INFORME TÉCNICO

PRUEBAS DE CONSUMO ESPECÍFICO EN CENTRAL VENTANAS 4 (RECALCULO PRUEBAS 2021)

CLAVE: IN-DDBB-22-002 REV.: 0 N.º Páginas: 32

Realizado: Francisco Javier González Pindado

Revisado: Jako Cammu, Laborelec

Aprobado: Antonio Alarcón, Laborelec

MOTIVO DE REVISIÓN DEL DOCUMENTO

Revisión 0 (16/01/2023):

- Edición inicial del documento

ÍNDICE

Página

1 RESUMEN EJECUTIVO 5

2 OBJETO DE LAS PRUEBAS 8

3 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES 9

4 DESARROLLO Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS 10

5 MEMORIA DE CÁLCULO 14

5.1 CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN 14

5.2 REGISTRO DE DATOS 14

5.3 MEDIDAS DE POTENCIA. 14

5.4 MEDIDAS AMBIENTALES 15

5.5 CARBÓN, CENIZAS Y ESCORIAS 15

5.6 MEDIDA DE CAUDAL PRIMARIO 15

5.7 MEDIDAS DE OXIGENO Y TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADORES 16

5.8 FACTORES DE CORRECCIÓN 16

5.9 ESTABILIDAD 18

5.10 EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE 21

5.11 CÁLCULOS Y RESULTADOS 22

ANEXO I: DATOS DE PROCESO 23

ANEXO II: CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN 24

ANEXO III: VALORES MEDIOS Y ESTABILIDAD DE LOS DATOS DE LA PRUEBA 25

ANEXO IV: CURVAS DE CORRECCIÓN 26

ANEXO V: INFORMES DE RESULTADOS E INCERTIDUMBRES 27

ANEXO VI: RESULTADOS ANÁLISIS CARBÓN, CENIZAS Y ESCORIAS 28

ANEXO VII: MEDIDAS MALLA DE O2 Y TEMPERATURA.....29

ANEXO VIII: MEDIDA Y CORRECCIÓN CAUDAL ALIMENTACIÓN ULTRASONIDOS.....30

ANEXO IX: DATOS CEMS.....31

ANEXO X: MODELO DE CÁLCULO SOLCEP.....32

1 RESUMEN EJECUTIVO

Este informe recoge el resultado revisado de las Pruebas de Consumo Específico Neto (CEN) de la Central Ventanas 4 con combustible Carbón, realizadas los días 25 a 28 de mayo de 2021, que fueron supervisadas de manera remota, debido a las restricciones COVID, siguiendo la metodología recogida en el documento
"SGE13106 - CEN - Protocolo de pruebas CEN AES Ventanas 4 1.0.pdf"

En el informe técnico "SGE13106 - CEN - Informe de pruebas CEN AES Ventanas Campiche v2.0.pdf" de 7/8/2021, se reportaron al Coordinador los cálculos y resultados de las pruebas obtenidos utilizando las mediciones realizadas. AES, propietario de la central, arguyó en su momento que el valor del CEN obtenido era demasiado pequeño, incluso por debajo del valor de comisionamiento. Tras una revisión exhaustiva de los datos medidos, de los cálculos, y de la influencia de las hipótesis en cuanto a la entalpía y lugar de aplicación del cierre de balance de masas, el Experto Técnico concluyó que los cálculos parecían correctos. El Experto Técnico señaló que el parámetro más importante e influyente en el valor del CEN es el caudal másico de agua de alimentación, medido con un dispositivo de ultrasonidos, cuyos resultados era razonablemente fiable; ya que la velocidad del sonido reportada no difería de la termodinámica en más de un 0.5 %.

Como no pudo determinarse en su momento el origen de la discrepancia, AES decidió repetir las pruebas, que se llevaron a cabo los días 17 a 20 de octubre de 2022 con supervisión presencial del Experto Técnico. En esta ocasión, se contaba con medidas externas de caudales por ultrasonidos en 7 localizaciones diferentes, con el fin de poder realizar los cálculos de dos formas alternativas (utilizando bien la medida del caudal de agua de alimentación, o bien la medida de caudal de condensado). Desafortunadamente, las mediciones de los dispositivos de ultrasonidos resultaron ser completamente inutilizables por diversos motivos de instalación y configuración, hecho que no se supo hasta varios días después de finalizadas las pruebas cuando fueron entregados los datos.

No obstante, las pruebas de 2022 con presencia en sitio del Experto Técnico han servido para identificar el origen de la discrepancia en las pruebas de 2021 las cuales fueros llevadas a cabo de manera remota:

1. Se logró determinar que la medida de caudal másico de agua de alimentación por ultrasonidos se había realizado sin aplicar correcciones por dilatación de la tubería y sin aplicar la densidad real del fluido en la tubería. Aplicando estas correcciones en la revisión de los cálculos, se han obtenido aumentos del CEN, desde el 3.4% a plena carga hasta el 12% a mínimo técnico,

2. Se logró determinar que la forma de muestrear el carbón a la entrada del alimentador era incorrecta, ya que no era representativa de toda la sección del conducto, y por tanto responsable del valor tan elevado del poder calorífico obtenido. Siguiendo las directrices ASME con respecto al dispositivo de muestreo, se demostró que los resultados de los análisis a la entrada del alimentador son correctos y similares a los obtenidos en la cinta de carga de las tolvas.

3. Se logró determinar que el caudal resultado del cierre del balance de masas debe aplicarse en el domo, con la entalpía del agua líquida. Se cuantificaron las fugas a través de la válvula de purga continua y se verificaron fugas a través de la válvula de drenaje de emergencia del domo. Ambas fugas terminan en el sumidero de caldera, en el que la gran apertura de la válvula de atemperación explica la magnitud de las fugas.

Las pruebas de 2021 consistieron en la determinación del valor de CEN en 7 escalones de carga que incluían el de Máxima Carga y el de Mínimo Técnico.

Este informe, con medidas, hipótesis y cálculos revisados, recoge los resultados de los escalones que se reportan al Coordinador Eléctrico para su publicación. El Experto Técnico adjudicado para esta prueba es Laborelec que trabaja en conjunto con la empresa Tecnatom, en adelante “Laborelec-Tecnatom”.

La siguiente tabla recoge el resumen de resultados de CEN calculados y corregidos a condiciones de SITIO.

PRUEBAS CEN CENTRAL VENTANAS 4									
ID	**FECHA**	**HORA INICIO**	**HORA FIN**	**POTENCIA BRUTA (MW)**	**POTENCIA NETA (MW)**	**CEN_PCS (kcal/kWh)**	**CEN_PCS CORR. (kcal/kWh)**	**CEN CORR. (kg/kWh)**	**INCERT CEN CORR. (%)**
270	25/05/2021	13:15	15:15	267.039	246.44	2269.7	2273	0.35795	2.7522
220	25/05/2021	16:45	18:45	218.488	200.06	2343.5	2342.8	0.36894	3.2335
170	26/05/2021	12:30	14:30	168.993	152.65	2430.2	2433.1	0.38316	3.0396
140	26/05/2021	16:15	18:15	139.923	124.24	2546.9	2546.1	0.40097	3.6407
120	27/05/2021	13:00	15:00	119.929	104.88	2646.2	2642.7	0.41618	3.4524
100	27/05/2021	16:30	18:30	99.973	85.709	2729.4	2722	0.42867	4.5248
84	28/05/2021	14:30	16:30	83.797	69.589	3145.5	3147.5	0.49567	4.4760

Nota1: El valor de CEN en unidades de kcal/kWh esta expresado en base al poder calorífico superior

Nota2: El valor de CEN en unidades de kg/kWh esta expresado en base a un carbón de 6350 kcal/kg de poder calorífico superior

Nota 3: Los valores de Potencia Neta son los directamente medidos con contador de energía. Los valores de Potencia bruta son los directamente medidos con contador de energía.

Las condiciones SITIO de la planta son las siguientes:

- Temperatura ambiente = 14.9ºC
- Humedad relativa = 86%
- Presión ambiente = 1.013 bar
- Temperatura agua de mar = 14. ºC
- Factor de potencia = 0.95

Los valores de CEN fueron corregidos por factor de potencia, temperatura del agua de mar y Temperatura ambiente, tal y como se especifica en el Protocolo de Pruebas.

La última columna de la tabla anterior contiene los valores de incertidumbre del valor de CEN corregido.

2 OBJETO DE LAS PRUEBAS

Las Pruebas CEN tienen como objeto establecer una curva de consumo específico de la unidad generadora Ventanas 4. Para ello se realizaron pruebas en 7 escalones de carga incluyendo los de potencia máxima y mínimo técnico. Estos valores deben ser informados al Coordinador Eléctrico Nacional conforme a lo señalado en el artículo 6-13 de la NTSyCS.

El combustible empleado en la prueba fue carbón.

3 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

La Unidad Ventanas 4 (también llamada Campiche) en la Central de Ventanas, propiedad de la compañía eléctrica AES, es una unidad generadora a carbón que comenzó su operación en 2013 y está situada en la comuna de Puchuncaví en la Región de Valparaíso. Cuenta con una turbina de vapor de Ansaldo modelo RH TCDF-43, con recalentamiento simple y 6 calentadores de agua de alimentación, acoplada a un generador a 3000.rpm. El generador de la turbina está conectado al sistema local de 220 kV a través de 1 transformador elevador de 320 MVA. Su potencia máxima declarada es de 272 MW y el mínimo técnico de 84. MW. La caldera para generación de vapor es de Doosan Heavy Industries con fuegos cruzados y circulación forzada, cuyas condiciones nominales son para el vapor sobrecalentado/recalentado 748.71/675.302 t/h, 565/565ºC y 160.1/40.58 bar.

La Central Ventanas 4 dispone de sistemas de abatimiento del SO2, basado en lechada de cal, y de abatimiento de material particulado, utilizando filtros de manga.

La Central Ventanas 4 está refrigerada por agua de mar.

Los resultados del Performance Test de aceptación en 2013, corregidos a condiciones SITIO, fueron los siguientes: Potencia Neta 255.83 MW, CEN (PCS) 9352.9 kJ/kWh (2233.9 kcal/kWh).

4 DESARROLLO Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se realizaron los días 25 a 28 de mayo de 2021.

Las pruebas transcurrieron sin incidencias reseñables, excepto para el escalón de mínimo técnico (84 MW). En este escalón la variación tanto de la temperatura de vapor principal como las de recalentado fue de aproximadamente 12ºC. Esta variación fue considerada aceptable por parte del Experto Técnico, teniendo en cuenta que a mínimo técnico el control de las temperaturas siempre muestra una mayor dificultad; y considerando que el efecto de esta variabilidad está contabilizado con un valor mayor de la incertidumbre.

Antes de dar comienzo a cada escalón de carga se verificaron que los criterios de estabilidad se habían alcanzado durante el periodo de estabilización. Las pruebas cumplieron razonablemente con los criterios de estabilidad recogidos en el Protocolo como se explica en la sección 5.9.

Durante la prueba no se produjo ninguna incidencia en el sistema de adquisición de datos online.

Para el cálculo revisado de las pruebas se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos que no habían sido considerados en el cálculo original:

- El caudal de agua de alimentación medido con ultrasonidos se corregirá con la densidad real del fluido en la línea y teniendo en cuenta el efecto de la dilatación.
- El caudal resultante del cierre del balance de masas se aplica en el domo con la entalpía del agua líquida. Este caudal de fuga es debido al cierre defectuoso de las válvulas de purga continua y de las válvulas de drenaje de emergencia del domo. Este caudal fugas se dirige al sumidero de caldera, donde son atemperadas y salen del ciclo.

Conviene recordar también la consideración de los siguientes aspectos que ya fueron tenidos en cuenta en el cálculo original:

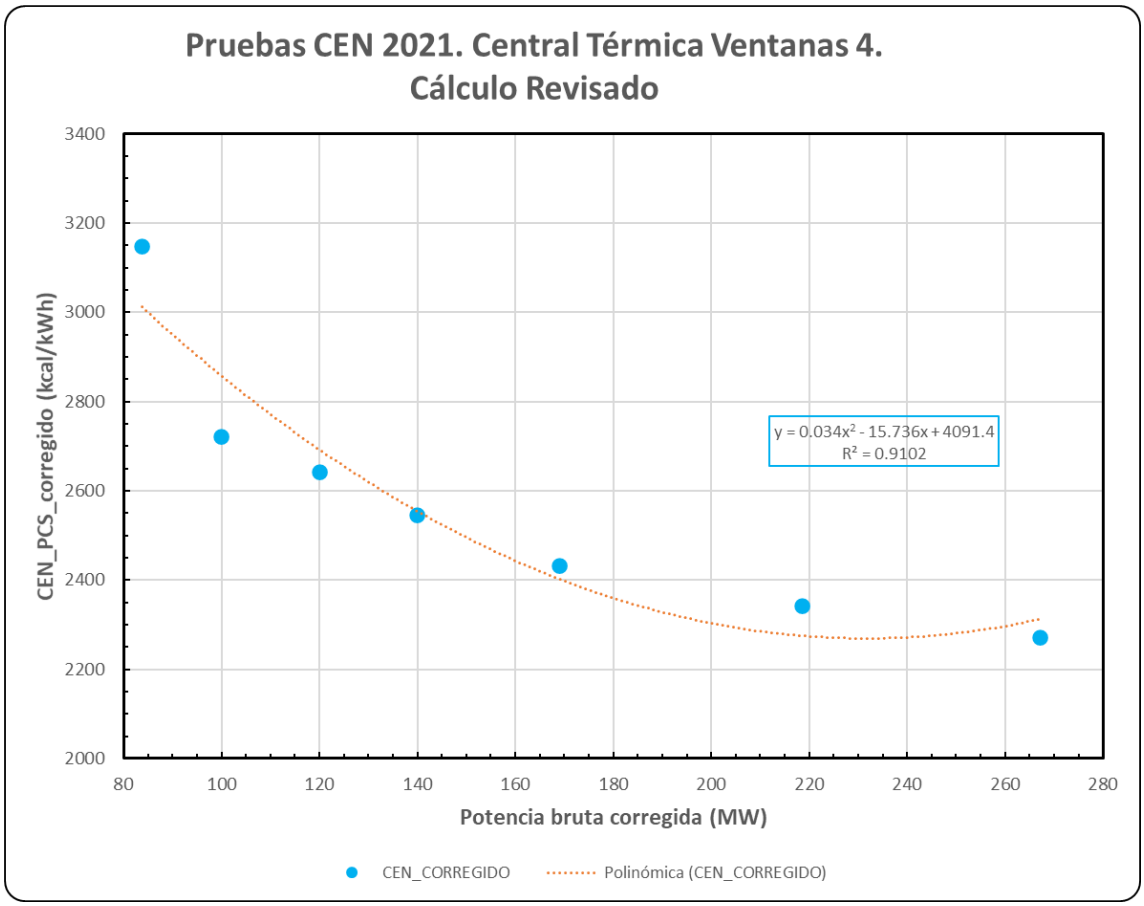
- El análisis de carbón será el del muestreador automático en la cinta de entrada a las tolvas. Las muestras tomadas a la entrada a los alimentadores se descartaron por falta de representatividad.
- Los consumos de los Edificios Administrativos y del Parque de Carbón se consideran nulos por estar tomados de otra unidad. Para la Planta de Agua se ha tomado el consumo nominal de 170 kW.

A continuación, se adjunta una tabla resumen con los resultados de las pruebas. En ella, se pueden observar los parámetros principales medidos y calculados en las pruebas.

PRUEBAS CEN CENTRAL VENTANAS 4								
ESCALÓN		**270**	**220**	**170**	**140**	**120**	**100**	**84**
FECHA/HORA INICIO PRUEBA		25/05/2021 13:15	25/05/2021 16:45	26/05/2021 12:30	26/05/2021 16:15	27/05/2021 13:00	27/05/2021 16:30	28/05/2021 14:30
FECHA/HORA FIN PRUEBA		25/05/2021 15:15	25/05/2021 18:45	26/05/2021 14:30	26/05/2021 18:15	27/05/2021 15:00	27/05/2021 18:30	28/05/2021 16:30
PARÁMETROS Y CONDICIONES SITIO								
Temperatura Ambiente.	ºC	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9
Humedad Relativa	%	86	86	86	86	86	86	86
Presión Ambiente	bar	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146	1.0146
Temperatura Agua Mar	ºC	14	14	14	14	14	14	14
Factor de potencia de referencia	-	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
MEDIDAS AMBIENTALES								
Temperatura ambiente	ºC	17.603	15.743	15.384	15.741	14.142	14.354	15.464
Presión atmosférica	mmHg	760.98	760.81000	761.00000	760.43000	760.53	760.38000	762.43
Humedad relativa	%	62.333	71	70.5	76	82	85.5	77
Temperatura Agua Mar	ºC	13.6045	13.7845	12.9765	13.6855	13.4895	13.8675	13.3235
MEDIDAS ELÉCTRICAS								
Potencia bruta contador	MW	267.039	218.488	168.993	139.923	119.929	99.973	83.797
Potencia neta contador	MW	246.440	200.060	152.650	124.240	104.880	85.709	69.589
Factor de potencia	-	0.94955	0.95356	0.9625	0.94537	0.97088	0.95374	0.96331
AUXILIARES ELÉCTRICOS A DESCONTAR								
Consumo planta de agua	kW	170	170	170	170	170	170	170
Consumo Edificios Administrativos	kW	0	0	0	0	0	0	0
Consumo Parque Carbón	kW	0	0	0	0	0	0	0

PRUEBAS CEN CENTRAL VENTANAS 4								
ESCALÓN		**270**	**220**	**170**	**140**	**120**	**100**	**84**
FACTORES DE CORRECCIÓN								
Factor corrección Tmar	-	0.999569	0.999591	0.997185	0.998960	0.998282	0.999451	0.996937
Factor de corrección FP	-	1.000004	0.999965	0.999882	1.000040	0.999829	0.999977	0.999900
Factor de corrección Tambiente	-	1.001118	0.999297	0.998674	0.998672	0.996880	0.996554	0.997697
RESULTADOS MEDIDOS								
Consumo Específico base PCS	kcal/kWh	2269.7	2343.5	2430.2	2546.9	2646.2	2729.4	3145.5
Consumo Específico base PCI	kcal/kWh	2154.6	2224.6	2306.9	2417.7	2512	2590.9	2985.9
Consumo Específico normalizado (PCS 6350 kcal/kg)	kg/kWh	0.35743	0.369050	0.382710	0.401090	0.41673	0.429830	0.49535
Consumo de carbón calculado	t	182.41	152.910	121.020	103.260	90.59	76.386	71.507
Consumo de carbón medido	t	194.73	158.460	126.710	107.580	95.247	82.284	74.237
RESULTADOS CORREGIDOS								
Potencia Bruta	MW	267.04	218.48	168.975	139.928	119.911	99.971	83.79
Potencia Neta CEN	MW	246.611	200.222	152.797	124.412	105.032	85.877	69.752
Consumo Específico base PCS	kcal/kWh	2273	2342.8	2433.1	2546.1	2642.7	2722	3147.5
Consumo Específico normalizado (PCS 6350 kcal/kg)	kg/kWh	0.357950	0.368940	0.383160	0.400970	0.416180	0.428670	0.495670

La figura siguiente muestra gráficamente los resultados revisados de CEN obtenidos en las pruebas. Se ha incluido en el gráfico la regresión cuadrática de los puntos de la prueba.



5 MEMORIA DE CÁLCULO

5.1 CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN

Los certificados de calibración de los instrumentos empleados en la prueba se pueden consultar en el Anexo II.

5.2 REGISTRO DE DATOS

Como sistema principal de recogida de los datos instrumentados online se ha empleado el Servidor de Datos del sistema de control de la central, rescatando los datos con una periodicidad de 1 min.

Las medidas de energía neta entregada a la red se rescataron de una aplicación dedicada, con datos registrados cada 15 minutos.

Los valores del contador local de consumo de vapor en la desaladora se registraron a mano cada 15 minutos en los escalones en que hubo consumo.

La velocidad del viento se registró con un instrumento portátil, realizando una medida hacia la mitad del periodo de prueba de cada escalón de carga.

Los valores de la instrumentación externa temporal se rescataron con posterioridad y se entregaron varios días después de las pruebas. En esta categoría se incluyen el caudalímetro de agua de alimentación ultrasónico, y las medidas en malla de la temperatura, contenido de O2 y contenido de CO en los gases a la salida de los cambiadores aire-humos.

El Anexo I contiene los ficheros de referencia con los valores registrados de todas las señales de proceso del ordenador de planta, los medidores de energía de la aplicación dedicada, la humedad relativa obtenida de fuentes externas y el consumo de vapor de la desaladora registrado a mano.

El Anexo VII contiene los ficheros de referencia con los valores registrados en los gases de salida de los precalentadores aire-humos.

El Anexo VIII contiene el fichero de referencia con los valores registrados y revisados del caudal de agua de alimentación medido con el dispositivo ultrasónico.

El Anexo III contiene el fichero con los valores medios de los datos de la prueba utilizados en el cálculo del CEN.

El Anexo IX contiene, a título informativo, las medidas realizadas en el sistema de control de emisiones CEMS.

5.3 MEDIDAS DE POTENCIA.

Se dispone de las medidas de Energía Bruta y Neta correspondientes a la Turbina de Vapor, con las que se calculan las Potencias Bruta y Neta de la unidad y la Potencia Auxiliar consumida total, que incluye también las pérdidas por transformación. Estos instrumentos son de clase 02 calibrados. Sus registros se incluyeron en el Anexo I.

A la potencia neta se le ha sumado la potencia de los consumos eléctricos auxiliares de Edificios Administrativos, Planta de Agua y Parque de Carbón, para calcular la Potencia Neta de la Unidad de acuerdo con el Protocolo.

Los consumos eléctricos de Edificios Administrativos y del Parque de Carbón se consideraron nulos por estar alimentados desde otra unidad. Para el consumo eléctrico de la Planta de Agua se tomó un valor constante de referencia de 170 kW.

5.4 MEDIDAS AMBIENTALES

Las medidas de la estación meteorológica y del agua de mar están integradas en el Servidor de Datos de Planta.

La señal de humedad relativa llegó defectuosa por lo que se decidió sustituirla por la reportada en el Servicio Meteorológico de la Región de Puchuncaví-Quintero. Sus valores se pueden consultar en el Anexo I. No obstante, su influencia sobre los resultados de la prueba es mínima.

5.5 CARBÓN, CENIZAS Y ESCORIAS

Se realizaron muestreos de carbón a la entrada de los alimentadores, para su análisis y utilización en los cálculos del consumo específico, hacia la mitad del tiempo de duración de cada escalón.

Se realizaron muestreos de cenizas volantes y escorias al final del tiempo de cada escalón ensayado.

En el Anexo VI se adjuntan los resultados de los análisis del carbón, cenizas y escorias muestreados en los escalones ensayados. Los análisis de carbón e inquemados en cenizas y escorias fueron realizados por un laboratorio independiente.

Debido a la inconsistencia de los datos del análisis de carbón de las muestras tomadas a la entrada de los alimentadores (poder calorífico muy alto), se decidió realizar los cálculos con el análisis semanal del muestreador automático de las cintas de llenado de las tolvas de los molinos.

Las pruebas de 2022 han demostrado que la forma de muestrear en los alimentadores era errónea y que el análisis del muestreador automático en las cintas de carga de las tolvas es similar al de entrada a los alimentadores cuando se muestrea con un dispositivo tipo ASME. Por tanto, los cálculos se realizaron con el análisis semanal del muestreador automático.

Todos los análisis de carbón, cenizas y escorias se encuentran en el Anexo VI. También se puede encontrar en el Anexo VI la justificación de la decisión en cuanto a la representatividad del análisis de carbón basada en los análisis de las muestras de 2022.

5.6 MEDIDA DE CAUDAL PRIMARIO

Como caudal primario se ha utilizado una medida externa de caudal de agua de alimentación a caldera, realizada con un dispositivo de ultrasonidos.

La medida de caudal de agua de alimentación reportada en 2021, se corrige en este nuevo cálculo para tener en cuenta la influencia de la dilatación en el diámetro de la tubería, y la influencia de la densidad real del fluido. La medida de caudal reportada se basó en un diámetro de tubería constante, e igual al nominal a 20ºC, y en una densidad constante muy diferente a la real.

En el Anexo VIII se recogen los cálculos de corrección realizados sobre los cálculos originales y una comparativa entre ambos, también se recoge la justificación razonada de la corrección.

5.7 MEDIDAS DE OXIGENO Y TEMPERATURA SALIDA PRECALENTADORES

Durante las pruebas se instaló una malla de medidas para determinar los contenidos de O2 y CO, y la temperatura en los gases de salida de los precalentadores de aire-humos. Los resultados se recogen en el Anexo VII.

5.8 FACTORES DE CORRECCIÓN

Los resultados de la prueba CEN se han corregido a condiciones de Referencia SITIO. Las condiciones SITIO para la Central de Ventanas 4 son: 1.013 bar, 14.9ºC, y 86% de humedad relativa para las condiciones ambientales, 14.ºC para la temperatura del agua de mar y factor de potencia 0.95.

Para las pruebas CEN solo se corregirán los resultados por temperatura de agua de mar, por factor de potencia y por temperatura ambiente. Las curvas de corrección empleadas se recogen en el Anexo IV.

Ya que no se dispone de curvas de corrección para toda la planta en conjunto, se seguirá la siguiente metodología:

·Corrección del rendimiento de caldera con las condiciones ambientales. Mediante un cálculo ASME PTC4 de pérdidas separadas en que se sustituyen las condiciones ambientales actuales por las de SITIO.

·Corrección del consumo específico del ciclo de turbina de vapor exclusivamente por temperatura de agua de mar y su influencia en la presión del condensador. Para ello se utiliza la curva de corrección correspondiente del fabricante de turbina.

·Corrección de la potencia bruta a factor de potencia de 0.95. Para ello se utiliza la curva de pérdidas en el generador suministrada por el fabricante.

Obtención de la potencia neta corregida y del consumo específico de la planta corregido mediante los valores corregidos anteriores.

$$CEN_{corregido} = \frac{100}{\eta_{CALDERA_corregido}} \cdot \left(CEC_{corregido} \cdot Potb_{corregida} + QrO - CTCC\right) \cdot \frac{1}{Potneta_{corregida}}$$

$$Potb_{corregida_PF} = Potb + \left(Gen_{loss_{prueba}} - Gen_{loss_{PF\ 0.95}}\right)$$

$$Potb_{corregida_total} = \frac{Potb_{corregida_PF}}{(1 - FCC_{aguamar})}$$

$$Potneta_{corregida} = Potb_{corregida_{total}} - PotAux - Pérdidas_{TRAFO}$$

$$Potneta_{corregida_CEN} = Potneta_{corregida} + Pot_{Plantaagua} + Pot_{edificios} + Pot_{transp.carbon}$$

$$CEC_{corregido} = \frac{CEC}{(1 + FCC_{aguamar})}$$

$$CEC = consumo\ específico\ de\ ciclo, \frac{kcal}{kWh}$$

$$QrO = potencia\ dada\ por\ caldera, MW$$

$$CTCC = potencia\ al\ ciclo\ de\ turbina\ vapor, MW$$

$$QrO - CTCC = auxiliares\ de\ vapor\ caldera, MW$$

El CEN corregido se puede expresar también a partir del CEN medido mediante los factores corrección de CEN (*fchr*$_i$).

$$CEN_{corregido} = CEN / \prod fchr_i$$

definidos como

$$fchr_{Tmar} = \frac{CEC}{CEC_{corregido}}$$

$$fchr_{Tamb} = \frac{\eta_{CALDERA}}{\eta_{CALDERA_{corregido}}}$$

$$fchr_{FP} = \frac{Potneta_{corregida}}{Potneta}$$

<u>Factor de Corrección por Temperatura de Agua de Mar, FCC$_{aguamar}$</u>

FCC$_{aguamar}$ = FCP - FCP_sw

Donde FCP es la corrección por presión objetivo del condensador a la temperatura de agua del mar actual, y FCP_sw es la corrección por presión objetivo del condensador a la temperatura del agua de mar de referencia SITIO.

La curva de corrección del CEC por Presión del Condensador empleada, está incluida en el Anexo X (ver archivo adjunto Modelo de cálculo CEN, Módulo “PRCORRCND : PR. Correccion condensador Tmar. - Lista de Variables”, línea 57 variable FCP “Corrección por presión objetivo actual”:

FCP (%) = 1.483 * (- 8.77098 + 0.11069 * MrStp - 2.94787E-05 * MrStp ^ 2 + 9.75923 PStCondP + 3.13421E+03 * PStCondP ^ 2 - 2.67283E+04 * PStCondP ^ 3 + 8.3579E+04 * PStCondP ^ 4 - 9.5414E+04 * PStCondP ^ 5 - 1.5423 * MrStp * PStCondP + 7.12269 * MrStp * PStCondP ^ 2 - 5.1342E-03 * MrStp ^ 2 * PStCondP + 2.93906E+03 * PStCondP / MrStp)

donde

MrStp es el caudal de vapor de escape de la turbina en % sobre 135.686 kg/s (caudal de diseño a máxima carga).

PStCondP es la presión objetivo del condensador en bar.

La presión objetivo del condensador se obtiene de un modelo de simulación del comportamiento del condensador que tiene como entradas la carga térmica, el caudal de vapor, el salto térmico, el caudal de agua de circulación y la temperatura del agua de mar. Este modelo de simulación se construyo y ajustó teniendo en cuenta los datos geométricos, el material de los tubos y los datos de diseño térmico del condensador.

En el Anexo IV, se encuentra el gráfico y regresión de las curvas de corrección empleadas, que suponen una estimación utilizando curvas de otra turbina similar; curvas que fueron adaptadas para que ajustasen lo mejor posible a la única curva oficial del 100% que aparece en la documentación de referencia, incluida también en el Anexo IV.

5.9 ESTABILIDAD

La estabilidad de los datos durante la prueba se calculó partiendo de los datos minutales de la prueba registrados. Los parámetros calculados son los valores medios, la fluctuación respecto a esos valores medios y la desviación típica. El Anexo III contiene una hoja Excel resumen con estos parámetros.

La siguiente tabla recoge, para todos los escalones, los valores medios, la fluctuación en las mismas unidades, y la fluctuación y desviación típica porcentual de las variables establecidas en el Protocolo como criterio de estabilidad. En amarillo se resaltan las que no cumplieron el límite establecido.

Para los 7 escalones de carga ensayados solo se sobrepasan ligeramente estos límites en algunas ocasiones, por lo que son válidos desde este aspecto. En cualquier caso, la variabilidad de estos parámetros está considerada en el término de variabilidad del cálculo de incertidumbres.

PRUEBAS CEN CENTRAL VENTANAS 4. ESTABILIDAD						
	ESCALON		270			
25/05/2021 13:15						
25/05/2021 15:15		PROMEDIO	FLUCTUACIÓN	FLUCTUACIÓN	SIGMA	Límite
Variable	**Unidad**	-	-	%	%	
Presión de Vapor	barg	159.33	2.05	1.29	0.27	0.3%
Temperatura vapor sobrecalentado	ºC	556.96	4.72	0.85	0.26	5ºC
Temperatura vapor recalentado	ºC	568.09	4.77	0.84	0.25	5ºC
Caudal agua de alimentación	t/h	741.65	15.57	2.10	0.85	3%
Presión del Condensador	barg	-0.9789	-0.00161	0.16	0.07	0.0014bar
Potencia bruta watímetro	MW	268.26	2.21	0.82	0.32	0.25%
Voltaje Generador	kV	18.168	0.03	0.19	0.06	1%
Velocidad Turbina	rpm	3000.3	12.70	0.42	0.17	0.25%
Contenido O2 entrada precalentador	%	2.68	1.39	51.97	5.30	0.5puntos
Contenido O2 salida precalentador	%	5.84	0.34	5.79	1.57	0.5puntos

PRUEBAS CEN CENTRAL VENTANAS 4. ESTABILIDAD						
	ESCALON		**220**			
25/05/2021 16:45						
25/05/2021 18:45		**PROMEDIO**	**FLUCTUACIÓN**	**FLUCTUACIÓN**	**SIGMA**	**Límite**
Variable	**Unidad**	**-**	**-**	**%**	**%**	
Presión de Vapor	barg	159.89	1.85	1.16	0.36	0.3%
Temperatura vapor sobrecalentado	ºC	559.69	9.84	1.76	0.61	5ºC
Temperatura vapor recalentado	ºC	568.11	7.40	1.30	0.45	5ºC
Caudal agua de alimentación	t/h	613.63	17.79	2.90	1.01	3%
Presión del Condensador	barg	-0.98046	-0.00168	0.17	0.05	0.0014bar
Potencia bruta watímetro	MW	219.41	2.30	1.05	0.45	0.25%
Voltaje Generador	kV	17.985	0.02	0.14	0.04	1%
Velocidad Turbina	rpm	2997.1	10.42	0.35	0.15	0.25%
Contenido O2 entrada precalentador	%	2.85	0.47	16.50	2.02	0.5puntos
Contenido O2 salida precalentador	%	5.98	0.22	3.62	1.52	0.5puntos
	ESCALON		**170**			
26/05/2021 12:30						
26/05/2021 14:30		**PROMEDIO**	**FLUCTUACIÓN**	**FLUCTUACIÓN**	**SIGMA**	**Límite**
Variable	**Unidad**	**-**	**-**	**%**	**%**	
Presión de Vapor	barg	160.26	1.69	1.05	0.36	0.3%
Temperatura vapor sobrecalentado	ºC	562.82	5.90	1.05	0.29	5ºC
Temperatura vapor recalentado	ºC	567.25	6.58	1.16	0.31	5ºC
Caudal agua de alimentación	t/h	477.97	13.01	2.72	1.06	3%
Presión del Condensador	barg	-0.98455	-0.00203	0.21	0.07	0.0014bar
Potencia bruta watímetro	MW	169.75	2.34	1.38	0.48	0.25%
Voltaje Generador	kV	17.891	0.01	0.04	0.02	1%
Velocidad Turbina	rpm	2998.6	10.79	0.36	0.13	0.25%
Contenido O2 entrada precalentador	%	2.86	0.26	9.15	1.41	0.5puntos
Contenido O2 salida precalentador	%	6.41	0.26	4.06	1.48	0.5puntos
	ESCALON		**140**			
26/05/2021 16:15						
26/05/2021 18:15		**PROMEDIO**	**FLUCTUACIÓN**	**FLUCTUACIÓN**	**SIGMA**	**Límite**
Variable	**Unidad**	**-**	**-**	**%**	**%**	
Presión de Vapor	barg	160.9	1.20	0.75	0.19	0.3%
Temperatura vapor sobrecalentado	ºC	568.06	3.19	0.56	0.15	5ºC
Temperatura vapor recalentado	ºC	570.28	2.27	0.40	0.09	5ºC
Caudal agua de alimentación	t/h	403.75	21.35	5.29	1.45	3%
Presión del Condensador	barg	-0.98407	-0.00115	0.12	0.02	0.0014bar
Potencia bruta watímetro	MW	140.39	1.18	0.84	0.31	0.25%
Voltaje Generador	kV	17.884	0.01	0.04	0.02	1%
Velocidad Turbina	rpm	2994.1	14.55	0.49	0.22	0.25%
Contenido O2 entrada precalentador	%	3.18	0.46	14.44	1.81	0.5puntos
Contenido O2 salida precalentador	%	6.53	0.31	4.69	1.42	0.5puntos
	ESCALON		**120**			

PRUEBAS CEN CENTRAL VENTANAS 4. ESTABILIDAD						
27/05/2021 13:00						
27/05/2021 15:00		**PROMEDIO**	**FLUCTUACIÓN**	**FLUCTUACIÓN**	**SIGMA**	**Límite**
Variable	**Unidad**	**-**	**-**	**%**	**%**	
Presión de Vapor	barg	160.81	0.97	0.60	0.18	0.3%
Temperatura vapor sobrecalentado	ºC	530.3	4.74	0.89	0.26	5ºC
Temperatura vapor recalentado	ºC	538.39	5.76	1.07	0.30	5ºC
Caudal agua de alimentación	t/h	363.5	15.37	4.23	1.47	3%
Presión del Condensador	barg	-0.98608	-0.00160	0.16	0.06	0.0014bar
Potencia bruta watímetro	MW	120.36	1.37	1.14	0.33	0.25%
Voltaje Generador	kV	17.728	0.01	0.04	0.02	1%
Velocidad Turbina	rpm	2996.3	10.84	0.36	0.15	0.25%
Contenido O2 entrada precalentador	%	3.96	0.31	7.71	1.32	0.5puntos
Contenido O2 salida precalentador	%	8.02	0.40	4.93	1.48	0.5puntos
	ESCALON		**100**			
27/05/2021 16:30						
27/05/2021 18:30		**PROMEDIO**	**FLUCTUACIÓN**	**FLUCTUACIÓN**	**SIGMA**	**Límite**
Variable	**Unidad**	**-**	**-**	**%**	**%**	
Presión de Vapor	barg	157.33	1.05	0.67	0.19	0.3%
Temperatura vapor sobrecalentado	ºC	538.67	4.92	0.91	0.26	5ºC
Temperatura vapor recalentado	ºC	549.03	4.12	0.75	0.26	5ºC
Caudal agua de alimentación	t/h	303.71	13.14	4.33	1.90	3%
Presión del Condensador	barg	-0.98509	-0.00111	0.11	0.05	0.0014bar
Potencia bruta watímetro	MW	100.21	1.30	1.30	0.36	0.25%
Voltaje Generador	kV	17.745	0.02	0.09	0.03	1%
Velocidad Turbina	rpm	2998.2	14.26	0.48	0.24	0.25%
Contenido O2 entrada precalentador	%	4.30	0.36	8.35	1.34	0.5puntos
Contenido O2 salida precalentador	%	8.55	0.34	3.99	1.51	0.5puntos
	ESCALON		**84**			
28/05/2021 14:30						
28/05/2021 16:30		**PROMEDIO**	**FLUCTUACIÓN**	**FLUCTUACIÓN**	**SIGMA**	**Límite**
Variable	**Unidad**	**-**	**-**	**%**	**%**	
Presión de Vapor	barg	150.83	0.96	0.64	0.16	0.3%
Temperatura vapor sobrecalentado	ºC	553.48	6.55	1.18	0.39	5ºC
Temperatura vapor recalentado	ºC	560.47	6.92	1.23	0.40	5ºC
Caudal agua de alimentación	t/h	277.9	14.60	5.25	1.88	3%
Presión del Condensador	barg	-0.98784	-0.00079	0.08	0.03	0.0014bar
Potencia bruta watímetro	MW	84.03	1.11	1.33	0.46	0.25%
Voltaje Generador	kV	17.745	0.00	0.02	0.01	1%
Velocidad Turbina	rpm	2999.7	19.87	0.66	0.23	0.25%
Contenido O2 entrada precalentador	%	5.78	0.36	6.25	0.95	0.5puntos
Contenido O2 salida precalentador	%	10.20	0.42	4.16	1.13	0.5puntos

5.10 EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Con ayuda del Informe “IncertCEN” del software SOLCEP se ha evaluado la incertidumbre en el resultado del Consumo Específico y de su valor corregido.

Este modelo permite calcular la incertidumbre total, a partir de la incertidumbre de cada señal, teniendo en cuenta tanto la incertidumbre sistemática debida al instrumento como la incertidumbre temporal debida a la variabilidad de la señal, para ello se ha utilizado la metodología incluida en el código “ASME-PTC-19.1 Test Uncertainty”:

$$\mathrm{Inc_R} = \left(\mathrm{Inc}_{\mathrm{S_R}}^2 + \mathrm{Inc}_{\mathrm{B_R}}^2\right)^{1/2} = \left(\left(\mathrm{t}_{\nu,0.025}\right)^2 \cdot \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{k}} \left(\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \mathrm{x_i}} \mathrm{S_{x_i}}\right)^2 + \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{k}} \left(\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \mathrm{x_i}} \mathrm{B_{x_i}}\right)^2\right)^{1/2}$$

Donde

$\mathrm{Inc_R}$= incertidumbre total

R = Variable de salida para la que se calcula la incertidumbre

x = señal

S_{xi} = índice de precisión (desviación típica)

B_{xi} = límite de “bias” (error sistemático)

($t_{\nu,0.025}$) = t de Student para un nivel de confianza del 95%

$\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \mathrm{x_i}}$ = peso de la variación de la variable x_i en el resultado

Los valores de $\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \mathrm{x_i}}$ se calculan haciendo variar, en el informe “PruebaCEN”, cada variable en una cantidad igual a B_{xi} y evaluando la variación en el resultado. Este proceso se activa con una opción del software SOLCEP que permite hacerlo de manera automática.

La incertidumbre asignada por Bias es la extraída de los certificados de calibración y en su defecto por los valores recomendados en las normas ASME.

La incertidumbre por Variabilidad o desviación típica es la calculada con los datos registrados.

El valor de las derivadas o pesos de cada variable en el resultado se obtiene utilizando el software SOLCEP para cada escalón de carga ensayado, ya que en general estas derivadas dependen de la carga.

En el Anexo V se recogen los resultados del informe “IncertPotCEN” para cada escalón de carga.

También en el Anexo V se recoge un fichero Excel con los valores de la incertidumbre asignada por bias.

5.11 CÁLCULOS Y RESULTADOS

En el Anexo V se recogen los informes de resultados de cálculo del CEN y de su incertidumbre, ejecutados con el software SOLCEP para cada escalón ensayado. Estos informes leen de manera automática los datos registrados durante cada escalón y almacenados en ficheros de datos construidos con los valores promedios extraídos de la hoja Excel adjunta en el Anexo III

El modelo de cálculo de SOLCEP, descrito de manera sucinta en el Protocolo de las Pruebas, se detalla en el Anexo X, donde se ha incluido también un fichero con los diagramas de proceso simplificados.

ANEXO I:

DATOS DE PROCESO

Data proceso DCS_270.xlsx

Data proceso DCS_220.xlsx

Data proceso DCS_170.xlsx

Data proceso DCS_140.xlsx

Data proceso DCS_120.xlsx

Data proceso DCS_100.xlsx

Data proceso DCS_84.xlsx

Registro vapor TVC.xlsx

RHM.xlsx

Data medidores electricos 25-5-21_27(

Data medidores electricos 25-5-21_22(

Data medidores electricos 26-5-21_17(

Data medidores electricos 26-5-21_14(

Data medidores electricos 27-5-21_12(

Data medidores electricos 27-5-21_10(

Data medidores electricos 28-5-21_84.

ANEXO II:

CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN

1.Calibración_P_T_O2_flow_proceso.pdf

2.Calibración_malla_gases.pdf

4.Calibración_caudal_alimentación_ultrasoni

3.Calibraciones_eléctricas.pdf

Lista variables prueba CEN VEN4.xls:

Carta respuesta 20.04.docx

ANEXO III:

VALORES MEDIOS Y ESTABILIDAD DE LOS DATOS DE LA PRUEBA

DatosPruebasCEN2021_VENTANAS4_corre

ANEXO IV:

CURVAS DE CORRECCIÓN

CurvasCorrección_VENTANAS_4_Turbine.pc

CurvasCorrección_VENTANAS_4_Boiler.pdf

CurvaCorrecciónPresiónCondensador_Vent

ANEXO V:

INFORMES DE RESULTADOS E INCERTIDUMBRES

Resultados

Resultados_VEN4_25-05-2021_CEN270_corr

Resultados_VEN4_25-05-2021_CEN220_corr

Resultados_VEN4_26-05-2021_CEN170_corr

Resultados_VEN4_26-05-2021_CEN140_corr

Resultados_VEN4_27-05-2021_CEN120_corr

Resultados_VEN4_27-05-2021_CEN100_corr

Resultados_VEN4_28-05-2021_CEN84_corr.p

Incertidumbres

Incertidumbre_VEN4_25-05-2021_CEN270_c

Incertidumbre_VEN4_25-05-2021_CEN220_c

Incertidumbre_VEN4_26-05-2021_CEN170_c

Incertidumbre_VEN4_26-05-2021_CEN140_c

Incertidumbre_VEN4_27-05-2021_CEN120_c

Incertidumbre_VEN4_27-05-2021_CEN100_c

Incertidumbre_VEN4_28-05-2021_CEN84_cc

Bias_Ventanas4_corr.xlsx

Estabilidad Variables más importantes

Estabilidad_VEN4_25-05-2021_CEN270_corr

Estabilidad_VEN4_25-05-2021_CEN220_corr

Estabilidad_VEN4_26-05-2021_CEN170_corr

Estabilidad_VEN4_26-05-2021_CEN140_corr

Estabilidad_VEN4_27-05-2021_CEN120_corr

Estabilidad_VEN4_27-05-2021_CEN100_corr

Estabilidad_VEN4_28-05-2021_CEN84_corr.p

ANEXO VI:

RESULTADOS ANÁLISIS CARBÓN, CENIZAS Y ESCORIAS

Análisis Carbón

CV-5742_Semanal_Cinta.p

InfCV4Car4°Semana May-413584.pdf

Análisis_Carbón_Alimentadores.pdf

Inquemados en Cenizas y Escorias

Análisis_cenizas.pdf

Análisis_escoria.pdf

CARBON-CENIZAS-ESCORIAS.xlsx

ComparativaCarbón_2022.xlsx

ANEXO VII:

MEDIDAS MALLA DE O2 Y TEMPERATURA

Planilla CEN U4 Ventanas. 28-05-21.xls

Planilla CEN U4 Ventanas. 27-05-21.xls

Planilla CEN U4 Ventanas. 26-05-21.xls

Planilla CEN U4 Ventanas. 25-05-21.xls

ANEXO VIII:

MEDIDA Y CORRECCIÓN CAUDAL ALIMENTACIÓN ULTRASONIDOS

2021_05_31_19_38_Alimentacion Turbina U4

JUSTIFICACIÓN DE LA CORRECCIÓN.pdf

ANEXO IX:

DATOS CEMS

CEMS.xlsx

ANEXO X:

MODELO DE CÁLCULO SOLCEP

ModeloSOLCEP_CEN_VENTANAS4_corr.pdf

DiagramaInstrVEN4_rev1.pptx

DatosModelo.xlsx