.686	Del cálculo de Incertidumbre de la Quinta Prueba de la Potencia Máxima
Promedio de Potencia Bruta Corregida		332405.365	kW				
Desviación Estándar de Potencia Bruta Corregida		141.803	kW				
Student's t de Potencia Bruta Corregida		2.7765	kW				
Incertidumbre Sistemática de la Potencia Bruta Corregida			kW	918.244			
Incertidumbre Aleatoria de la Potencia Bruta Corregida			kW		393.715		
Incertidumbre Absoluta total de la Potencia Bruta Corregida			kW			999.092	
Incertidumbre Relativa total de la Potencia Bruta Corregida			%			0.301	

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo

APÉNDICES

INFORME		PROPIETARIO	GENERADORA	CONTRATISTA
Versión	1	Coordinador Eléctrico Nacional	Engie Energía Chile S.A.	Consorcio HAMEK - Amadeo Carrillo