

CONSISTENCIA Y CONFORMIDAD METROLÓGICA PARA ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN CENTRALES DE CICLO COMBINADO

Víctor Aranda⁽¹⁾, Gerardo Aranda⁽¹⁾, Noel Gutiérrez⁽¹⁾, Silvia Medrano⁽¹⁾ y Rogelio Zúñiga⁽²⁾

⁽¹⁾ MetAs & Metrólogos Asociados

Calle: Jalisco # 313, Colonia: Centro, 49 000, Cd. Guzmán, Jalisco, México.

(341) 413 6123 & 414 6912 con tres líneas. metas@metas.com.mx

⁽²⁾ C.F.E. Comisión Federal de Electricidad

Calle: Río Mississippi # 71-501, Colonia: Cuauhtémoc, México, D.F.

(55) 5229 4400 Ext. 6349. rogelio.zuniga@cfe.gob.mx

Resumen: La producción de energía eléctrica y su costo, en las centrales de ciclo combinado, está relacionada por la eficiencia de sus procesos con las condiciones ambientales bajo las cuales se llevan a cabo. Estos procesos requieren del monitoreo continuo de las condiciones de: temperatura ambiente, humedad ambiental y presión atmosférica. Para la medición de estas magnitudes se utilizan: termómetros, higrómetros y barómetros de tipo transmisor que conforman la estación meteorológica. Dichos instrumentos requieren estar bajo estricto control metrológico debido al impacto que sus errores e incertidumbres de medición tienen sobre el proceso de facturación de la energía producida. Se presentan las experiencias con productores externos de energía eléctrica y los criterios para evaluar y determinar: a) La consistencia entre la capacidad de medición de los instrumentos involucrados y los requisitos: técnicos, normativos y legales del proceso, así como los criterios prácticos para: b) evaluar la conformidad de los resultados de calibración de dichos instrumentos contra las tolerancias que para estos instrumentos se obtienen del proceso de evaluación de consistencia.

1. CENTRAL ELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO (CCC)



Fig. 1 Vista de central eléctrica de ciclo combinado CCC.

1.1. Productores independientes de energía

Actualmente en México, han entrado en operación 15 centrales eléctricas de ciclo combinado operadas por las compañías: Iberdrola (española) en Monterrey III y Altamira III y IV; Electricité de France (francesa) en Saltillo y Río Bravo II y III; AES (norteamericana) en Mérida III; Mitsubishi (japonesa) en Tuxpan II y Altamira II; Unión FENOSA (española) en Hermosillo, Agua Prieta y

Tuxpan III y IV; TransAlta (canadiense) en Campeche II y Chihuahua III; Intergen (norteamericana) en Mexicali y Baja [1].

1.2. Normativas de operación

C.F.E. (Comisión Federal de Electricidad) requiere que los productores independientes realicen las pruebas de desempeño para verificar la Capacidad Neta Demostrada, la cual es un requisito contractual. Las pruebas de desempeño para este objetivo se efectúan después de haber realizado todas las pruebas de puesta en servicio y antes de la operación comercial de la central eléctrica de ciclo combinado (CCC) [1], las pruebas de desempeño se realizan de acuerdo con los requisitos del código ASME para pruebas de energía PTC 46 [2]. Este documento también describe el uso adecuado de las correcciones para determinar los parámetros de desempeño de toda la central, correcciones que se basan en las mediciones de parámetros que están fuera del control del productor de energía como son: temperatura del aire ambiente, presión atmosférica, humedad, temperatura del agua de enfriamiento, valor calorífico del combustible, factor de potencia, frecuencia. Este documento también nos dice que dichas mediciones deben llevarse a cabo utilizando otros códigos ASME como: PTC 4.1 [2] para la

eficiencia de la caldera y PTC 6 [2] para la turbina de vapor.

1.3. Organismos reguladores

Los productores independientes forman la AMEE - Asociación Mexicana de Energía Eléctrica. Para autorizar la operación en México de estas centrales generadoras de energía eléctrica, se encuentran bajo la regulación y evaluación de organismos como: CFE - Comisión Federal de Electricidad, CRE - Comisión Reguladora de Energía, y la SENER - Secretaría de Energía [1].

1.4. Costo de producción

De acuerdo con una nota periodística de *El Financiero* [3], los costos asociados a la producción de energía eléctrica, son diferentes para cada central. Las diferencias que existen en los costos de las centrales de los permisionarios se deben a dos factores principales: los costos asociados a la ubicación y topografía del suelo, así como al costo y origen del combustible para la generación de energía. Considerando que las diferencias por la ubicación y topografía se pueden evaluar mediante la corrección por las condiciones ambientales medidas con una estación meteorológica y que el combustible base utilizado es gas natural suministrado en la mayoría de los casos por PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB), en otros casos el productor importa su gas directamente.

La cantidad de energía eléctrica producida por las CCC es corregida para fines de facturación a la CFE, por factores que dependen de las condiciones ambientales durante la operación de los productores independientes. Siendo responsabilidad de las CCC mantener la medición de las condiciones ambientales bajo confirmación metrológica, cuyos resultados son auditados continuamente por la CFE, dada la importancia e impacto económico de estos factores.

2. ESTACIÓN METEOROLÓGICA

La estación meteorológica es un sistema de medición de las diferentes magnitudes con que se evalúan las condiciones ambientales, estas magnitudes y sus instrumentos de medición son: Temperatura ambiente mediante el uso de termómetros, humedad ambiental con higrómetros, presión atmosférica utilizando barómetros, velocidad del viento mediante anemómetros, dirección del

viento con anemoscopios, precipitación pluvial utilizando pluviómetros.

Al revisar las ecuaciones de corrección que plantea ASME PTC 46 [2] para evaluar el desempeño total de la planta, se observa que las condiciones ambientales que intervienen son: temperatura y humedad ambiental y la presión atmosférica. En los siguientes puntos se describen las características y especificaciones metrológicas típicas de los instrumentos de medición relacionados con estas magnitudes.

2.1. Barómetro

Los barómetros son instrumentos que miden la presión atmosférica (presión absoluta). Cuando el instrumento es protegido de disturbios temporales como ráfagas de viento y obstrucciones o alteraciones en su puerto de medición se dice que mide la presión atmosférica del ambiente. En México la presión atmosférica se encuentra entre los 750 hPa (hectopascales) para localidades con altitud cercana a los 2 700 m como Toluca en el estado de México y 1 013 hPa para localidades situadas al nivel del mar, por lo tanto un alcance de medición que cubre ampliamente la situación geográfica de México será de 700 a 1 100 hPa.

En el laboratorio de metrología de presión, hemos tenido oportunidad de calibrar barómetros utilizados en las estaciones meteorológicas de varias CCC, cuyas marcas y características metrológicas son: Druck, Lsi Lastem, Ota Keiki Seisakusho, Rosemount, Setra, Vaisala, Young; la clase de exactitud declarada por estos fabricantes va de $\pm 0,3$ a $\pm 1,6$ hPa, y en los procesos de calibración hemos encontrado que su capacidad de medición es de $\pm 0,2$ a $\pm 1,0$ hPa.

2.2. Termómetro

Los termómetros son instrumentos que miden la temperatura del ambiente en que están inmersos, cuando el termómetro se coloca en el ambiente y es ventilado de forma adecuada y protegido de la radiación solar directa, se dice que mide la temperatura ambiente. De acuerdo con las especificaciones de diseño para las CCC de los diferentes productores externos en México, las temperaturas mínima y máxima están entre: -13 °C (grados Celsius) en Chihuahua y $+50$ °C en Mexicali [1], por lo que un termómetro con un alcance de -20 a $+60$ °C cubre ampliamente el alcance de temperatura ambiente esperada en México.

En el laboratorio de metrología de temperatura, hemos tenido oportunidad de calibrar termómetros de resistencia de platino y termistor, utilizados en las estaciones meteorológicas de varias CCC, cuyas marcas y características metrológicas son: Climatronics, Lsi Lastem, Ota Keiki Seisakusho, Rosemount, Wika, Young, Ysi; la clase de exactitud declarada por estos fabricantes va de $\pm 0,2$ a $\pm 0,3$ °C, y en los procesos de calibración hemos encontrado que su capacidad de medición va de $\pm 0,1$ a $\pm 0,3$ °C.

2.3. Higrómetro

Los higrómetros son instrumentos que miden la humedad relativa contenida en la atmósfera en que están inmersos, cuando el higrómetro se coloca en el aire ambiente y es ventilado de forma adecuada y protegido de la radiación solar directa, se dice que mide la humedad ambiental. En México es posible encontrar condiciones de humedad extrema, como ambientes desérticos extremadamente secos de hasta 10 %HR (porcentaje de humedad relativa) y ambientes costeros extremadamente húmedos de hasta 93 %HR [1]. Estas situaciones tan extremas requieren de higrómetros de amplio alcance, nominalmente del 10 al 100 %HR.

En el laboratorio de metrología de humedad, hemos tenido oportunidad de calibrar higrómetros utilizados en las estaciones meteorológicas de varias CCC, cuyas marcas y características metrológicas son: Lsi Lastem, Ota Keiki Seisakusho, Rosemount, Rotronic, Vaisala; la clase de exactitud declarada por estos fabricantes va de $\pm 1,5$ a ± 2 %HR (10 a 90 %HR) y ± 3 %HR (2 a 10 y 90 a 100 %HR), y en los procesos de calibración hemos encontrado que su capacidad de medición es de ± 3 %HR (25 a 75 %HR) y ± 4 %HR (<25 y >75 %HR).

3. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA

La confirmación metrológica de acuerdo con ISO 10012 [4] [5] es el conjunto de operaciones requeridas para asegurar que el equipo de medición cumple con los requerimientos para su uso propuesto, además nos menciona que la confirmación metrológica generalmente incluye operaciones como son: calibración, verificación (inspección más evaluación de conformidad [6]), ajuste, reparación, revisión de intervalo de recalibración, comparación de resultados contra requisitos metrológicos (evaluación de consistencia [7]), sellado y etiquetado.

ISO 10012 [4] también nos dice que los requisitos metrológicos del equipo de medición son usualmente distintos al requisito del producto y no están especificados en los mismos.

3.1. Evaluación de Consistencia

El proceso de determinar las características metrológicas necesarias del equipo de medición en base a los requisitos metrológicos del usuario y su proceso es llamado *Evaluación de Consistencia* [7].

El proceso de evaluación de consistencia metrológica surge de los requisitos de los sistemas de gestión de calidad como ISO 9001:2000 [8] e ISO/TS 16949:2002 [9], los cuales nos dicen que la organización (usuario) debe establecer procesos para asegurar que la capacidad de medición del equipo de monitoreo y medición es consistente con los requisitos de monitoreo y medición del proceso, así como evidenciar su conformidad con estos requisitos.

3.1.1. Requisitos metrológicos del usuario

La calidad de un producto o servicio [10] está definida por los rasgos y características (especificaciones) que es necesario garantizar dentro de ciertos límites para satisfacer las necesidades que han sido establecidas con el cliente o que son implícitas al producto o servicio.

Los límites de especificación del producto o servicio dependen al menos de los siguientes parámetros: la variabilidad del proceso y la capacidad de medición de los instrumentos utilizados para el monitoreo o medición de esa variable del proceso.

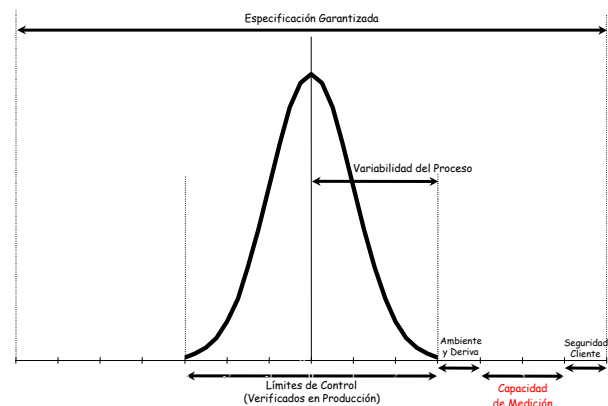


Fig.2 Consistencia entre variabilidad del proceso y capacidad de medición.

3.1.2. Características metrológicas del equipo de medición

Las características metrológicas del equipo de medición, se refieren a la capacidad de medición del instrumento. El concepto *Capacidad de Medición* ha sido acuñado por diferentes sistemas de calidad como: ISO 9001 [8], ISO/TS 16949 [9], ISO 10012 [4] y el manual de referencia MSA [13], sin embargo no es un concepto definido por el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), el concepto que más se relaciona con este es la Clase de Exactitud.

La capacidad de medición del instrumento depende al menos de dos factores: a) los errores e incertidumbre de medición del instrumento y b) el proceso de medición. Para explicar estos conceptos desarrollaremos un ejemplo, consideremos que contamos con un termómetro tipo transmisor que utilizamos para la medición de temperatura ambiente en el punto de control de 30 °C, el termómetro ha sido calibrado, y en su Informe de Calibración nos indican que el error (E) y la incertidumbre expandida (U) en el punto de control son: $E = 1,3$ °C y $U = \pm 0,3$ °C. La Capacidad de Medición (CM) del termómetro depende del Proceso

de Medición [10] [4] que se utilizará en el uso del instrumento por parte del usuario. Si el usuario no aplica correcciones al termómetro, tendremos que $CM = \pm(|E| + U)$ es decir $CM = \pm 1,6$ °C; pero, si el proceso de medición del usuario considera la corrección de los errores tendremos que $E \rightarrow 0$ (tiende a cero) por lo que CM será: $CM = \pm U$, es decir $CM = \pm 0,3$ °C.

3.2. Evaluación de Conformidad

El proceso de confirmación metrológica [5] se evalúa como adecuado cuando el equipo de monitoreo y medición cumple con los requisitos del proceso, esta evaluación de conformidad es lo que llamamos la declaración de conformidad o no-conformidad [6] [11] [12].

Para evaluar la conformidad de los resultados de la medición o calibración es necesario considerar tanto los errores como la incertidumbre de medición, dado que la incertidumbre afecta la conformidad con: las tolerancias, los límites de especificación o la capacidad de medición requerida por el proceso o normativas técnicas o legales.

Variable de Proceso [1]	Variabilidad del Proceso [1]	Resolución de Medición Requerida (1/10 a 1/100)	Capacidad de Medición Requerida (1/3 a 1/10)	Instrumento de Medición	Capacidad de Medición Instrumento CM	Índice Evaluación de Consistencia	Declaración Evaluación de Conformidad
Presión atmosférica 750 a 1 013 hPa	± 10 hPa	1 a 0,1 hPa	± 3 a ± 1 hPa	Barómetro 700 a 1 100 hPa	± 1 hPa	0,3 a 1 Consistente	Si cumple
Temperatura ambiente -13 a 50 °C	± 10 °C	1 a 0,1 °C	± 3 a ± 1 °C	Termómetro -20 a 60 °C	$\pm 0,3$ °C	0,1 a 0,3 Fino	Si cumple
Humedad ambiental 10 a 93 %HR	± 20 %HR	2 a 0,2 %HR	± 7 a ± 2 %HR	Higrómetro 10 a 100 %HR	± 3 %HR	0,2 a 1,5 Fino a Consistente	Si cumple Ambiguo

Tabla 1 Consistencia y conformidad para estación meteorológica en base a la variabilidad del proceso.

Variable de Proceso [1]	Capacidad de Medición Requerida ASME PTC 46 [2]	Instrumento de Medición	Capacidad de Medición Instrumento CM	Índice Evaluación de Consistencia	Declaración Evaluación de Conformidad
Presión atmosférica 750 a 1 013 hPa	± 3 hPa	Barómetro 700 a 1 100 hPa	± 1 hPa	0,3 Fino	Si cumple
Temperatura ambiente -13 a 50 °C	$\pm 0,3$ °C	Termómetro -20 a 60 °C	$\pm 0,3$ °C	1 Consistente	Si cumple
Humedad ambiental 10 a 93 %HR	± 2 %HR	Higrómetro 10 a 100 %HR	± 3 %HR	1,5 Consistente a Burdo	Ambiguo

Tabla 2 Consistencia y conformidad para estación meteorológica en base a los requisitos de ASME PTC 46 [2].

4. RESULTADOS

En las tablas 1 y 2 se muestra el resumen de la evaluación de consistencia entre la capacidad de medición requerida por el proceso y la capacidad de medición de los instrumentos con los que se realiza el monitoreo y medición. La tabla 1 muestra la evaluación de acuerdo al estudio de variabilidad del proceso en condiciones de operación, y la tabla 2 muestra la evaluación de acuerdo a los requisitos normativos de ASME PTC 46 [2].

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. Medición de presión atmosférica

Como resultado de la evaluación de consistencia y de conformidad metrológica, se encuentra que la capacidad de medición del sistema de medición de presión atmosférica es consistente con la capacidad de medición requerida por el proceso ya sea de forma implícita en base a la variabilidad del proceso, o en forma establecida en base a los requisitos de ASME PTC 46 [2].

5.2. Medición de temperatura ambiente

Los resultados en la evaluación de la medición de temperatura ambiente con sensor de resistencia de platino, arrojan en forma similar a la presión atmosférica, consistencia y conformidad metrológica.

Sin embargo, es conocido en los termómetros, que es preferible el uso de sensores de resistencia de platino sobre los de tipo termistor o termopar, en los casos donde se utilizan sensores de tipo termistor se encontraron casos aislados de inconsistencia y no-conformidad metrológica.

5.3. Medición de humedad ambiental

El caso de la medición de humedad ambiental nos da un resultado ambiguo en la evaluación de consistencia, lo cual obliga de acuerdo con ISO 14253-1 [11] [12], a establecer criterios de aceptación y rechazo entre los involucrados (CCC y CFE), para lo cual las partes han considerado inicialmente no incluir la incertidumbre típica de las mediciones de humedad ($>\pm 1,5$ %HR), lo cual es contrario a lo indicado ISO 14253-1 [11] [12]. El origen del problema radica en que el desarrollo de las mediciones de humedad relativa ha alcanzado incertidumbres apenas de $\pm 0,6$ %HR a $\pm 2,0$ %HR en laboratorios de calibración nacionales y

secundarios, lo cual es grande con respecto a la capacidad de medición requerida por ASME PTC 46 [2] en la tabla 2 de $\pm 2,0$ %HR, lo cual arroja que el requisito de la norma es muy estricto y por otro lado el hecho de que las especificaciones declaradas por los fabricantes [14] [15] respecto a la clase de exactitud de hasta 1,0 %HR de los higrómetros es muy optimista. Adicionalmente, la capacidad de medición de humedad se ve afectada por las condiciones de montaje y operación, lo cual en muchos casos llega a ser más significativo que los resultados de la calibración del instrumento, como se presenta a continuación.

Como se describió anteriormente la capacidad de medición del instrumento depende de los resultados de la calibración del instrumento y del proceso de medición. Respecto al proceso de medición es necesario destacar la importancia de utilizar escudos de protección contra la radiación solar directa y sistemas de ventilación para el montaje de los termómetros e higrómetros, un escudo con aspiración natural mantiene gradientes de temperatura de 1,5 °C entre la temperatura medida y la temperatura ambiente cuando la velocidad del aire es baja (1 m/s) y gradientes menores de 0,4 °C cuando la velocidad del aire es mayor a 3 m/s [16], mientras que un escudo con aspiración forzada con ventilador a 3 m/s reduce el gradiente hasta en 0,1 °C [16].

La calibración de higrómetros en campo cuando no se cuenta con condiciones ambientales controladas (20 °C), arroja resultados con mayor error y u o incertidumbre, debido a la inestabilidad de la temperatura ambiente en el lugar de calibración. Por ejemplo: a 20 °C y 50 %HR, un gradiente de ± 1 °C provoca un gradiente de hasta ± 3 %HR [14] [15], y cuando la humedad es 90 %HR, un gradiente de ± 1 °C provoca un gradiente de hasta $\pm 5,4$ %HR [15], por lo cual es recomendable que este servicio se realice en condiciones de laboratorio con el propósito de asegurar las condiciones de reproducibilidad.

Algunos higrómetros presentan saturación por efectos de condensación en humedad mayores al 95 %HR, se recomienda revisar las especificaciones del instrumento de acuerdo a la zona geográfica donde se encuentre la CCC. Es necesario tomar en cuenta que en las zonas costeras, la deriva de los higrómetros es mayor que la de los ubicados en zonas templadas o semidesérticas, por lo cual no es posible considerar el mismo intervalo de recalibración.

Con el propósito de obtener la mejor capacidad de medición en los higrómetros, es preferible el uso de sensores de tipo capacitivo compensados por temperatura sobre los de tipo resistivo.

5.4. Proceso para la confirmación metrológica

Es recomendable el uso de instrumentos en los que este integrado en un solo equipo tanto el sensor como el transmisor, con lo cual es posible realizar la calibración del instrumento en señal de salida analógica (por ejemplo 4 a 20 mA c.c.), con lo cual se facilita al usuario la logística para la calibración del equipo así como permite al usuario realizar la verificación y ajuste del lazo de medición por simulación eléctrica.

Es recomendable que el usuario cuente con un juego de instrumentos de repuesto los cuales podrán ser enviados a calibración sin deshabilitar el sistema de medición en el proceso, dado lo crítico de este sistema.

La confirmación metrológica del sistema de medición no se completa hasta que no se han realizado los siguientes procesos: 1) calibración y u o ajuste del instrumento (transmisor), 2) verificación y ajuste del lazo de medición, 3) verificar si la capacidad de medición de todo el lazo o cadena de medición esta conforme con los requisitos metrológicos del usuario, para poder realizar la declaración de conformidad o no-conformidad del proceso de confirmación metrológica y 4) someter el sistema de medición al análisis de los intervalos de re-calibración.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ing. José Luis Bañales de la CFE, por la revisión del artículo y la información facilitada para la elaboración del mismo.

REFERENCIAS

- [1] R. Zúñiga y J. Bañales, Comunicación personal, CFE - Comisión Federal de Electricidad, 2004.
- [2] ASME PTC 46, Overall plant performance, ASME - American Society for Mechanical Engineering, 1996.
- [3] G. Palma, Productores independientes de energía imponen precios a CFE, El Financiero, lunes 08 de marzo de 2004, página 17.

- [4] ISO 10012:2003, Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measuring equipment, International Standard, ISO - International Organization for Standardization, 2003.
- [5] MetAs, Confirmación metrológica, La Guía MetAs, Año 02 # 02, 2002-febrero.
- [6] MetAs, Criterios para declaración de conformidad, La Guía MetAs, Año 03 # 06, 2003-junio.
- [7] MetAs, Evaluación de consistencia metrológica, La Guía MetAs, Año 02 # 10, 2002-octubre.
- [8] ISO 9001:2000, Quality management systems - Requirements, International Standard, ISO - International Organization for Standardization, 2000.
- [9] ISO/TS 16949:2002, Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations, Technical Specification, ISO - International Organization for Standardization, IATF - International Automotive Task Force, 2002.
- [10] ISO 9000, Norma Internacional: Sistemas de gestión de calidad – Fundamentos y vocabulario, ISO - International Organization for Standardization, AENOR, Asociación Española de Normalización, 2000.
- [11] ISO 14253-1:1998, Geometrical products specification (GPS) – Inspection by measurements of work pieces and measuring equipment, Part 1: Decision rules for proving conformance or non conformance with specifications, International Standard, ISO - International Organization for Standardization, 1998.
- [12] ASME B89.7.3.1, Guideline for decision rules: Considering measurement uncertainty in determining confirm to specifications, ASME - American Society for Mechanical Engineering, 2002.
- [13] ASQ & AIAG, MSA Measurement systems analysis, Reference manual, third edition, American Society for Quality, Automotive Industry Action Group, 2002.
- [14] ROTRONIC, Hygromer Transmitter - Instruction manual.
- [15] VAISALA, HMP 230 series - User's Guide, M210225en-B.
- [16] Climatronics, Naturally and motor aspirated radiation shield, www.climatronics.com, 2004-03-31.