CONSORCIO:	GENERADORA:
Hamek INGENIEROS ASOCIADOS SAC / AMADEO CARRILLO VILLENA	ENGIE

PROYECTO:	CLIENTE:
DETERMINACIÓN DE CONSUMOS ESPECÍFICOS DE UNIDADES GENERADORAS	COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL

TITULO:	**INFORME FINAL DE PRUEBAS DE CONSUMOS ESPECÍFICOS NETO DE LA CENTRAL TÉRMICA TOCOPILLA UNIDAD GENERADORA U16 OPERANDO CON DIÉSEL**
N° DE DOCUMENTO PROYECTO	**U16-4-INF-HMK-001**

REVISIÓN:	**1**	**EDITADO PARA**	**Coordinador Eléctrico Nacional**
FECHA:	**28-04-2021**		

REGISTROS DE REVISIONES

REV. N°	FECHA	REVISIONES	REVISADO POR	APROBADO POR
1	28-04-2021	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**

CONTENIDO GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO 6

1 INFORMACIÓN GENERAL 11
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA 11
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA 11

2 OBJETIVO DE LAS PRUEBAS 13
2.1 PRUEBAS DE CONSUMOS ESPECÍFICOS NETO 13

3 PROGRAMA DE LAS PRUEBAS 14

4 PARTICIPANTES EN LAS PRUEBAS Y ORGANIZACIÓN DEL PERSONAL 15

5 CONDICIONES DE DISEÑO Y REFERENCIA 15

6 FRONTERA DE PRUEBA, MEDICIONES REQUERIDAS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA 16
6.1 FRONTERA DE PRUEBA Y MEDICIONES REQUERIDAS 16
6.2 VARIABLES MEDIDAS E INSTRUMENTACIÓN DE MEDICIÓN 17

7 REPORTE DE COMBUSTIBLE 18
7.1 REPORTE DE DIÉSEL 18

8 METODOLOGÍA DE CÁLCULO 19
8.1 VALIDACIÓN DE DATOS 19
8.2 CÁLCULOS DE LOS CONSUMOS ESPECÍFICOS NETO EN CICLO COMBINADO ... 19
8.3 CÁLCULOS DE LA INCERTIDUMBRE 22

9 CÁLCULO DE CONSUMO ESPECÍFICO NETO 24

10 RESULTADOS 24
10.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CONSUMOS ESPECÍFICOS NETO EN CICLO COMBINADO 24
10.2 RESULTADOS DE INCERTIDUMBRE EN CICLO COMBINADO 27

ANEXOS

ANEXO A: Actas de Ensayo

ANEXO B: Reporte de Combustible

ANEXO C: Cuadros de Cálculo

ANEXO D: Protocolo de Pruebas

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1-1: Descripción de la Central Termoeléctrica Tocopilla 12
Tabla 2-1: Variables primarias 13
Tabla 3-1: Programa de Pruebas de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en Ciclo Combinado con Diésel 14
Tabla 3-2: Duración de las Pruebas de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en Ciclo Combinado con Diésel 14
Tabla 5-1: Condiciones de Referencia 15
Tabla 6-1: Variables e Instrumentos de Medición Utilizados en las Pruebas 17
Tabla 7-1: Reporte de Combustible – Diésel 18
Tabla 8-1: Condiciones de estabilidad de la Prueba de Consumo Especifico Neto de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla 19
Tabla 10-1: Resultados de las Pruebas de Consumos Específicos Neto de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel 24
Tabla 10-2: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Consumos Específicos Neto de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel 27

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 4-1: Participantes y Organización del Personal durante las Pruebas..... 15
Ilustración 6-1: Frontera de Prueba de la Unidad Generadora U16 en Ciclo Combinado de la Central Térmica Tocopilla..... 16
Ilustración 10-1: Curva Característica del Consumo Específico Neto Corregido (kcal/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel..... 25
Ilustración 10-2: Curva Característica del Consumo Específico Neto Corregido (kJ/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel 25
Ilustración 10-3: Curva Característica del Consumo Específico de Combustible Neto Corregido (Referido a 11000 kcal/kg) (kg/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel..... 26
Ilustración 10-4: Curva Característica de la Eficiencia Neto Corregido (%) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel 26

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 las pruebas se ha registrado los siguientes parámetros:

- Potencia Bruta
- Factor de Potencia Bruta
- Potencia Neta
- Potencia de Servicios Auxiliares
- Potencia de Excitatriz
- Flujo de Diésel
- Temperatura Ambiente
- Humedad Relativa Ambiente
- Presión Barométrica Ambiente
- Tempera de Enfriamiento – Agua de Mar

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

Tabla Nº 1
Condiciones de Diseño y de Referencia

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

Las Pruebas de Consumo Especifico Neto se realizaron con Diésel. Durante tomaron muestras de combustibles, los cuales fueron analizados en un laboratorio certificado; de donde se obtuvo los valores que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla Nº 2
Reporte Análisis del Combustible – Diésel

Reporte	Poder Calorífico Superior			Densidad
	kcal/kg	MJ/kg	BTU/lb	kg/m^3
21/02/2021 - 00:30	10934.49635	45.7805	19682	835.0
21/02/2021 - 06:00	10934.49635	45.7805	19682	834.9
Promedio	10934.49635	45.7805	19682.0	835.0

RESULTADOS

1.1. Resultados de las Pruebas de Consumos Específicos Neto en Ciclo Combinado

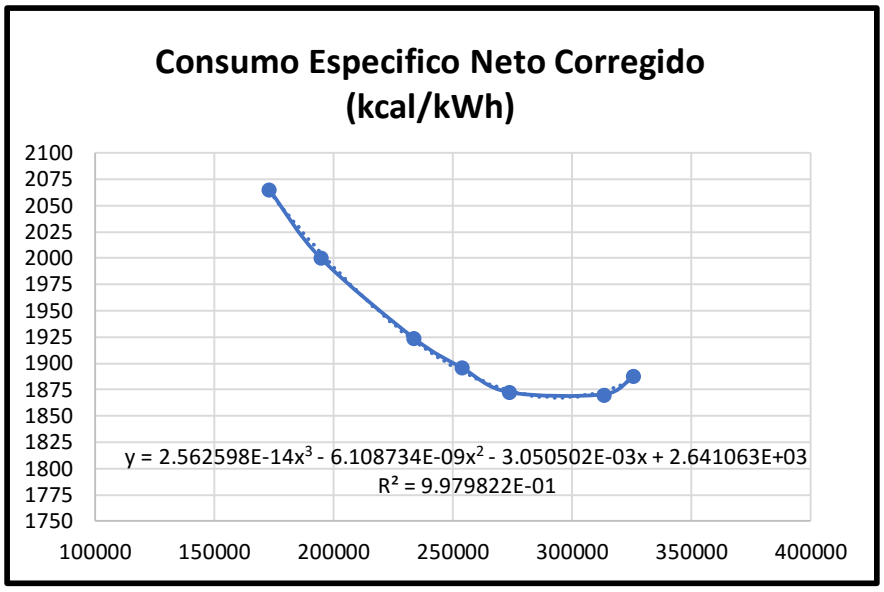
Tabla Nº 3

Resultados de las Pruebas de Consumos Específicos Neto de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel

Escalón	Potencia Programada	Potencia Bruta Medida	Potencia Neta Medida	Consumo de Combustible Medido	Consumo Especifico Neto Medido		Consumo Especifico de Combustible Neto Medido (Referido a 11000 kcal/kg)	Eficiencia Neto Medido	Potencia Bruta Corregida	Potencia Neta Corregida	Consumo Especifico Neto Corregido		Incertidumbre		Consumo Especifico de Combustible Neto Corregido (Referido a 11000 kcal/kg)	Eficiencia Neto Corregido
	(kW)	(kW)	(kW)	(kg/h)	(kcal/kWh)	(kJ/kWh)	(Nm^3/kWh)	(%)	(kW)	(kW)	(kcal/kWh)	(kJ/kWh)	(kcal/kWh)	(kJ/kWh)	(kg/h)	(%)
1er Escalón	178000	178121.462	172661.328	32641.684	2067.170	8654.829	0.188	41.595	**178554.876**	**173094.742**	**2065.240**	**8646.746**	**± 14.309**	**± 59.907**	0.188	41.634
2do Escalón	200000	200155.359	194439.067	35599.170	2001.959	8381.801	0.182	42.950	**200314.522**	**194598.229**	**2000.178**	**8374.344**	**± 13.838**	**± 57.937**	0.182	42.988
3er Escalón	240000	240155.955	234267.590	41245.778	1925.157	8060.246	0.175	44.664	**239518.624**	**233630.260**	**1923.759**	**8054.394**	**± 13.327**	**± 55.796**	0.175	44.696
4to Escalón	260000	260179.322	254113.405	44089.090	1897.153	7943.000	0.172	45.323	**259812.429**	**253746.512**	**1895.498**	**7936.071**	**± 13.120**	**± 54.931**	0.172	45.362
5to Escalón	280000	280194.097	274002.343	46942.932	1873.332	7843.266	0.170	45.899	**279869.668**	**273677.914**	**1872.084**	**7838.040**	**± 12.963**	**± 54.272**	0.170	45.930
6to Escalón	320000	320275.305	313585.157	53658.072	1871.020	7833.585	0.170	45.956	**320187.541**	**313497.393**	**1870.271**	**7830.451**	**± 12.954**	**± 54.236**	0.170	45.974
7mo Escalón	330000	332749.771	325981.026	56286.808	1888.048	7904.880	0.172	45.541	**332453.185**	**325684.440**	**1887.672**	**7903.306**	**± 13.080**	**± 54.763**	0.172	45.551

Ilustración Nº 1

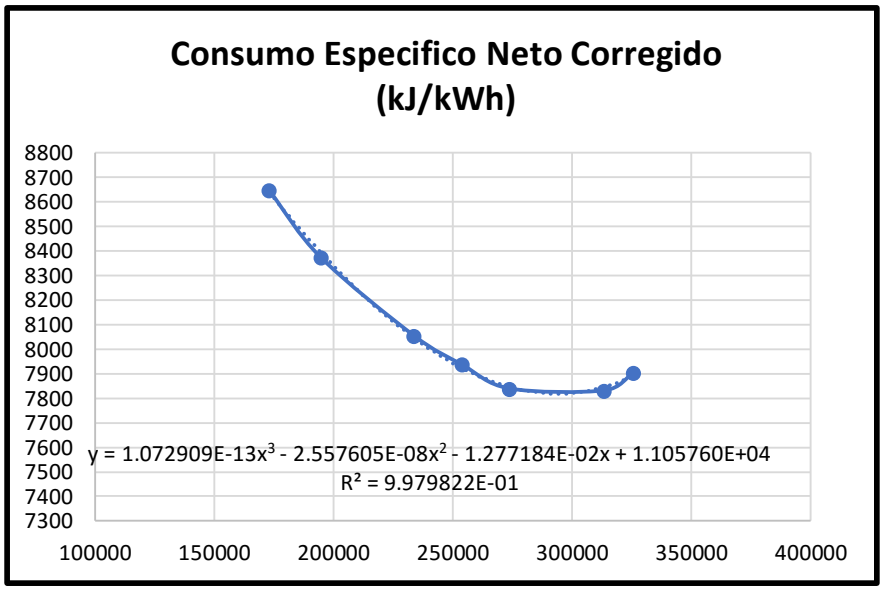
Curva Característica del Consumo Específico Neto Corregido (kcal/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



Consumo Especifico Neto Corregido	
(kcal/kWh)	
a_0	2.641063E+03
a_1	-3.050502E-03
a_2	-6.108734E-09
a_3	2.562598E-14

Ilustración Nº 2

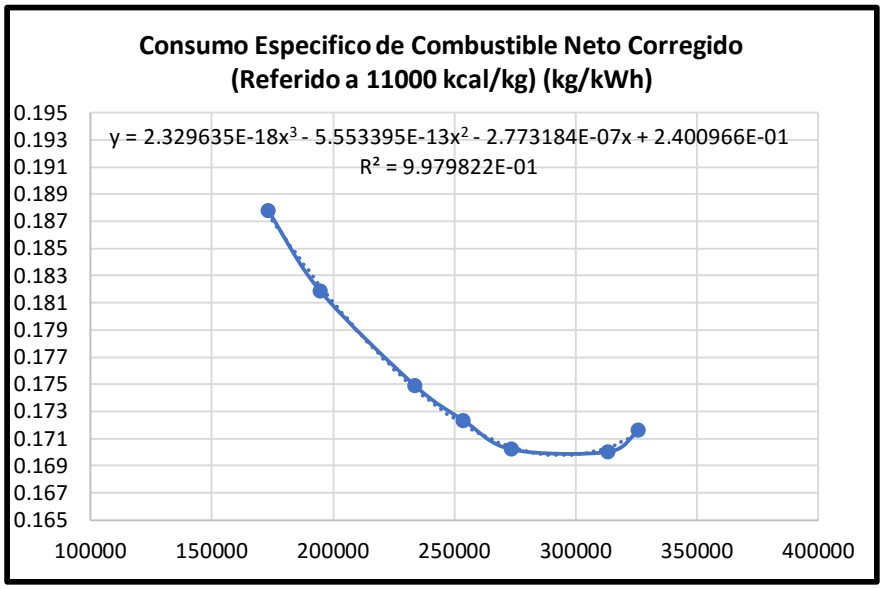
Curva Característica del Consumo Específico Neto Corregido (kJ/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



Consumo Especifico Neto Corregido	
(kJ/kWh)	
a_0	1.105760E+04
a_1	-1.277184E-02
a_2	-2.557605E-08
a_3	1.072909E-13

Ilustración Nº 3

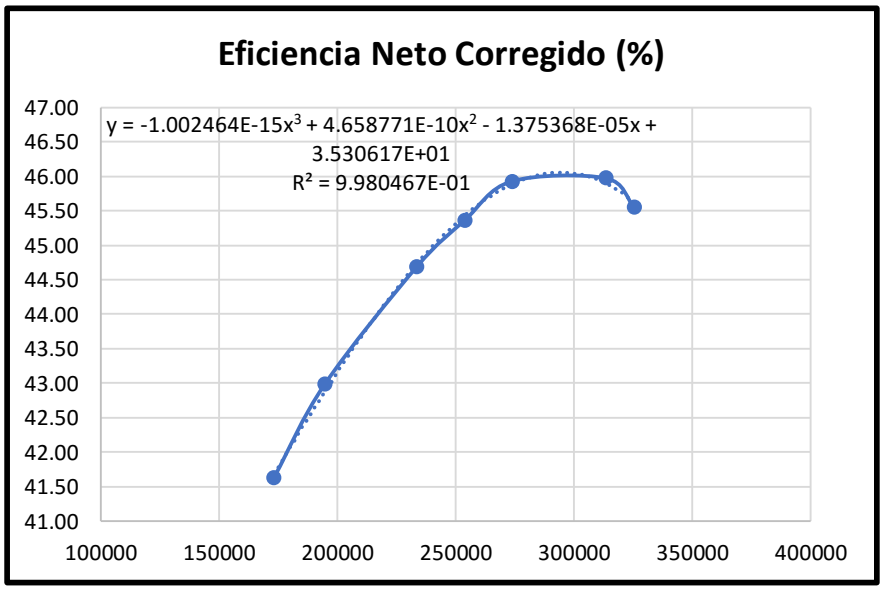
Curva Característica del Consumo Específico de Combustible Neto Corregido (Referido a 11000 kg/kWh) (kg/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



Consumo Especifico de Combustible Neto Corregido (Referido a 11000 kcal/kg)	
(kg/kWh)	
a_0	2.400966E-01
a_1	-2.773184E-07
a_2	-5.553395E-13
a_3	2.329635E-18

Ilustración Nº 4

Curva Característica de la Eficiencia Neto Corregido (%) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



Eficiencia Neto Corregido	
(%)	
a_0	3.530617E+01
a_1	-1.375368E-05
a_2	4.658771E-10
a_3	-1.002464E-15

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.

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 Central Termoeléctrica Tocopilla

Concepto[1]	Unidad	U16 – TG	U16 – TV
Marca		ABB Alstom	ABB Alstom
Tipo de Unidad		Turbina de Gas	Turbina de Vapor
Tipo de Combustible		Gas Natural y Petróleo Diésel	-
Año de Fabricación	Año	1998	1998
Fecha de Entrada en Operación	dd-mm-aa	23-02-2001	23-02-2001
Potencia Nominal	MW	280	120
Potencia Mínimo Técnico con Gas Natural	MW	50	
	MW	110	
Potencia Mínimo Técnico con Petróleo Diésel	MW	178	
Tensión Nominal	kV	21	21
Factor de Potencia	-	0.80	0.80
Velocidad de Rotación	RPM	3 000	3 000

[1] Información extraída desde: https://infotecnica.coordinador.cl/instalaciones/unidades-generadoras

2 OBJETIVO DE LAS PRUEBAS

2.1 Pruebas de Consumos Específicos Neto

Estos ensayos tienen por objeto contar con toda la información necesaria para calcular los Consumos Específicos Neto de la Unidad Generadora U16 a partir de una operación a distintas cargas, y bajo condiciones de estabilidad requeridas.
Durante los ensayos se han medido los siguientes parámetros:

Tabla 2-1: Variables primarias

Ítem	Variable	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	✓
Consumo de Combustible		
a)	Consumo de Diésel	✓

Así mismo, se registraron las siguientes variables secundarias que son las que se miden, pero no entran en el cálculo de la Determinación de Consumos Específicos 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

Conforme se ha indicado en el Acta de Ensayo, luego de coordinaciones previas y a la luz de las condiciones encontradas en la unidad U16 a ser evaluada, se definió finalmente el Programa de Pruebas de Consumo Específico Neto de esta unidad que se muestra en la siguiente tabla

Tabla 3-1: Programa de Pruebas de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en Ciclo Combinado con Diésel

Prueba CEN en Ciclo Combinado con Diésel Sábado, 20 de Febrero del 2021 / Domingo, 21 de Febrero del 2021				
Hito		**Potencia**	**Inicio**	**Final**
Sábado, 20 de Febrero del 2021				
Toma de carga y estabilización			17:00	17:15
Prueba CEN a Mínimo Técnico	$P_{Min.\ Téc.}$	178 MW	17:15	18:15
Toma de carga y estabilización			18:15	18:30
Prueba CEN a 2da Carga Intermedia	$P_{2da\ Parcial}$	200 MW	18:30	19:30
Toma de carga y estabilización			19:30	20:25
Prueba CEN a 6ta Carga Intermedia	$P_{6ta\ Parcial}$	320 MW	20:25	21:35
Domingo, 21 de Febrero del 2021				
Toma de carga y estabilización			23:45	00:00
Prueba CEN a Potencia Máxima	$P_{Pot.\ Máx}$	330 MW	00:00	01:00
Toma de carga y estabilización			03:10	03:45
Prueba CEN a 5ta Carga Intermedia	$P_{5ta\ Parcial}$	280 MW	03:45	04:45
Toma de carga y estabilización			04:45	05:30
Prueba CEN a 4ta Carga Intermedia	$P_{4ta\ Parcial}$	260 MW	05:30	06:30
Toma de carga y estabilización			06:30	07:10
Prueba CEN a 3ra Carga Intermedia	$P_{3ra\ Parcial}$	240 MW	07:10	08:10

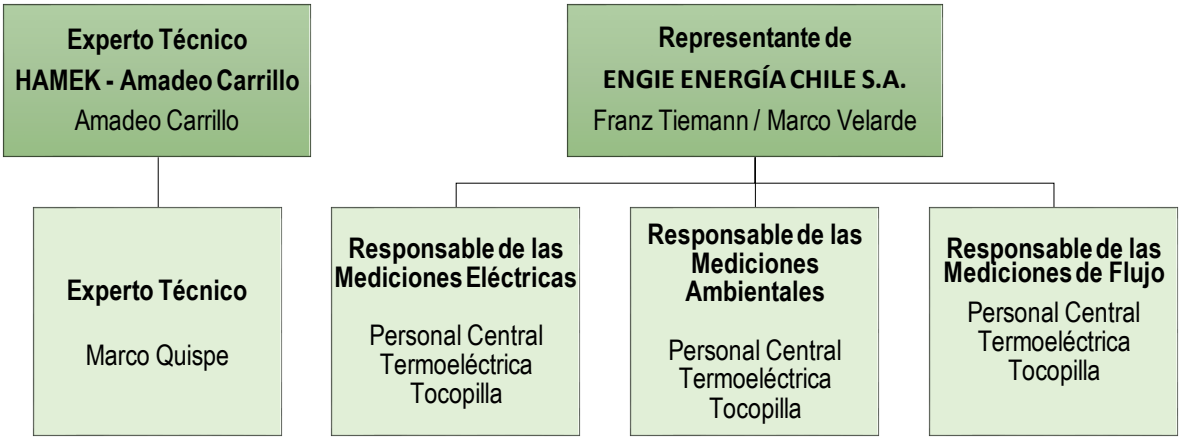
Tabla 3-2: Duración de las Pruebas de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en Ciclo Combinado con Diésel

Descripción	Nomenclatura	Potencia Programada	Duración
Prueba CEN a Mínimo Técnico Ambiental	$P_{Min.\ Téc.\ Amb.}$	178 MW	1 hora.
Prueba CEN a 2da Carga Intermedia	$P_{2da\ Parcial}$	200 MW	1 hora.
Prueba CEN a 3ra Carga Intermedia	$P_{3ra\ Parcial}$	240 MW	1 hora.
Prueba CEN a 4ta Carga Intermedia	$P_{4ta\ Parcial}$	260 MW	1 hora.
Prueba CEN a 5ta Carga Intermedia	$P_{5ta\ Parcial}$	280 MW	1 hora.
Prueba CEN a 6ta Carga Intermedia	$P_{6ta\ Parcial}$	320 MW	1 hora.
Prueba CEN a Potencia Máxima	$P_{Pot.\ Máx}$	330 MW	1 hora.

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 36 del Anexo Técnico, el Consumo Especifico Neto determinado en la prueba correspondiente, podrá ser corregido a fin de homologarla con los valores de referencia para los cuales fue calculado el Consumo Especifico original de garantía. Para ello se hace uso de las Curvas de Corrección de las Unidades Generadoras de la Central Termoeléctrica.

Las condiciones de referencia a las cuales hay que corregir el Consumo Especifico Neto Medido son los que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 5-1: Condiciones de Referencia

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

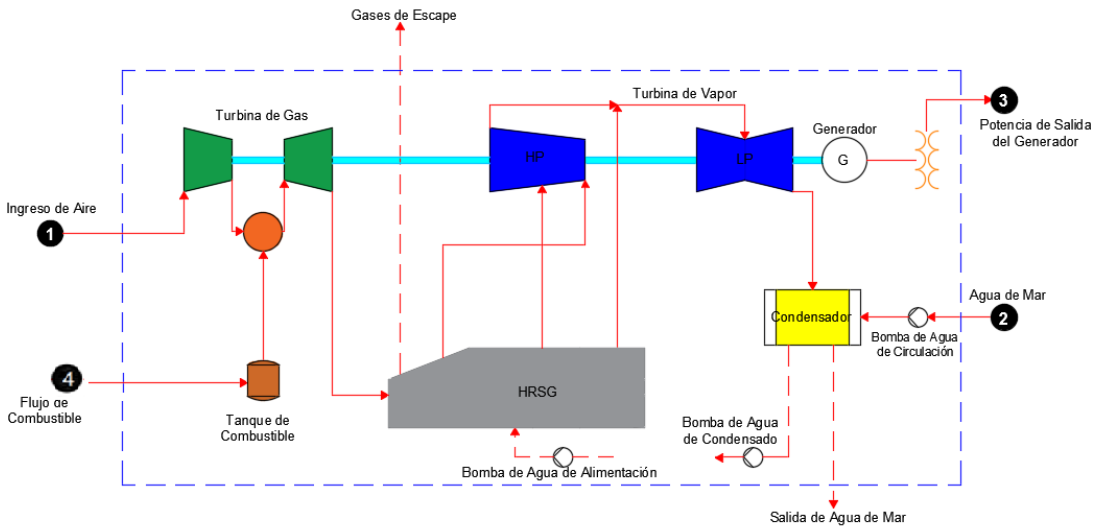
6 FRONTERA DE PRUEBA, MEDICIONES REQUERIDAS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

6.1 Frontera de Prueba y Mediciones Requeridas

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 Combinado

Ilustración 6-1: 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. Ingreso de agua de mar, se requiere medir la temperatura de ingreso de agua de mar al condensador.
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).
4. Flujo de combustible que ingresa a la turbina de gas.

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 Consumos Específicos 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
Consumo de Diésel				
Flujo de Diésel	U16	KRAL AG	OMH1000112006	D93V

7 REPORTE DE COMBUSTIBLE

7.1 Reporte de Diésel

Durante las pruebas de Consumo Específicos Neto, se tomaron dos de muestra de Diésel de la línea de combustible, las cuales fueron enviadas a un laboratorio certificado para su análisis.

Este reporte del laboratorio contiene la siguiente información:

I. Análisis cromatográfico en porcentaje volumétrico o molar que incluya el contenido de hidrocarburos (metano, etano, propano, isobutano, n-butano, isopentano, n-pentano, hexano y heptano), nitrógeno, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico (H_2S).
II. Densidad relativa y densidad
III. Gravedad específica.
IV. Poderes caloríficos superior e inferior.

Del reporte del laboratorio mencionado se ha extraído la siguiente información correspondiente al Diésel.

Tabla 7-1: Reporte de Combustible – Diésel

Reporte	Poder Calorífico Superior			Densidad
	kcal/kg	MJ/kg	BTU/lb	kg/m^3
21/02/2021 - 00:30	10934.49635	45.7805	19682	835.0
21/02/2021 - 06:00	10934.49635	45.7805	19682	834.9
Promedio	**10934.49635**	**45.7805**	**19682.0**	**835.0**

Los reportes de laboratorio, se encuentran en al Apéndice B.

8 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

8.1 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 8-1: Condiciones de estabilidad de la Prueba de Consumo Especifico Neto de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica 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 %

8.2 Cálculos de los Consumos Específicos Neto en Ciclo Combinado

8.2.1 Resultados de los Consumos Específicos Neto Medido ($HRN_{M.CC}$)

Para los datos validados, se determinará el Consumo Especifico Neto Medido o Heat Rate Neto Medido durante el escalón ensayado ($HRN_{M.CC}$); considerando el consumo de diésel, el poder calorífico superior del diésel utilizado como combustible (HHV) y la potencia neta medida en cada carga (escalón) ensayada. Para ellos se aplicará la siguiente formula:

$$HRN_{M.CC} = \frac{\dot{m}_{DIÉSEL} * HHV}{PN_{M.CC}}$$

Donde:

- $HRN_{M.CC}$: Heat Rate Neto Medido, kJ/kWh.
- $\dot{m}_{DIÉSEL}$: Consumo de Diésel, m^3/h o kg/h.
- HHV : Poder Calorífico Superior del Diésel, kJ/m^3 o kJ/kg.
- $PN_{M.CC}$: Potencia Neta Medida, kW.

8.2.2 Cálculo de los Consumos Específicos Neto Corregido ($HRN_{C.CC}$)

Para calcular el valor de Consumo Especifico Neto Corregido o Heat Rate Neto Corregido, estas deberán ser ajustados por medio de la aplicación de factores de corrección multiplicativos. Para ello se aplicará la siguiente formula:

$$HRN_{C.CC} = \frac{HRN_{M.CC}}{\alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4}$$

Donde:

- $HRN_{C.CC}$: Heat Rate Neto Corregido, kJ/kWh.
- $HRN_{M.CC}$: Heat Rate Neto Medido, kJ/kWh.
- 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.

Así mismo, factor de corrección por humedad relativa (α_3) 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.

8.3 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 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 Consumos Específicos Neto Corregido.

8.3.1 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:

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

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 (Consumos Específicos Neto 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:

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

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:

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

El coeficiente de sensibilidad absoluto se obtendrá de:

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

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

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

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:

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

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:

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

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:

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

9 CÁLCULO DE CONSUMO ESPECÍFICO NETO

Los cuadros de cálculo de la prueba de Consumo Especifico Neto de la Unidad Generadora U16 operando con Diésel de la Central Térmica Tocopilla, se muestran en el Apéndice C.

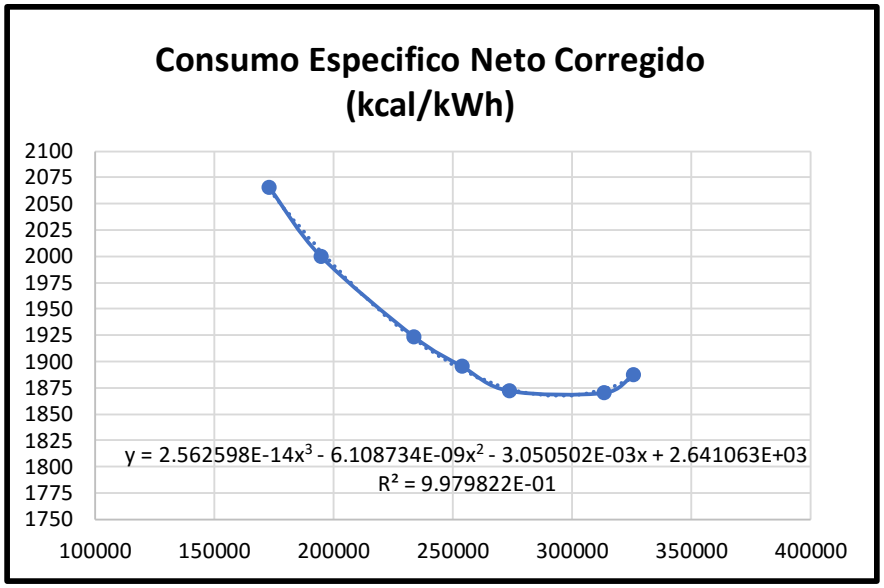
10 RESULTADOS

10.1 Resultados de las Pruebas de Consumos Específicos Neto en Ciclo Combinado

Tabla 10-1: Resultados de las Pruebas de Consumos Específicos Neto de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel

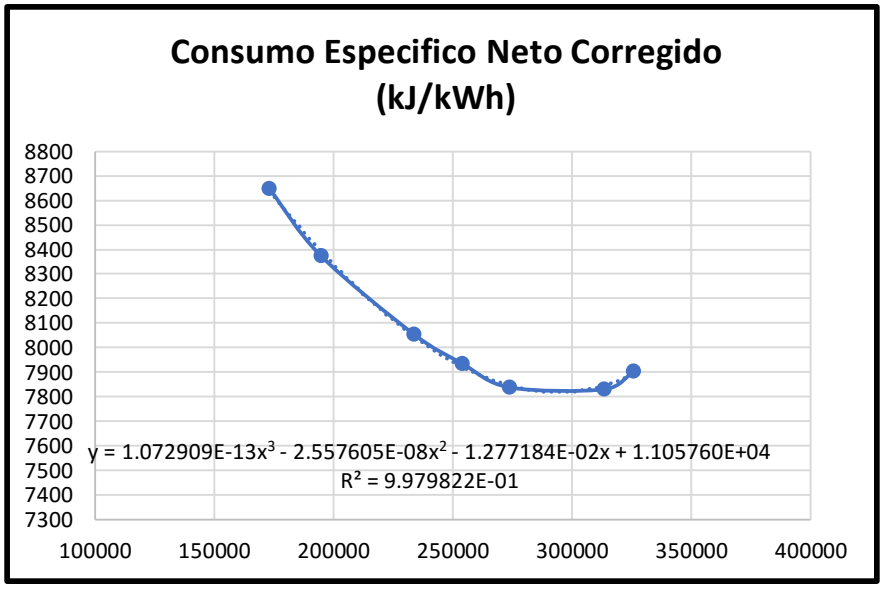
Escalón	Potencia Programada	Potencia Bruta Medida	Potencia Neta Medida	Consumo de Combustible Medido	Consumo Especifico Neto Medido		Consumo Especifico de Combustible Neto Medido (Referido a 11000 kcal/kg)	Eficiencia Neto Medido	Potencia Bruta Corregida	Potencia Neta Corregida	Consumo Especifico Neto Corregido		Incertidumbre		Consumo Especifico de Combustible Neto Corregido (Referido a 11000 kcal/kg)	Eficiencia Neto Corregido
	(kW)	(kW)	(kW)	(m^3/h)	(kcal/kWh)	(kJ/kWh)	(kg/kWh)	(%)	(kW)	(kW)	(kcal/kWh)	(kJ/kWh)	(kcal/kWh)	(kJ/kWh)	(kg/kWh)	(%)
1er Escalón	178000	178121.462	172661.328	32641.684	2067.170	8654.829	0.188	41.595	**178554.876**	**173094.742**	**2065.240**	**8646.746**	**± 14.309**	**± 59.907**	0.188	41.634
2do Escalón	200000	200155.359	194439.067	35599.170	2001.959	8381.801	0.182	42.950	**200314.522**	**194598.229**	**2000.178**	**8374.344**	**± 13.838**	**± 57.937**	0.182	42.988
3er Escalón	240000	240155.955	234267.590	41245.778	1925.157	8060.246	0.175	44.664	**239518.624**	**233630.260**	**1923.759**	**8054.394**	**± 13.327**	**± 55.796**	0.175	44.696
4to Escalón	260000	260179.322	254113.405	44089.090	1897.153	7943.000	0.172	45.323	**259812.429**	**253746.512**	**1895.498**	**7936.071**	**± 13.120**	**± 54.931**	0.172	45.362
5to Escalón	280000	280194.097	274002.343	46942.932	1873.332	7843.266	0.170	45.899	**279869.668**	**273677.914**	**1872.084**	**7838.040**	**± 12.963**	**± 54.272**	0.170	45.930
6to Escalón	320000	320275.305	313585.157	53658.072	1871.020	7833.585	0.170	45.956	**320187.541**	**313497.393**	**1870.271**	**7830.451**	**± 12.954**	**± 54.236**	0.170	45.974
7mo Escalón	330000	332749.771	325981.026	56286.808	1888.048	7904.880	0.172	45.541	**332453.185**	**325684.440**	**1887.672**	**7903.306**	**± 13.080**	**± 54.763**	0.172	45.551

Ilustración 10-1: Curva Característica del Consumo Específico Neto Corregido (kcal/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



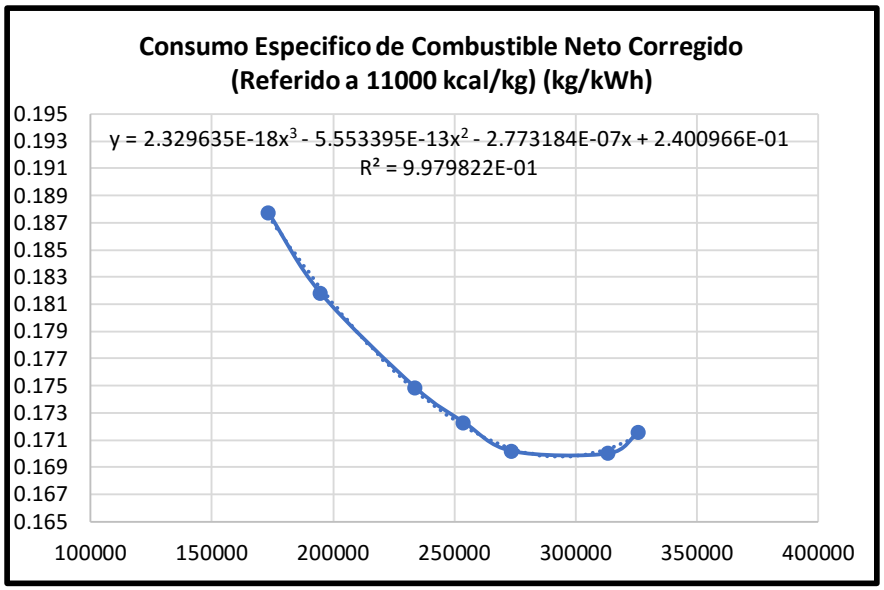
Consumo Especifico Neto Corregido	
(kcal/kWh)	
a_0	2.641063E+03
a_1	-3.050502E-03
a_2	-6.108734E-09
a_3	2.562598E-14

Ilustración 10-2: Curva Característica del Consumo Específico Neto Corregido (kJ/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



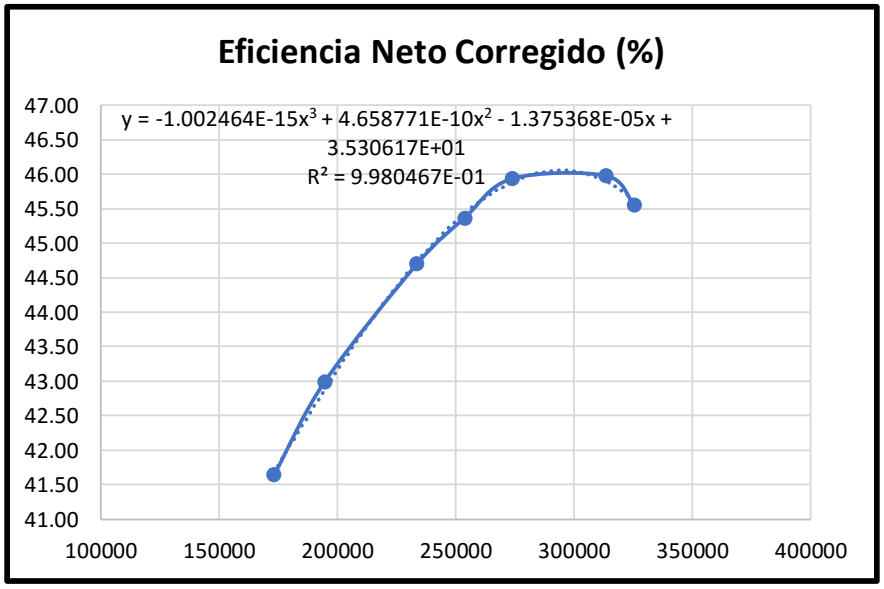
Consumo Especifico Neto Corregido	
(kJ/kWh)	
a_0	1.105760E+04
a_1	-1.277184E-02
a_2	-2.557605E-08
a_3	1.072909E-13

Ilustración 10-3: Curva Característica del Consumo Específico de Combustible Neto Corregido (Referido a 11000 kcal/kg) (kg/kWh) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



Consumo Especifico de Combustible Neto Corregido (Referido a 11000 kcal/kg)	
(kg/kWh)	
a_0	2.400966E-01
a_1	-2.773184E-07
a_2	-5.553395E-13
a_3	2.329635E-18

Ilustración 10-4: Curva Característica de la Eficiencia Neto Corregido (%) de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel



Eficiencia Neto Corregido	
(%)	
a_0	3.530617E+01
a_1	-1.375368E-05
a_2	4.658771E-10
a_3	-1.002464E-15

10.2 Resultados de Incertidumbre en Ciclo Combinado

Tabla 10-2: Resultados de Incertidumbre las Pruebas de Consumos Específicos Neto de la Unidad Generadora U16 de la Central Térmica Tocopilla en la Configuración Ciclo Combinado con Diésel

Prueba de Consumo Específico Neto de la Unidad U16 - Ciclo Combinado - (kcal/kWh)					
Descripción	**CEN_c** Consumo Específico Neto Corregido	Unidad	**B_R** Incertidumbre Sistemático de Cada Escalón	**$t\,S_R$** Incertidumbre Aleatorio de Cada Escalón	U_R Incertidumbre Absoluta Total de Cada Escalón
Consumo Específico Neto Corregido - 1er Escalón	2065.240	kcal/kWh	13.231	5.448	14.309
Consumo Específico Neto Corregido - 2do Escalón	2000.178	kcal/kWh	12.799	5.261	13.838
Consumo Específico Neto Corregido - 3er Escalón	1923.759	kcal/kWh	12.330	5.057	13.327
Consumo Específico Neto Corregido - 4to Escalón	1895.498	kcal/kWh	12.140	4.975	13.120
Consumo Específico Neto Corregido - 5to Escalón	1872.084	kcal/kWh	11.997	4.910	12.963
Consumo Específico Neto Corregido - 6to Escalón	1870.271	kcal/kWh	11.989	4.905	12.954
Consumo Específico Neto Corregido - 7mo Escalón	1887.672	kcal/kWh	12.107	4.951	13.080

Prueba de Consumo Específico Neto de la Unidad U16 - Ciclo Combinado - (kJ/kWh)					
Descripción	**CEN_c** Consumo Específico Neto Corregido	Unidad	**B_R** Incertidumbre Sistemático de Cada Escalón	**$t\,S_R$** Incertidumbre Aleatorio de Cada Escalón	U_R Incertidumbre Absoluta Total de Cada Escalón
Consumo Específico Neto Corregido - 1er Escalón	8646.746	kcal/kWh	55.394	22.811	59.907
Consumo Específico Neto Corregido - 2do Escalón	8374.344	kcal/kWh	53.588	22.025	57.937
Consumo Específico Neto Corregido - 3er Escalón	8054.394	kcal/kWh	51.622	21.174	55.796
Consumo Específico Neto Corregido - 4to Escalón	7936.071	kcal/kWh	50.829	20.829	54.931
Consumo Específico Neto Corregido - 5to Escalón	7838.040	kcal/kWh	50.228	20.558	54.272
Consumo Específico Neto Corregido - 6to Escalón	7830.451	kcal/kWh	50.198	20.535	54.236
Consumo Específico Neto Corregido - 7mo Escalón	7903.306	kcal/kWh	50.689	20.728	54.763

APÉNDICES