

00553



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

POSGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE QUÍMICA

**“CONTROL METROLOGICO EN UNIDADES
DE GENERACIÓN DE VAPOR”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS
SISTEMAS DE CALIDAD

P R E S E N T A
JOSÉ ARMANDO ESQUIVEL GARRIDO

DIRECTOR DE TESIS

M. EN C. MARÍA DE LOS ÁNGELES OLVERA TREVIÑO



México, D.F.

2005

m. 344653



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Ma. De los Angeles Olvera Treviño

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Sergio Estrada Orihuela
Vocal: Dr. José Sámano Castillo
Secretario: M. en C. Rocío Cassaigne Hernández
1er suplente: M. en C. Socorro Alpizar Ramos
2do suplente: M. en C. Vicente J. Hernández Abad

SUSTENTA

José Armando Esquivel Garrido

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: José Armando Esquivel Garrido
FECHA: 30 - Mayo - 2005
FIRMA: Esquivel Garrido José Armando

Agradecimientos:

A la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de obtener mi formación profesional.

A la M. en C Ma. de los Ángeles Olvera Treviño por su orientación y apoyo para la elaboración de este trabajo.

Al CONACyT por el apoyo económico que me otorgó para la realización de mis estudios de Maestría.

A todos los integrantes del jurado por su tiempo y sus valiosos comentarios para la conclusión del trabajo.

A mis padres:

Por todo el apoyo, confianza y amistad que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos:

Por todo lo que hemos vivido juntos.

A mis amigos:

Por su apoyo en los momentos difíciles, por su amistad incondicional y por todo lo que hemos convivido juntos

A mis profesores:

Por haber sido parte fundamental de mi formación, al brindarme su apoyo y compartirme su conocimiento y experiencias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Licenciatura y de Maestría.

A México:

Por ser la patria en que nací y por permitirme conocer a tantas personas.

CONTENIDO

I. Introducción	1
II. Antecedentes	5
II.1 Unidades de generación de vapor.....	5
II.1.1 Tipos de calderas.....	5
II.1.2 Calderas de tubos de humo.....	6
II.1.3 Calderas acuotubulares.....	8
II.1.4 Elementos de medición.....	9
II.1.5 Accesorios para calderas.....	10
II.1.1 Eficiencia en Unidades de Generación de Vapor.....	14
II.2 Metrología.....	15
II.2.1 Definiciones importantes en metrología.....	17
II.2.2 Sistema internacional de unidades.....	18
II.2.3 Trazabilidad.....	19
II.2.4 Incertidumbre.....	20
II.2.5 Aseguramiento de mediciones.....	22
III. Hipótesis.....	24
IV. Objetivo.....	25
V. Aseguramiento de mediciones.....	26
V.1 Requerimientos generales.....	26
V.2 Responsabilidad de la dirección (Entidad responsable).....	26
V.2.1 Sistema de control de medición.....	27
V.2.2 Requisitos del cliente.....	27
V.2.3 Objetivos de la calidad.....	27
V.2.4 Revisión por la entidad responsable.....	28
V.3 Recursos de la entidad responsable.....	28

V.3.1 Recursos humanos.....	28
V.3.1.1 Asignación de personal.....	28
V.3.1.2 Competencia y adiestramiento.....	30
V.3.2 Fuentes de información.....	32
V.3.2.1 Procedimientos.....	32
V.3.2.2 Software.....	35
V.3.2.3 Archivos.....	36
V.3.2.4 3 Identificación.....	36
V.3.3 Recursos materiales.....	37
V.3.3.1 Equipo de medición.....	37
V.3.3.2 Almacenamiento y manejo del equipo de medición.....	37
V.3.3.3 Condiciones ambientales.....	38
V.3.4 Proveedores externos.....	38
V.4 Realización del sistema de control de medición.....	39
V.4.1 Proceso de confirmación metrológica.....	39
V.4.1.1 Confirmación metrológica.....	39
V.4.1.2 Intervalos de confirmación.....	51
V.4.1.3 Control de ajuste del equipo.....	52
V.4.1.4 Archivos del proceso de confirmación.....	52
V.4.2 Proceso de medición.....	55
V.4.2.1 Diseño y planeación del proceso.....	55
V.4.2.2 Realización del proceso.....	57
V.4.2.3 Equipo no conforme.....	60
V.4.2.4 Archivos de control del proceso de medición.....	61
V.4.3 Realización de la medición.....	61
V.4.3.1 Incertidumbre de la medición.....	61
V.4.3.2 Trazabilidad.....	62
V.5 Análisis y mejora del sistema de control de medición.....	63
V.5.1 Auditoría del sistema de control de medición.....	63
V.5.2 Monitoreo del proceso de medición.....	64
V.5.2.1 Análisis del proceso de medición.....	64

VI. Incertidumbre en la evaluación de la eficiencia de Unidades de Generación de Vapor (método de entradas y salidas)	65
VI.1 Principio de medición y mensurando.....	65
VI.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre.....	67
VI.3 Cuantificación y reducción.....	70
VI.4 Combinación.....	72
VI.5 Cálculo de los créditos.....	73
VI.5.1 B_{Ae} Calor suministrado por el aire entrante.....	73
VI.5.1.1 Principio de medición y mensurando.....	73
VI.5.1.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre.....	74
VI.5.1.3 Cuantificación y reducción.....	76
VI.5.1.4 Combinación.....	78
VI.5.2 B_{fe} Calor suministrado por el calor sensible en el combustible	80
VI.5.2.1 Principio de medición y mensurando.....	80
VI.5.2.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre	80
VI.5.2.3 Cuantificación y reducción.....	81
VI.5.2.4 Combinación.....	81
VI.5.3 B_{mAe} Calor suministrado desde la humedad en el aire de entrada.....	82
VI.5.3.1 Principio de medición y mensurando.....	82
VI.5.3.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre.....	82
VI.5.3.3 Cuantificación y reducción.....	83
VI.5.3.4 Combinación.....	83
VII. Trazabilidad	85
VII.1 Instrumento indicador de presión de agua.....	85
VII.2 Instrumento indicador de presión de vapor.....	86

VII.3 Instrumento indicador de presión de combustible.....	87
VII.4 Instrumento medidor de masa del combustible.....	88
VII.5 Instrumento medidor de masa de agua.....	89
VII.6 Instrumento indicador de temperatura del combustible.....	90
VII.7 Instrumento indicador de temperatura del agua.....	91
VII.8 Instrumento indicador de temperatura del vapor.....	92
VII.9 Instrumento indicador de temperatura de gases de combustión.....	93
VII.10 Instrumento de medición de los gases de combustión.....	94
VII.11 Instrumento indicador de % de HR y temperatura.....	95
VII.12 Instrumento indicador de presión barométrica.....	96
VII.13 Instrumento indicador de tiempo.....	97

VIII. Cálculo de la eficiencia y de su Incertidumbre.....98

VIII.1 Cálculos preliminares.....	101
VIII.1.1 Gasto de nitrógeno.....	101
VIII.1.2 Gasto de aire seco.....	101
VIII.1.3 Aire teórico y exceso de aire.....	101
VIII.2 Cálculo de créditos.....	102
VIII.2.1 Calor en el aire de entrada.....	102
VIII.2.2 Calor sensible en el combustible.....	102
VIII.2.3 Calor suministrado con la humedad que entra con el aire...	102
VIII.3 Energía en el combustible y los créditos.....	103
VIII.4 Cálculo de la eficiencia.....	104
VIII.5 Incertidumbre de medición en el gasto de aire seco	104
VIII.5.1 Cálculo de incertidumbre para el O ₂	104
VIII.5.2 Cálculo de incertidumbre para el CO ₂	105
VIII.5.3 Cálculo de incertidumbre para el CO	105
VIII.5.4 Cálculo de incertidumbre para el N ₂	106
VIII.5.5 Incertidumbre del gasto de nitrógeno.....	106
VIII.5.6 Incertidumbre del gasto de aire seco.....	108
VIII.6 Incertidumbre de los créditos.....	108

VIII.6.1 Incertidumbre del calor en el aire de entrada.....	108
VIII.6.1.1 Incertidumbre del flujo de combustible.....	108
VIII.6.1.2 Incertidumbre de la temperatura del aire.....	109
VIII.6.1.3 Incertidumbre del C_{PA}	110
VIII.6.2 Incertidumbre del calor sensible en el combustible.....	111
VIII.6.2.1 Incertidumbre de la temperatura del combustible.....	111
VIII.6.3 Incertidumbre del calor suministrado con la humedad que entra con el aire.....	112
VIII.6.3.1 Incertidumbre del % de HR	112
VIII.6.3.2 Incertidumbre de la presión de vapor (en el aire)....	113
VIII.6.3.3 Incertidumbre de la presión barométrica.....	113
VIII.6.3.4 Incertidumbre de la humedad del aire	114
VIII.6.3.5 Incertidumbre del C_{PS}	115
VIII.6.4 Incertidumbre combinada de los créditos.....	116
VIII.7 Incertidumbre en la eficiencia.....	116
VIII.7.1 Incertidumbre del flujo de vapor.....	116
VIII.7.2 Incertidumbre de la entalpía del agua.....	118
VIII.7.2.1 Incertidumbre de la temperatura del agua.....	119
VIII.7.2.2 Incertidumbre de la presión del agua.....	120
VIII.7.2.3 Incertidumbre de la presión absoluta del agua.....	120
VIII.7.3 Incertidumbre de la entalpía del vapor.....	121
VIII.7.3.1 Incertidumbre de la presión del vapor.....	121
VIII.7.3.2 Incertidumbre de la presión absoluta del vapor.....	122
VIII.7.4 Incertidumbre combinada de la eficiencia.....	123
IX. Evaluación de la norma.....	127
X. Conclusiones.....	130
Bibliografía.....	132
Anexos.....	135

I. INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es uno de los medios de transmisión de calor de mayor efectividad, y su fácil generación y manejo lo han situado como uno de los servicios auxiliares más difundidos en la industria. El vapor es empleado en la generación de electricidad, en el calentamiento de las diferentes corrientes de proceso, en la impulsión de equipo rotatorio y como fluido de proceso.

Para que un servicio como este pueda ser aprovechado adecuadamente, es necesario que se mantenga bajo control la eficiencia de la unidad, de tal manera que el combustible (fuente de la energía para la generación del vapor) sea aprovechado al máximo y se minimicen las pérdidas de calor. Para poder garantizar que el aprovechamiento de calor sea el óptimo, se debe contar con medidas que permitan cumplir con este objetivo, entre las cuales podemos mencionar: el mantenimiento de la unidad; la limpieza periódica de las secciones de transferencia de calor (por el lado de los gases de combustión y el lado del agua); el tratamiento del agua de alimentación (para minimizar la frecuencia de la purga y por tanto las pérdidas de energía así como las incrustaciones); el monitoreo de los gases de combustión (para conocer las pérdidas de calor).

El principal objetivo de mantener una Caldera en condiciones de funcionamiento óptimo (como el de cualquier proceso), es el de poder ofrecer el servicio con la calidad requerida al menor costo posible, lo que al paso del tiempo se debe reflejar en la disminución de costos (al reducir el consumo de combustible), disminución de paros (para realizar reparaciones) y disminución de las emisiones contaminantes (por reducción del consumo de combustible y por reacciones de combustión eficientes).

El equipo de Generación de Vapor puede ser mantenido en un buen nivel de eficiencia, si se cuenta con los registros y el seguimiento de las variables importantes - determinadas mediante los instrumentos de medición ubicados en la Unidad, ya que con estos se puede determinar si la Unidad requiere de ajustes o modificaciones para mantener siempre su mejor desempeño. De ahí se deriva también que los equipos de medición deban ser calibrados y continuamente monitoreados para garantizar que los parámetros determinados mediante estos sean correctos. Por el contrario, si los

instrumentos no permanecen calibrados en los períodos de funcionamiento de la Unidad, se pueden tener lecturas incorrectas que no permiten realizar las correcciones pertinentes.

La metrología es la ciencia de la medición y su objetivo principal es garantizar la confiabilidad de las mediciones. Lo que una organización busca al elaborar un producto o dar un servicio es garantizar que este cuente con las especificaciones que le requiere el consumidor del producto o usuario del mismo. En el caso de los procesos de medición, lo que la organización busca es garantizar que se cuenta con equipos de medición aptos para cada uno de los parámetros requeridos y que estos tienen las cualidades de trazabilidad, e incertidumbre, mediante los cuales una medición estará completa. La medición de estos parámetros esta dada por el valor del mensurando más un intervalo definido por la incertidumbre de la medición ($M \pm U$). La trazabilidad de la medición, se encuentra en los informes de calibración (incluida en la incertidumbre del equipo de medición al haber sido calibrado), los cuales, cuentan con una cadena ininterrumpida de comparaciones ante patrones nacionales o internacionales.

Las normas ISO de la serie 9000 han tenido una aceptación importante a nivel mundial puesto que buscan hacer un mercado de mayor competencia, lo que implica que los participantes tengan que estar actualizados y mantengan una actitud de mejora continua para satisfacción de los consumidores o usuarios finales. Los beneficios directos por la aplicación de este tipo de sistemas son, entre otros: reducción de productos de baja calidad; reducción del reproceso de productos para cumplir con los estándares; aumento en la productividad; reducción de costos de producción y aumento de las ventas de los productos por la apertura de nuevos mercados.

La norma ISO 10012 es de interés especial para quienes pretenden contar con un sistema efectivo de control de mediciones, esto es garantizar que el equipo de medición y el proceso de medición estén aptos para su uso. Además esta norma puede ser adaptada a otro sistema si es que se cuenta con alguno específico, así mismo puede ser empleada para poder cumplir con las recomendaciones de las normas ISO y de aquellas normas que requieran de un Sistema de Control de Mediciones.

En el presente trabajo se pretende desarrollar un Sistema de Control de Mediciones para una Unidad de Generación de Vapor. Mediante este Sistema de Control de Mediciones se busca asegurar que el funcionamiento de la Unidad se mantenga en un

nivel adecuado de aprovechamiento del combustible para generar el vapor requerido por los usuarios y en las condiciones establecidas por ellos. Todo esto implica que se pueda determinar la eficiencia de la Unidad, punto que se puede cumplir mediante el empleo del Código ASME PTC-4 y del programa de aseguramiento de mediciones, para llegar al objetivo de garantizar que los requisitos metrológicos están satisfechos para la Unidad de Generación de Vapor.

En el capítulo de aseguramiento de mediciones, se establecen los puntos de la norma ISO 10012 y su cumplimiento para garantizar los procesos de medición en la Unidad de Generación de Vapor, de tal manera que se pueda evaluar la Eficiencia de la misma. El cumplimiento del punto 7 de la norma es de gran importancia, ya que en este se establece todo lo relacionado a la realización del sistema de control de medición. El punto incluye el proceso de confirmación metrológica en el cual se han de comparar las exigencias metrológicas del Usuario EMU y las Características del Equipo de Medición CEM, comparación de la cual se establece si un equipo es apto para un uso determinado o no. En este mismo punto se establece el proceso de medición el cual incluye el diseño y planeación así como la realización del proceso principalmente. Finalmente se presenta el punto de realización de la medición que incluye la incertidumbre de la medición y la trazabilidad. Ambos tanto la incertidumbre de la medición como la trazabilidad son incluidos en capítulos posteriores del trabajo.

El punto 8 de la norma llamado Análisis del sistema de control de medición y mejoramiento es de gran importancia, pues mediante lo que especifiquemos en él podremos evaluar si nuestro Sistema esta funcionando o no y en caso de ser necesario se podrán realizar mejoras o cambios al mismo, en una retroalimentación de la información.

En el capítulo correspondiente a Incertidumbre, se abarcan las incertidumbres de cada una de las variables importantes en la Unidad de Generación de Vapor, ya que estos se emplean más adelante en el capítulo llamado Cálculo de la eficiencia y de su incertidumbre. En el se especifican el mesurando, los métodos de medición, las fuentes de incertidumbre y la evaluación de la incertidumbre.

El capítulo de Trazabilidad contiene básicamente las cartas de trazabilidad de cada uno de los instrumentos involucrados en el Sistema de Control de Mediciones para la Unidad de Generación de Vapor. La información que se puede encontrar es la cadena

ininterrumpida de comparaciones hacia patrones nacionales o internacionales, las incertidumbres respectivas para cada comparación y el o los equipos empleados.

Enseguida se presenta el capítulo de Evaluación de la Eficiencia, en el cual se desarrolla el cálculo de la eficiencia y de la incertidumbre para la Unidad de Generación de Vapor, así como de la influencia de cada uno de los parámetros en el resultado final. En el cálculo de la eficiencia, se desarrolla paso a paso el cálculo de la incertidumbre incluyendo definición del modelo físico y matemático, fuentes de incertidumbre evaluación de las incertidumbres tipo A y tipo B, Cuantificación y reducción y finalmente la incertidumbre combinada.

Después de haber desarrollado el cálculo de la eficiencia y de su incertidumbre se realiza un análisis de la norma vigente y su aplicación real al sistema de control de mediciones, así como sus modificaciones o posibles mejoras.

Finalmente se realizan las conclusiones referentes al trabajo presentado.

II. ANTECEDENTES

II.1 Unidades de Generación de Vapor (Calderas)⁽¹⁾

La producción de calor fue uno de los primeros pasos del hombre en el campo de la técnica; se utilizó en forma relativamente rudimentaria hasta fechas muy recientes. Fue la utilización del vapor como fuerza motriz lo que hizo posible la revolución industrial del siglo XVIII y el desarrollo del generador de vapor de gran potencia, ha hecho surgir la era de electrificación del siglo XX.

El término "caldera" se aplica a un dispositivo para generar vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción; o agua caliente para calefacción o para uso general. Las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de una fuente externa, a un fluido contenido dentro de la misma.

La unidad generadora se compone de un fogón (o cámara de fuego) en el que se quemará el combustible, así como de la caldera propiamente dicha. En la unidad están comprendidos también los quemadores de combustible, los controles y accesorios similares. En la definición técnica escueta, se comprende como caldera únicamente el cuerpo que forma el recipiente y las superficies de calefacción por convección. Con la aparición de las paredes enfriadas por agua para el fogón, supercalentadores, calentadores de aire y economizadores, se creó el término "generador de vapor", para dar al equipo una denominación más apropiada.

II.1.1 Tipos de calderas

Las calderas se clasifican basándose en algunas de las características siguientes: Uso, presión, materiales de que están construidas, tamaño, contenido de los tubos, forma y posición de los tubos, sistema del fogón, fuente de calor, clase de combustible, fluido utilizado, sistema de circulación, posición del hogar, tipo de fogón, forma general, nombre registrado del fabricante y propiedades especiales.

Las calderas se clasifican, por lo general, de la manera siguiente:

- I. Calderas de acero.
 - A. Calderas del tipo de tubos de humo
 - B. Calderas del tipo acuotubular

- a. Calderas horizontales de tubos rectos
- b. Calderas de tubos curvados
 - 1. De circulación natural
 - 2. De circulación forzada
- C. Calderas de cuerpo de acero

II. Calderas de acero colado.

III. Calderas de diseño especial.

IV. Reactores de energía nuclear

Hay dos clases generalizadas de calderas de acero: la caldera de tubos de humo y la caldera de tubos de agua o acuotubular.

Calderas de tubos de humo. Estas son calderas dotadas de tubos rectos, rodeados de agua y a través de cuyo interior pasan los gases de la combustión. Estos tubos se instalan normalmente en la parte inferior de un tambor sencillo o de un casco, abajo del nivel del agua.

Calderas acuotubulares. En estas calderas los tubos contienen en su interior el vapor o el agua mientras que el fuego es aplicado en la superficie exterior de los mismos. Los tubos generalmente unidos a uno o más domos, se disponen ya sea paralelos al eje de la caldera o en ángulo recto con respecto al mismo. Por lo regular los domos van colocados horizontalmente.

II.1.2 Calderas de tubos de humo

Las calderas de tubos humo de acero, se clasifican de la manera siguiente:

- I. De fogón externo.
 - A. Horizontales tubulares de retorno
 - B. De fogón de caja corta
 - C. Calderas de tipo compacto
- II. De fogón interno.
 - A. Horizontales tubulares
 - 1. Locomóviles o de locomotora
 - 2. De fogón corto
 - 3. Calderas de tipo compacto

4. Calderas de tipo escocés

- a. De cabezal posterior seco (cabezal posterior con revestimiento refractario)
- b. De cabezal posterior de agua (tipo escocés marino)
- c. De cubierta (o cielo) de agua

5. Calderas escocesas tipo paquete

- a. De cabezal posterior seco, de cabezal posterior de agua y de tapa de agua
- b. De dos, tres y cuatro retornos (pasos)

B. Calderas verticales tubulares

1. Caldera de fuerza, portátil, de cabezal plano o sumergido

- a. De domo recto
- b. Caldera tipo Manning
- c. Caldera de caja de humo tipo cónica

C. Calderas de tipo residencial

Las calderas de tubos de humo se usan principalmente para sistemas de calefacción, para la producción de vapor requerido en los procesos industriales o como calderas portátiles. La caldera de tubos de humo se usa generalmente en donde la demanda de vapor es relativamente reducida (comparada con las grandes demandas de las centrales termoeléctricas).

La caldera de tubos de humo tiene limitaciones en cuanto a su tamaño y en la adaptabilidad de su diseño. Tiene, sin embargo, la ventaja de su gran volumen de almacenamiento de agua, además de su peculiaridad de compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones en la demanda de vapor. Debido a su gran volumen de agua, el tiempo que necesita para alcanzar su presión de trabajo, partiendo de su arranque en frío, es considerablemente mayor que el requerido por una caldera acuotubular.

Su posibilidad de sobrecalentamiento es limitada y depende del tipo de la caldera. Con el aumento de la temperatura de vapor, la temperatura de los gases se eleva rápidamente.

II.1.3 Calderas acuotubulares

Las calderas acuotubulares de tubos de acero se clasifican de la manera siguiente:

- I. Caldera horizontal de tubos rectos
 - A. de cabezal de caja o cabezal seccional.
 - B. domo longitudinal o transversal (cruzado).
 - C. portátil, con hogar de caja.
- II. De tubos curvados
 - A. de cuatro domos.
 - B. de tres domos.
 - C. de cabezal bajo y tres domos.
 - D. de dos domos, de tubos verticales.
 - E. de dos domos, de tubos oblicuos.
 - F. de tres domos, en forma de "A".
 - G. de tubos cortos y tubos largos, de dos domos.
 - H. de dos domos en forma de "O".

Para presiones superiores a los $10,5 \text{ kg/cm}^2$ ($150,0 \text{ lb/plg}^2$) ($1\ 034,2 \text{ kPa}$) y capacidades de más de $6\ 804 \text{ kg/h}$ ($15\ 000 \text{ lb/h}$) de vapor, se emplea casi exclusivamente la caldera acuotubular. Se encuentran también calderas acuotubulares pequeñas de baja presión, $1,0 \text{ kg/cm}^2$ ($15,0 \text{ lb/plg}^2$) ($103,4 \text{ kPa}$), que se utilizan en instalaciones de calefacción. En las centrales termoeléctricas, la presión de trabajo suele ser hasta de $351,5 \text{ kg/cm}^2$ ($5\ 000,0 \text{ lb/plg}^2$) ($34\ 473,8 \text{ kPa}$).

Las calderas de tubos de humo de acero son insuficientes en cuanto se presentan las necesidades de capacidad y presión mayores. Los diámetros grandes de los cuerpos requieren placas más gruesas, para soportar los esfuerzos a los que son sometidos por la presión y la temperatura. Los diferenciales de las temperaturas ocasionan grandes tensiones, de magnitud indeterminable. Estas tensiones en combinación con los efectos de la incrustación y otros sedimentos, han dado lugar a muchas explosiones de calderas.

Debido a las menores dimensiones de sus elementos componentes, y su facilidad de contrarrestar los efectos de la expansión, la caldera acuotubular es más conveniente para las grandes capacidades y mayores presiones dentro de la correlativa seguridad de su diseño.

II.1.4 Elementos de medición

La instalación de los equipos de control de la unidad de generación de vapor deberá ser realizada cuidadosamente para lograr su buen funcionamiento.

Estos equipos deberán ser accesibles para un mantenimiento eficiente y quedarán instalados de forma que estén libres de vibraciones y, algunos de ellos, de forma que puedan ser fácilmente visualizados tanto desde el punto de vista de localización como del de iluminación.

Todos los puntos en que existan elementos para el mando del equipo de control de la unidad dispondrán de plataformas o escaleras fijas.

Una adecuada instalación es esencial para poder utilizar el instrumento a su plena capacidad, ya que la mayoría de las veces las fallas de respuesta de un instrumento se deben a su incorrecta instalación.

Son varios los parámetros de operación de una Unidad de Generación de Vapor que deben medirse para asegurar el correcto funcionamiento de la misma. Estas mediciones pueden ser necesarias para guía del operador, control manual y/o automático, alarmas de seguridad, paros y arranques de funcionamiento y paros de seguridad, etcétera. Las mediciones para el funcionamiento automático son las más importantes pues, en general, existen en el mercado una mayoría de calderas de funcionamiento automático, por lo que la instalación de los accesorios destinados a este fin deben ser cuidadosamente estudiados y el mantenimiento de dichos accesorios ha de ser meticuloso.

Las mediciones requeridas en una caldera varían según sean las condiciones bajo las cuales debe operar. La creciente complejidad de las unidades generadoras de calor y de los sistemas de calor a la que son conectados promueve la necesidad de incrementar el número de mediciones y asegura la cuidadosa coordinación de estas mediciones para cubrir las necesidades de diseño y funcionamiento de la caldera. Los reglamentos de seguridad que pueden influir en el plan general de accesorios e instrumentos que deben instalarse en una unidad de generación de vapor serán objeto de una consideración especial.

Las indicaciones de los parámetros medidos pueden ser locales o transmitidas a un panel central, en este caso los transmisores deben ser instalados lo más cerca posible del

punto donde debe medirse el parámetro, pero, en cualquier caso, la instalación, tanto del indicador como del transmisor, debe cuidarse con el fin de evitar vibraciones, temperaturas excesivas y suciedad.

Entre los instrumentos de medición para el control de las condiciones de operación de la caldera, están incluidos los manómetros, indicadores de nivel del agua, termómetros, medidores de flujo para vapor y/o agua así como aparatos de alarma. También está comprendido el equipo de control para la combustión, termómetro para los gases de escape y los dispositivos de medición correspondientes. Los aparatos de seguridad protegen la caldera contra bajo nivel de agua, altas temperaturas y alta presión (válvulas de seguridad para el vapor y para el agua válvulas de alivio).

En las instalaciones grandes se cuenta con controles automáticos para el economizador, para el tratamiento del agua de alimentación, para el calentador del agua de alimentación, para el desupercalentador y para el calentador de aire, así como los controles de presión y temperatura del vapor.

Para la obtención de las más altas eficiencias, es preciso llevar un control absoluto sobre el proceso de combustión. Este control está basado en las proporciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, o de oxígeno que hay en los gases de escape. La cantidad necesaria de aire para la combustión es ajustada para que el suministro de exceso de aire sea el mínimo necesario de acuerdo con el combustible, con los métodos de combustión y con el diseño de la caldera.

II.1.5 Accesorios para calderas

Los accesorios para calderas son todos aquellos aparatos, conexiones y aditamentos íntimamente ligados con las mismas o necesarios para su operación, control o mantenimiento. Son indispensables para la seguridad, para la economía y para la comodidad.

Válvulas de seguridad y de alivio

Entre los dispositivos de protección que previenen el aumento de presión, más allá de la presión de diseño, en las calderas automáticas, quedan comprendidos los siguientes:

1. Válvulas de seguridad de disparador (para calderas de vapor). Cuando la presión alcanza un punto predeterminado, la válvula se dispara, quedando completamente abierta y permaneciendo así hasta que baja nuevamente la presión.

2. Válvulas de alivio, de seguridad (para calderas de agua caliente). Una vez que la presión llega a un punto predeterminado, la válvula se abre ligeramente, dejando pasar cierta cantidad de líquido; si la presión continúa aumentando, la válvula se dispara quedando completamente abierta.

Todas las válvulas de alivio se instalan en un lugar en donde no lleguen a quemar al personal de servicio.

Interruptores de bajo nivel

Todas las calderas de operación automática tienen que estar equipadas con un interruptor de bajo nivel de agua, el cual impide el funcionamiento del quemador, mientras no hay suficiente agua en la caldera. Todas las unidades están provistas de una válvula de purga para lavar los sedimentos recolectados.

Alimentadores de agua

La alimentación automática del agua a la caldera, siempre que el nivel desciende hasta una altura determinada, entra en acción. Con presiones de menos de $17,6 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ ($250,0 \text{ lb/in}^2\text{g}$) ($1\ 723,7 \text{ kPag}$) se emplea frecuentemente una válvula de flotador, que usualmente opera con el interruptor de bajo nivel. Para las presiones más altas, se hizo necesario recurrir a la expansión de un tubo (al entrar en contacto con el vapor) para el accionamiento del aparato. En algunas unidades se combinan el interruptor de bajo nivel y la bomba de agua de alimentación y son del tipo de electrodos, que hacen pasar una corriente eléctrica a través del agua de la caldera.

Indicadores de nivel del agua

Las calderas de vapor están equipadas con un indicador de nivel del agua que permite la observación visual de la cantidad de agua que contiene la caldera. El diseño de estos indicadores depende de la presión a la que se les somete. Están dotados de válvulas de oclusión (algunos tipos trabajan automáticamente), cerrándose en caso de ruptura del vidrio y grifos de drenado.

Grifos de prueba

Se colocan válvulas o grifos de prueba a tres niveles diferentes del indicador de nivel, lo que permite al operador cerciorarse de que el nivel del agua en la caldera coincide con la indicación del tubo de vidrio.

Purga

En las calderas en la que se requieren cantidades apreciables de agua de repuesto, se producirá un aumento gradual de las sedimentaciones de sales solubles en el agua de la caldera, salvo que el agua de alimentación sea sometida a un tratamiento previo, para remover todas las impurezas que la hacen dura. Estos sedimentos son eliminados por medio de la purga que tiene que efectuarse periódicamente o continuamente. El agua caliente se convertirá en vapor tan luego se liberé de la presión. Se acostumbra condensar este vapor y enfriar el agua de la purga antes de descargarla en el drenaje o en su caso en el tanque de tratamiento. Si se trata de purga continua, es posible aprovechar el calor para proporcionar cierto precalentamiento al agua de alimentación.

En las calderas pequeñas únicamente se conecta un grifo para la conexión de manguera, para su drenado periódico, pero las calderas grandes están equipadas con llaves de purga cuidadosamente calculadas. Las calderas para generación de fuerza están dotadas de válvulas dobles, una de acción rápida para lograr la purga completa y una válvula de cierre positivo.

Sopladores para hollín

Los ductos de paso, en el lado del fuego, tienen la tendencia a la acumulación de hollín y ceniza volátil. Para disgregar estos materiales producidos por la combustión, se emplean boquillas para lanzar chorros de aire o vapor, permanentemente instaladas.

Tubería para la caldera

Es preciso, naturalmente, extraer el vapor o el agua caliente de la caldera. La tubería de conexión, así como la de interconexión entre la caldera, el supercalentador y el economizador, deben tener la posibilidad de expandirse, sin someter a los componentes de la caldera a esfuerzos o deformaciones.

Válvulas. Cada una de las conexiones de salida de vapor (tomas de vapor) de una caldera debe equiparse con una válvula de oclusión, localizada en un lugar accesible de la línea de suministro de vapor y tan cerca de la tobera de la caldera como sea conveniente y

practicable. Las únicas excepciones son: (1) la conexión de la válvula de escape, (2) la entrada y la salida del recalentador, (3) la entrada del supercalentador, (4) la entrada y la salida de los supercalentadores de fuego individual, (5) instalación de caldera de calefacción sencilla, y (6) sistemas unitarios (caldera sencilla para cada turbina) en los que la válvula de estrangulamiento de la maquina primaria es adecuada.

Cuando se conectan varias calderas grandes, del tamaño suficiente para tener un registro de hombre, a una línea general común de vapor, tienen que ser equipadas con dos válvulas de oclusión, una de las cuales puede ser, de preferencia, del tipo automático de retención. Además de las válvulas de oclusión de la línea general de vapor, en las instalaciones grandes se colocan válvulas adicionales en las líneas de alimentación de maquinaria auxiliar y para el control de flujo de vapor al supercalentador y al desupercalentador.

Separadores del vapor. Algunas calderas tienen la tendencia a producir vapor húmedo. Si esto es inconveniente, se instala un separador de vapor en la línea de alimentación del mismo, ya sea junto a la caldera o en el extremo final de la línea general.

Amortiguadores de escape. Las industrias de proceso que utilizan grandes cantidades de vapor, pero a cargas variables, se ven obligadas a dejar escapar el vapor a la atmósfera durante los cambios bruscos de la carga de la caldera. Para amortiguar el ruido producido por estas descargas se emplean los amortiguadores de escape.

Silbato.

En las fábricas pueden instalarse silbato operados por vapor. Estos silbato se usan para dar señales de entrada y salida del trabajo o como sistema de alarma en caso de incendio, nivel bajo y otras situaciones de emergencia.

Tratamiento de agua de alimentación

La precipitación de las sales sobre las superficies sujetas a calefacción del lado en contacto con el agua, ocasiona averías en la caldera; las turbinas de alta presión quedan expuestas a las consecuencias del arrastre de sílice por el vapor. Para contrarrestar lo anterior, especialmente en aquellas plantas que tienen un alto consumo de agua de alimentación, se acostumbra instalar equipos de tratamiento de agua, para desmineralizarla y desoxidarla antes de su inyección a la caldera.

Inyección del agua de alimentación

Todas las calderas necesitan el suministro de agua. Las calderas para generación de fuerza que trabajan a presiones de hasta $21 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ ($300 \text{ lb/in}^2\text{g}$) ($2\,068 \text{ kPa}$), reciben la alimentación de agua por medio de bombas o inyectores. En las calderas grandes se emplean bombas de impelentes múltiples.

Es importante que durante una falla de la corriente eléctrica no se corte la alimentación del agua de la caldera, teniéndola que dejar fuera de servicio, con el consiguiente enfriamiento de la misma. Por este motivo, cuando menos una de las bombas de alimentación es generalmente impulsada por una turbina.

II.1.6 Eficiencia en Unidades de Generación de Vapor⁽²⁾

Optimizar el consumo de energía de una caldera, es incrementar su eficiencia. El objetivo de una caldera bien diseñada, además de generar vapor, es realizar el proceso de evaporación con la máxima eficiencia posible. Las bitácoras de funcionamiento y las hojas de registro de las variables de operación para las Unidades son un testimonio importante para evaluar su desempeño y ayudar con las tendencias, para saber como pueden afectarse la presión y la temperatura de operación, así como la temperatura de los gases de chimenea.

Un factor que afecta la eficiencia notablemente son las superficies de transferencia de calor. Los tubos de la caldera son afectados internamente y externamente por las impurezas del agua (calcio, magnesio y silicatos) y de los gases de combustión (impurezas del combustible como: cenizas y sales). Estos tienden a depositarse y formar nodos de corrosión, que ponen en riesgo de reducir la confiabilidad de la caldera. Se hace entonces necesario mantener el agua dentro de la caldera con un tratamiento químico, para minimizar éste y otros efectos indeseables que propician problemas de calidad del vapor. Igualmente sucede por la parte externa de los mismos y en otros, como los del calentador de aire, cuando los gases de la combustión los afectan incrustándolos por los residuos sulfurosos, especialmente.

Por tanto la limpieza de las superficies de intercambio de calor es de importancia vital, ya que, en un año dentro de estas superficies se pueden formar con el hollín, materiales no combustibles, minerales incrustantes y otros depósitos, capas de

aislamiento en la caldera, de manera tal que se inhibe el intercambio eficiente de calor. Una incrustación de 1/16 de pulgada (de espesor) puede incrementar el consumo de combustible en un 15 %. Un espesor de 1/8 de pulgada, lo puede incrementar en un 20 % y otro de 1/4 de pulgada, puede incrementarlo en el 39 %. Además, esto puede dar lugar a roturas que incrementan las pérdidas por las paradas forzosas.

La eficiencia definida de una manera sencilla es la porción de calor adsorbido por el fluido de trabajo (vapor de salida en este caso) dividida entre el total de la energía entrante a la Unidad y multiplicada por cien.

$$\eta_k = \frac{\text{Energía total del vapor de salida}}{\text{Energía total de entrada a la unidad}} * 100$$

La purga de agua en la caldera, es otro factor de importancia ya que este permite mantener la calidad del agua en un nivel aceptable y minimizar las pérdidas de calor debidas a ella. La concentración de sólidos suspendidos en las aguas de las calderas debe ser controlada para prevenir contaminación de vapor, incrustaciones y depósitos abundantes de lodos. No es raro purgar solamente para mantener la concentración máxima permisible de sílice. Esto es especialmente necesario en Unidades de alta presión, en las que un límite de 3 a 5 ppm de sílice en ocasiones es el máximo seguro que se requiere para evitar depósitos silicosos en las turbinas⁽³⁾. El mantener un nivel mínimo de purga aceptable conduce a ahorros sustanciales, reflejados en el consumo de combustible.

II.2 Metrología

La utilidad de un instrumento en cualquier sistema de medición y control depende de la medida en que se pueda poner en marcha con éxito un dispositivo de control y del grado de seguridad con que se logre reproducir la iniciación del control. Tanto la exactitud como la seguridad del instrumento dependen de su construcción y de la manera en que conserve su calibración. Un instrumento mal calibrado produce un riesgo de medición y no sirve al utilizarlo para medir. Para que un instrumento industrial pueda ser útil para usarlo en procesos, el instrumento se debe calibrar de acuerdo con una norma ya aceptada⁽⁴⁾.

La instrumentación hace posible la producción en masa y permite establecer y mantener límites superiores e inferiores. El uso de las norma de calibración fija las mediciones y controles en la fabricación y permite que un productor se especialice en un artículo y actúe como abastecedor de otros fabricantes o grupos de ensambladores.

La metrología es definida como "la ciencia de la medición" y para eso cubre todas las mediciones realizadas en la industria química⁽⁵⁾. Por supuesto, todas las mediciones básicas y muchas de las derivadas del Sistema Internacional de unidades (SI) juegan un papel importante en la industria. La metrología comprende todos los aspectos, tanto técnicos como prácticos, que se refieren a las mediciones, cualquiera que sean sus incertidumbres y en cualquiera de los campos de la ciencia y la tecnología.

La metrología surge como un fenómeno cultural y evoluciona al ritmo de la tecnología. La metrología se clasifica en:

- metrología científica: encargada de la investigación con el fin de perfeccionar la medida (estimación de exactitud, desarrollo de nuevos instrumentos), confirmar teorías y modelos, así como custodiar, conservar y mantener los patrones.
- metrología aplicada: permite alcanzar la trazabilidad de las mediciones, para buscar mayor precisión en las aplicaciones de medida y supone un medio para el progreso tecnológico
- metrología legal: encargada de regular y controlar la actividad metrológica y supone la base del desarrollo metrológico.

El encargado de establecer, realizar y conservar los patrones nacionales que correspondan a las magnitudes y unidades básicas y derivadas del Sistema Internacional es el Centro Nacional de Metrología (CENAM). Entre sus funciones y actividades están las siguientes:

- establecer patrones nacionales
- conservar patrones nacionales
- como laboratorio primario nacional
- primer eslabón de la cadena de trazabilidad
- servicios de calibración
- formación de recursos humanos

La metrología forma parte del ciclo de mejora continua de los sistemas de administración (de la calidad y ambientales), ya que es un pilar que soporta las evidencias de medición requeridas por los sistemas, lo que nos permite:

- planear: determinar metas, objetivos y métodos
- hacer: instrumentar métodos
- verificar: medir
- actuar: emprender acciones, derivadas del cumplimiento de los objetivos

Por lo tanto, la metrología nos proporcionará las herramientas necesarias para evaluar los resultados del ciclo de mejora continua, proporcionándonos las evidencias que nos permitan realizar la toma de decisiones de la mejor manera.

II.2.1 Definiciones importantes en metrología^(5, 6)

Cantidad. Atributo de un fenómeno cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

Mensurando. Cantidad particular sujeta a ser medida.

Cantidad de influencia. Cantidad que no es el mensurando pero que afecta al resultado de medida.

Medida. Serie de operaciones que tienen el objetivo de determinar un valor a una cantidad.

Métodos de medida. Secuencia lógica de operaciones, descritas generalmente, usadas en la ejecución de medidas.

Procedimiento de medida. Serie de operaciones específicas empleadas para llevar a cabo una medida particular, de acuerdo a un método.

Exactitud. Grado de concordancia entre el resultado de medir y el valor verdadero del mensurando.

Repetibilidad. Grado de concordancia entre resultados sucesivos de medir al mensurando, llevando a cabo las mismas condiciones de medida.

Reproducibilidad. Cercanía al grado de concordancia entre los resultados de medir del mensurando, llevada a cabo bajo condiciones de cambio.

Error. Resultado de una medida menos el valor verdadero del mensurando.

Error relativo. Error dividido entre el valor verdadero del mensurando.

Error sistemático. Error menos el error al azar bajo condiciones de repetibilidad.

Error al azar. Resultado de una medida menos la medida de un número infinito de números de medida del mismo mensurando, llevado a cabo bajo condiciones de repetibilidad.

Incertidumbre. Parámetro asociado con el resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores, puede ser razonablemente atribuido al mensurando

II.2.2 Sistema Internacional de Unidades⁽⁷⁾

Con objeto de garantizar la uniformidad y equivalencia en las mediciones, así como facilitar todas las actividades industriales y comerciales, diversas naciones del mundo suscribieron el Tratado de la Convención del Metro, en el que se adoptó el Sistema Internacional de Unidades (SI). Este Tratado fue firmado por 17 países en París, Francia, en 1875. México se unió a la Convención al firmar el Tratado el 30 de diciembre de 1890. Cuarenta y ocho naciones participan actualmente en la Convención, la cual otorga autoridad a la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM - Conferencia General de Pesas y Medidas), al Comité International des Poids et Mesures (CIPM - Comité Internacional de Pesas y Medidas) y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM - Oficina Internacional de Pesas y medidas), para actuar a nivel internacional en materia de metrología.

El Sistema Internacional de Unidades se fundamenta en siete unidades de base correspondientes a las magnitudes de longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de materia, e intensidad luminosa. Estas unidades son conocidas como el **metro**, el **kilogramo**, el **segundo**, el **ampere**, el **kelvin**, el **mol** y la **candela**, respectivamente. A partir de estas siete unidades de base se establecen las demás unidades de uso práctico, conocidas como unidades derivadas, asociadas a magnitudes tales como velocidad, aceleración, fuerza, presión, energía, tensión, resistencia eléctrica, etc.

II.2.3 Trazabilidad⁽⁷⁾

Se define como la propiedad del resultado de una medición, física o química, o del valor de un patrón, tal que este puede ser relacionado a referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones, con las incertidumbres calculadas.

La trazabilidad únicamente existe cuando se presentan evidencias rigurosamente científicas, continuas y apropiadas a cada aplicación, que muestran que la medición está produciendo resultados documentados con valores de incertidumbre estimados y declarados.

Dictámenes de Trazabilidad

En cumplimiento de los artículos 26 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 20 y 24 de su Reglamento, en relación con la autorización de trazabilidad hacia patrones nacionales, extranjeros o internacionales; la Dirección General de Normas de la Secretaría de Economía ha solicitado la colaboración del Centro Nacional de Metrología para realizar el dictamen de trazabilidad hacia patrones nacionales o extranjeros.

De acuerdo con el procedimiento de la DGN, esto se aplica a solicitud expresa de un usuario en los siguientes casos:

- a. El patrón nacional no esté establecido o no se encuentra disponible;
- b. La incertidumbre ofrecida no satisfaga los requerimientos del solicitante;
- c. No se cuente con el Material de Referencia Certificado requerido;
- d. Cuando la prestación del servicio se prolongue afectando los intereses del solicitante.

Los dictámenes de trazabilidad de los Materiales de Referencia, están basados en la búsqueda objetiva de todos los elementos que permitan determinar la trazabilidad en una medición. De acuerdo a la definición de trazabilidad se pueden identificar los elementos que se buscan como evidencia, para otras propiedades del material.

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización faculta al CENAM para ofrecer los servicios de calibración y emitir certificados como laboratorio primario del Sistema Nacional de Calibración. Todas las calibraciones realizadas por el CENAM son trazables a patrones nacionales.

II.2.4 Incertidumbre

La Organización Internacional de Normalización (ISO, International Organization for Standardization), el Grupo Técnico Consultivo (TAG 4) sobre metrología, formó el Grupo de Trabajo 3 (ISO/TAG 4 GT 3). Cuyos objetivos eran: Proporcionar una información completa sobre la forma de abordar la expresión de la incertidumbre y proporcionar una base para la comparación internacional de los resultados de medida. De este grupo surge la Guía que lleva el nombre: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement⁽¹⁴⁾ ISO/TAGGT 3, 1993, la cual fue corregida en 1995.

Los participantes son:

La Organización Internacional de Metrología Legal (OIML; International Organization of Legal Metrology)

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI, International Electrotechnical Comisión)

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC; international Union of Pure and Applied Chemistry)

La Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP; international Union of Pure and Applied Physics)

Federación Internacional de Química Clínica (IFCC, International Federation of Clinical Chemistry)

La medida de una magnitud, por comparación directa o indirecta con un patrón supone varios elementos⁽⁶⁾:

- El método de medición,
- El o los instrumentos de medición, debidamente calibrados,
- Las correcciones aplicables a las observaciones,
- La estimación de las incertidumbres

La incertidumbre es definida como el parámetro asociado al resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores, puede ser razonablemente atribuido al mensurando.

Las incertidumbres indicadas en los catálogos de servicios de calibración son las que se obtienen típicamente en la calibración de un patrón o equipo con las mejores características metrológicas. La incertidumbre finalmente obtenida en cada servicio

específico, dependerá de las características del patrón o equipo que se desea calibrar y puede ser mayor a lo indicado en el catálogo.

La incertidumbre de un resultado de medida consta generalmente de varias componentes, las cuales pueden agruparse en dos categorías según la forma en que se estime su valor numérico:

- Tipo A: Aquellas que se evalúan por métodos estadísticos a una serie de medidas repetidas. Se caracterizan por medio de varianzas estimadas (o desviaciones típicas estimadas y el número de grados de libertad, cuando sea necesario se darán covarianzas)
- Tipo B: Aquellas que se evalúan por otros métodos. Deben caracterizarse por medio de varianzas estimadas, las cuales pueden considerarse como aproximaciones a varianzas, cuya existencia se presupone.

La incertidumbre combinada se expresa en forma de desviación típica. También es necesario especificar el factor multiplicativo utilizado para obtener una incertidumbre global determinada.

Estimación de la incertidumbre

En general, denominamos Y al mensurando, que depende de cierto número de magnitudes de entrada X_i ($i= 1, 2, \dots, X_n$), que pueden ser tanto las del propio proceso de medición como las procedentes de certificado de los patrones empleados, y magnitudes de influencia. Los pasos a seguir se pueden esquematizar como sigue:

- 1) Establecer la relación funcional entre el mensurando y las magnitudes de entrada

$$Y=G(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

- 2) Para cada X_i se utilizará su valor estimado, x_i , a los efectos de evaluación de incertidumbres.
- 3) Si una magnitud X_i se ha medido repetidamente, su valor estimado x_i será la media aritmética de los valores observados y su incertidumbre se expresará mediante la desviación típica de la medida. Si el número de medidas es inferior a 10, se aplicaran los factores de corrección tomados de la distribución t con $k=2$.
- 4) Si para una magnitud X_i sólo se conoce un valor, procedente de una única medida, valor referido en la bibliografía o estimación de una corrección, se tomará como valor x_i , y se deberá estimar su incertidumbre a partir de la propia experiencia.

5) Para una magnitud de influencia, de la que sólo se conocen los límites extremos, a_1 y a_2 , se tomará $x_i=(a_1+a_2)/2$ y $S_{xi}^2=1/2(a_1+a_2)^2$, correspondiente a una distribución uniforme.

6) El valor estimado de Y se obtiene a partir de la función G y los valores estimados x_i para cada magnitud X_i :

$$y = G(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

7) La varianza de y se obtiene mediante la fórmula de propagación de errores, incluyendo términos de covarianza si existen correlaciones entre variables.

$$U_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U_{xi}^2$$

8) La incertidumbre global se especificará como la desviación típica, s_y , con un factor $k=1$. Si se adopta otro factor k , éste deberá estar claramente especificado.

9) Debe incluirse una relación de todos los factores de incertidumbre considerados, con especificación si son todos de tipo B o A, y en este último caso indicando el número de observaciones realizadas.

Para que el resultado sea tan próximo como sea posible al valor del mensurando, el metrologo debe poner los medios necesarios para disminuir los errores. La incertidumbre, define un intervalo $[y - U, y + U]$, que representa los valores que pueden razonablemente ser atribuidos al mensurando Y.

Es misión del personal involucrado evaluar la incertidumbre, con el fin de asegurar que es compatible con la tolerancia requerida. Por otra parte, los equipos de control de medida y de ensayo deben ser utilizados de forma que se asegure que la incertidumbre de medida sea conocida y compatible con la aptitud requerida en materia de medición.

II.2.5 Aseguramiento de mediciones⁽⁹⁾

Con el propósito de que los procesos de producción sean aceptados internacionalmente, las exigencias sobre las cuales se fundamentan las normas de calidad, demandan una transformación vigente que permita asegurar y evaluar nuestros procesos.

En todos los sistemas de calidad se incluye un elemento que ayuda a garantizar la calidad del producto, la metrología. De esta manera los conceptos metroológicos tales

como incertidumbre y trazabilidad requieren ser estudiados y aplicados para controlar la variabilidad del proceso productivo y en consecuencia la del producto. En la época actual, para buscar una aceptación internacional sin barreras técnicas, las empresas tratan de obtener su certificación por la norma ISO 9000. En esta norma, uno de los veinte elementos que es necesario cumplir para obtener la certificación es el "Control de los equipos de inspección, medición y prueba".

El sistema de aseguramiento metrológico es un conjunto de actividades programadas sistemáticamente que garantizan, entre otras cosas, que los equipos e instrumentos de inspección, medición y ensayo tengan las características adecuadas para su uso, que el operador de un instrumento tenga la habilidad necesaria para aplicarlo correctamente y que los errores en dichas mediciones sean conocidos y controlados.

En los capítulos siguientes se realiza una propuesta del Sistema de Control de Mediciones para una Unidad de Generación de Vapor, buscando que este permita poder evaluar la eficiencia de la Unidad y su incertidumbre así como un monitoreo continuo de la misma, de tal forma, que se cumpla con los requisitos y/o necesidades de los usuarios. También se busca que el Sistema funcione en la forma establecida y pueda cumplir con las exigencias de la normatividad existente, y por lo cual se plantean los objetivos y la hipótesis expuestos más adelante

III. HIPÓTESIS

Lo que se busca al establecer un sistema de control de mediciones, es garantizar que los resultados de estas mediciones permitan tomar las decisiones adecuadas a cada situación y con base a ellas se pueda lograr la mejora continua del sistema.

Como se ha mencionado antes el objetivo de una caldera bien diseñada es aprovechar al máximo la energía proveniente del combustible para transformarla en vapor, es decir con la máxima eficiencia posible. Por tal razón en este trabajo se busca que el Sistema de Control de Mediciones permita tener un monitoreo continuo de la Unidad en cuestión, de forma tal que se puedan realizar correcciones y de esta forma mantener el aprovechamiento de energía al máximo brindando el servicio con la calidad requerida. Para lo cual se plantea la siguiente hipótesis:

Si se establece un programa de aseguramiento de mediciones en la Unidad de Generación de Vapor y se aplica, entonces, se podrá garantizar que las mediciones son confiables para llevar a cabo la evaluación de la eficiencia y de esta forma encontrar oportunidades de mejora en el funcionamiento y en el sistema de la Unidad.

IV. OBJETIVO

Garantizar que los requisitos metrológicos estén satisfechos para la operación segura y para evaluar la eficiencia de la Unidad de Generación de Vapor.

Para cumplir con este objetivo se planeó:

- Diseñar un programa de aseguramiento de mediciones
- Identificar las fuentes de incertidumbre involucradas en la evaluación de la eficiencia de la Unidad de Generación de Vapor y evaluarlas
- Describir la trazabilidad para cada una de las mediciones, a su patrón correspondiente
- Evaluar la eficiencia en Unidades de Generación de Vapor con su incertidumbre correspondiente
- Evaluar si las normas que se encuentran en uso son adecuadas para garantizar dichos requisitos

V. ASEGURAMIENTO DE MEDICIONES (Norma ISO 10012⁽¹⁰⁾ Sistema de control de medición)

V.1 Requerimientos generales

El sistema de control de medición de la Unidad de Generación de Vapor garantizará que los requerimientos metroológicos específicos estén satisfechos, para poder evaluar la eficiencia de esta, basado en el Código ASME⁽¹¹⁾ (PTC4 correspondiente a Unidades de Generación de Vapor), y para que su operación se realice de manera segura⁽¹²⁾ (NOM-020-STPS-2002).

Los requerimientos metroológicos para los equipos de medición de la Unidad de Generación de Vapor a ser calibrados, verificados o confirmados serán especificados. Estos requerimientos son necesarios para el equipo de medición y el proceso de medición.

Los requerimientos necesarios para la Unidad de Generación de Vapor dependerán del tipo de unidad (tubos de humo o tubos de agua), tamaño de la unidad y de los instrumentos de medición instalados en ella. Estos requerimientos son presentados en la parte "V.4 Realización del sistema de control de medición" de este capítulo.

Todo equipo de medición dentro del sistema de la Unidad de Generación de Vapor será confirmado. El proceso de medición dentro del sistema será controlado.

La organización especificará los procesos de medición para la Unidad de Generación de Vapor.

V.2. Responsabilidad de la dirección (Entidad responsable)

Las responsabilidades de la función metroológica serán definidas por la entidad responsable de la Unidad de Generación de Vapor. La alta dirección de la entidad responsable garantizará la disponibilidad de los recursos necesarios para establecer y mantener la función metroológica y esta podrá ser distribuida a lo largo de la organización.

V.2.1 Sistema de control de medición

El sistema de control de medición es definido como la puesta de elementos interrelacionados o interactuando necesarios para alcanzar la confirmación metrológica y el control continuo de los procesos de medición.

La función metrológica de la entidad responsable establecerá, documentará, mantendrá y mejorará continuamente la eficacia del sistema de control de medición en la Unidad de Generación de Vapor para optimizar su eficiencia y garantizar su funcionamiento seguro. Los cambios al sistema estarán de acuerdo con los requisitos de la organización.

El sistema de control de medición consiste de la confirmación metrológica del equipo de medición y del control de la realización de los procesos de medición.

V.2.2 Requisitos del cliente

La función metrológica de la entidad responsable garantizará que las necesidades y expectativas de medición en la Unidad de Generación de Vapor estén determinadas y convertidas en requisitos metrológicos. Además garantizará que el sistema de control de medición cumpla los requisitos metrológicos de los usuarios del vapor. También podrá demostrar conformidad con los requisitos de los usuarios de este servicio.

V.2.3 Objetivos de calidad

La función metrológica de la entidad responsable establece, con el fin de garantizar el funcionamiento de la Unidad de manera segura y poder evaluar su eficiencia así como el monitoreo continuo de las variables importantes, los siguientes objetivos de calidad para el sistema de control de medición en la Unidad de Generación de Vapor:

1. No se podrá iniciar el funcionamiento de la Unidad de Generación de Vapor si los instrumentos de seguridad se encuentran fuera de control o sin calibración.
2. Se garantizará a los usuarios, de la Unidad de Generación de Vapor, el servicio de vapor de manera segura.
3. Todos los equipos de medición involucrados en la evaluación de la eficiencia de la Unidad deberán ser confirmados.

V.2.4 Revisión por la entidad responsable

La entidad responsable garantizará la revisión sistemática del sistema de control de mediciones en la Unidad de Generación de Vapor en intervalos planeados para su implementación efectiva continua y la satisfacción de necesidades de los usuarios. Asimismo, garantizará que los recursos necesarios estén disponibles para fijar el sistema de control de medición en la Unidad de Generación de Vapor. El plan para la revisión por parte de la entidad responsable del sistema de control de medición será documentado. Basado en los resultados de la revisión, la función metrológica de la entidad responsable modificará el sistema como sea necesario. Los resultados de todas las revisiones y todas las acciones tomadas serán archivados.

La revisión del Sistema de Control de Mediciones en la Unidad será determinada por el plan presentado a continuación:

TR	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RTSCM												X
RPSCM				X				X				

Código. TR: Tipo de revisión; RTSCM: Revisión Total del Sistema de Control de Mediciones y RPSCM: Revisión Parcial del Sistema de Control de Mediciones

Basado en este plan (plan anual) y en los resultados de estas revisiones, se procederá a la mejora del sistema y se realizarán las modificaciones necesarias, manteniéndose un archivo documentando de todos aquellos cambios que sean requeridos y sus respectivas justificaciones.

V.3 Recursos de la entidad responsable

V.3.1 Recursos humanos

V.3.1.1 Asignación de personal

La entidad responsable de la función metrológica definirá y documentará las responsabilidades de todo el personal asignado a la operación y control del Sistema de Control de Mediciones en la Unidad de Generación de Vapor.

En la figura V.1 se muestra la estructura organizacional sugerida para poder definir e implementar el sistema de control de medición.

Figura V.1. Estructura organizacional.

Entidad Responsable de la Unidad de Generación de Vapor: Será la entidad encargada de llevar a cabo las medidas necesarias, para garantizar el buen funcionamiento de la Unidad de Generación de Vapor, proporcionando los recursos materiales para ello y realizando la toma de decisiones que puedan ser requeridas. También se encargará del manejo de la documentación, así como de la evaluación del personal, de los servicios que le sean proporcionados por externos y la planeación de revisiones al sistema de control de mediciones.

Mantenimiento: El personal involucrado en esta área será el responsable directo del mantenimiento tanto general como del sistema de control de la Unidad de Generación de Vapor, desempeñará además de manera conjunta con el fogonero, y de acuerdo con el plan de revisiones, las revisiones correspondientes. Este equipo de mantenimiento será clave para poder realizar los ajustes a los planes de revisión establecidos inicialmente, de forma tal que se puedan ampliar los periodos de revisión del sistema o disminuir si es el caso.

Fogoneros: Son el o las personas encargadas del funcionamiento de la Unidad de Generación de Vapor, ellos se encargan del arranque, operación y paro de la Unidad y son los que pueden detectar fallas en el equipo debidas a un mal funcionamiento o averías del equipo. Los fogoneros podrán solicitar a mantenimiento, que su equipo sea revisado fuera de los periodos establecidos para mantenimiento, si es que así se requiere.

Servicios Externos: Serán los encargados de realizar las operaciones que queden fuera de las actividades establecidas en los párrafos anteriores. Entre estas actividades pueden entrar las de calibración de equipos de medición, caracterización de combustible, de agua de alimentación a calderas y ajuste del exceso de aire. También puede ser que para algunas situaciones de mantenimiento mayor o ajuste de la Unidad se requiera de estos servicios externos.

Estas responsabilidades podrán ser adaptadas a cualquier sistema si es que se cuenta con uno ya establecido, como lo puede ser un sistema de calidad.

V.3.1.2 Competencia y adiestramiento

La entidad responsable de la función metrológica garantizará que el personal involucrado (fogonero, personal de mantenimiento, servicios externos) con el Sistema de Control de Medición de la Unidad de Generación de Vapor es competente para representar sus tareas asignadas. Algunas habilidades, el adiestramiento y la extensión de responsabilidades así como el impacto de sus actividades en la efectividad del sistema de control de medición serán documentadas.

Estas serán las principales características requeridas para cada uno de los responsables de las áreas asignadas a la operación y control del sistema de medición.

Entidad Responsable de la Unidad de Generación de Vapor: A cargo de esta entidad deberá de estar la persona que cumpla con el siguiente perfil:

- Persona que pueda demostrar, mediante documentos que lo avalen, el conocimiento en la administración de recursos para un área similar y que tenga conocimiento de la importancia del servicio que se proporciona en la Unidad de Generación de Vapor.
- Persona que disponga del tiempo requerido por el puesto (en ocasiones tiempo fuera del horario de trabajo).
- Persona que preferentemente cuente con estudios afines al área de la Ingeniería o en su caso, que cuente con la experiencia en áreas similares.
- Deberá de ser una persona con alto sentido de la responsabilidad, alto compromiso hacia los resultados, dispuesto a trabajar bajo presión constante, y que muestre liderazgo hacia su equipo de trabajo.

Mantenimiento: El personal de esta área deberá de contar con los atributos siguientes:

- La persona encargada de los trabajos de mantenimiento deberá de ser un profesional de la carrera de Ingeniería relacionada con el área de servicios (vapor en este caso). Que pueda demostrar mediante la documentación que lo respalde la experiencia o el conocimiento en el área.
- El personal que se encuentre en esta área deberá de tener el conocimiento para el mantenimiento menor, usos y calibración de los equipos de medición involucrados en la Unidad de Generación de Vapor.
- Los documentos pueden determinar si la persona tiene el entrenamiento necesario para realizar las actividades correspondientes al mantenimiento de la Unidad de Generación de Vapor, así como a los equipos de medición involucrados y sus accesorios. El grupo de personas que integren la unidad de mantenimiento podrá incluir aprendices, siempre que estos se encuentren bajo la supervisión del personal de mayor competencia.

Fogoneros: El personal que tiene la responsabilidad de la Unidad de Generación de Vapor deberá de cumplir los puntos siguientes:

- Demostrar su capacidad mediante la documentación que certifique, que se cuenta con licencia para actuar como responsable de la Unidad.
- Demostrar estar actualizado en el manejo de la Unidad de Generación de Vapor.
- Tener la experiencia que le avale en el manejo de este tipo de unidades.
- Demostrar la capacidad de reacción ante circunstancias adversas, para poder solucionar dichas circunstancias.
- Demostrar mediante documentos que lo avalen, la capacitación para el manejo de equipos de medición y accesorios de la Unidad de Generación de Vapor.

Servicios Externos: El personal o empresa que cumpla con estas actividades deberá de satisfacer las necesidades siguientes:

- Demostrar mediante documentos que lo avalen, la competencia para la realización de las actividades que se están pretendiendo llevar a cabo.
- Demostrar mediante documentos, la participación de la organización y/o del personal en este tipo de actividades, para con otras organizaciones.

- Contar con documentos que avalen que se es un laboratorio que permite tener trazabilidad en las mediciones (por ejemplo, para el caso de calibración de equipos).

Todas las habilidades, el adiestramiento y el alcance de las responsabilidades del personal involucrado en el sistema de control de medición serán manejados por la entidad responsable, la cual mantendrá archivada dicha información, y la utilizará para realizar programas de capacitación de este personal. La evaluación del personal podrá realizarse mediante indicadores de cumplimiento del servicio y en su caso por los de incumplimientos de la manera siguiente, por ejemplo; si se presentó un incumplimiento se determina quien fue el causante raíz de que se diera, se recauda la información que pueda mostrar al causante y se archiva esta información, la que será evaluada en las revisiones para poder determinar si alguno de los integrantes está fallando en el sistema.

V.3.2 Fuentes de información

V.3.2.1 Procedimientos

Los procedimientos del Sistema de Control de Medición de la Unidad de Generación de Vapor serán documentados y validados para garantizar la implementación apropiada, consistencia de aplicación y validez de los resultados de medición.

Los nuevos procedimientos o cambios a procedimientos documentados serán autorizados y controlados (pueden ser basados en publicaciones de prácticas de medición estándar, o en instrucciones escritas de clientes o fabricantes de equipo). Los procedimientos estarán disponibles y serán proporcionados cuando sean requeridos.

Para la elaboración de los procedimientos del sistema de control de mediciones, se deberá seguir el documento "*elaboración de documentos del SCM*" que se presenta en la estructura siguiente (se incluye el formato y los puntos a cumplir en la estructura si es que aplican):

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	I-ER-001
	Instructivo: "Elaboración de documentos del SCM"	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de x

1.- OBJETIVO:

Establecer los lineamientos a seguir para la elaboración de los documentos que integran el Sistema de Control de Mediciones, para asegurar la consistencia de los mismos.

2.- ALCANCE:

Aplica, a la elaboración de todos los documentos involucrados en el "Sistema de Control de Mediciones" de la Unidad de Generación de Vapor.

3.- DEFINICIONES

3.1.- Documento: Es toda aquella información disponible en cualquier medio, que disciplina los procesos de la organización

3.2.- El sistema de control de medición es definido como la puesta de elementos interrelacionados o interactuando necesarios para alcanzar la confirmación metrológica y el control continuo de los procesos de medición.

3.3.- SCM: Sistema de Control de Mediciones para la Unidad de Generación de Vapor.

3.4.- Usuario: Persona que esta involucrada con el SCM, para su implementación, control y mejora.

4.- DESCRIPCIÓN:

4.1.-La elaboración de un documento del SCM es necesaria para dar cumplimiento con los requisitos de la norma ISO 10012 y serán parte fundamental para la implementación, control y mejora del sistema.

La entidad responsable de la Unidad de Generación de Vapor se encargará de realizar las actividades administrativas para el desarrollo de los diferentes documentos que puedan ser generados.

Los documentos generados utilizarán para su identificación única el documento "P-ER-001 (Identificación de documentos)", el cual se encuentra en el Anexo presentado al final del trabajo.

4.2 El usuario elabora el documento de acuerdo a su contenido y utilizando la estructura de la tabla siguiente:					
Secciones del documento	Características	Tipo de documento			
		P	I	F	C
Objetivo	Define el propósito del documento	*	*	*	*
Alcance	Establece en que caso es aplicable el documento y el rango de actividades contempladas	*	*	*	*
Definiciones	Términos, conceptos y abreviaciones usadas en el documento	*	*	*	*
Materiales	Para instructivos, detalla los materiales necesarios para la ejecución de las actividades, preferentemente deben ser redactadas en tiempo presente	NA	**	NA	NA
Descripción	Detalles del contenido del documento. Preferentemente redactadas en tiempo presente	*	*	*	*
Documentos de apoyo	Documentos referidos en el documento en cuestión	*	*	*	*

En donde:

- * Indica una sección obligatoria en el documento
- ** Indica una sección opcional en el documento
- NA Indica una sección que no es requerida en el documento

4.3.- El usuario tomará en cuenta las siguientes consideraciones al definir el contenido de un documento:

- 4.3.1.- En caso de que una sección, de un documento, identificada como obligatoria no sea requerida, una leyenda de "no aplica", es usada para cancelarla.
- 4.3.2.- Para los documentos externos el contenido no esta normado.
- 4.3.3.- Para la forma de almacenamiento de un documento se pueden

<p>tener una o más opciones por lo que se usara una línea diagonal para especificar todas las opciones.</p> <p>4.4.- Los documentos elaborados por los participantes del SCM entregarán el archivo en forma electrónica y papel a la entidad responsable de la Unidad de Generación de Vapor, posteriormente se realizará, la recolección de firmas del personal encargado de su elaboración, revisión y aprobación.</p> <p>5.- DOCUMENTOS DE APOYO</p> <p>Norma ISO 10012 Sistema de control de medición</p>		
Control de cambios en el documento		
Resumen del cambio:		
Elaboró	Revisó	Aprobó
Firma	Firma	Firma
Nombre	Nombre	Nombre
Puesto	Puesto	Puesto

V.3.2.2 Software

El software usado en el proceso de medición y cálculos de resultados será documentado, identificado y controlado hasta garantizarlo apropiadamente para uso continuo en la Unidad de Generación de Vapor.

Verificación de algoritmos de cálculo, manejo de configuración para aplicaciones complejas o críticas, o una combinación de ellos como sea necesario para alcanzar los resultados de medición requeridos.

El software utilizado en la determinación de la eficiencia de la Unidad de Generación de Vapor, así como, para el cálculo de la incertidumbre de medición es una hoja de cálculo, esta hoja está validada mediante su aplicación a un ejemplo práctico, para el cual el cálculo se realiza en papel verificándose el algoritmo usado en la hoja electrónica.

V.3.2.3 Archivos

Los archivos que contengan la información de la Unidad de Generación de Vapor requerida para la operación del sistema de control de medición serán mantenidos. Un procedimiento documentado garantizará la identificación, almacenamiento, protección, búsqueda, tiempo de retención y disposición de archivos.

La identificación y búsqueda de los documentos del sistema de control de la Unidad de Generación de Vapor se realizará en forma sencilla si se conoce el código correspondiente que se explica en el documento "Identificación de documentos (P-ER-002)", (ver Anexo).

Todos los archivos obsoletos se resguardarán en un archivo muerto en acuerdo con lo establecido en el procedimiento "P-ER-003 (Tiempo de retención y disposición de archivos)", (ver Anexo). Debemos de tener presente que no todos los archivos serán obsoletos al generarse un nuevo documento que lo sustituya, este es el caso de los informes de calibración que tienen la peculiaridad, de que la información de las calibraciones al paso del tiempo nos servirá para validar el cambio de los periodos de calibración o para la caracterización de un equipo determinado.

V.3.2.4 Identificación

Los elementos del proceso del Sistema de Control de Medición de la Unidad de Generación de Vapor serán claramente especificados individual o colectivamente. Estos serán una identificación del estado de confirmación del equipo. Los instrumentos o equipo confirmado solamente para uso en un proceso de medición particular o procesos serán claramente identificados o de otra manera controlados para prevenir el uso no autorizado. El equipo no confirmado del sistema se distinguirá del equipo confirmado. Esta identificación del equipo es mediante etiquetas que distinguen al equipo confirmado del no confirmado. La información contenida en esta etiqueta se puede localizar en el instrumento a simple vista y de esta manera se podrá acceder a la información contenida en el archivo correspondiente. El formato de la etiqueta contendrá la información y aspecto siguiente:

Identificación del instrumento:
No. de informe de calibración
Fecha de calibración:
Fecha de próxima calibración:
Laboratorio que calibro:

V.3.3 Recursos materiales

V.3.3.1 Equipo de medición

Todos los equipos de medición necesarios para satisfacer los requisitos metroológicos estarán disponibles e identificados en el archivo del sistema de control de medición de la Unidad de Generación de Vapor. Los equipos de medición serán confirmados y usados en un ambiente que esté controlado para garantizar los resultados de medición. El equipo de medición usado para monitorear y archivar las cantidades de influencia estará incluido en el sistema de control de medición.

Se deberá contar con patrones, si así es requerido, que estarán calibrados por un laboratorio acreditado y que servirán a su vez para las calibraciones de los instrumentos de medición empleados en la Unidad de Generación de Vapor. Puesto que estos equipos son calibrados bajo condiciones controladas se deberá tener cuidado de realizar las correcciones pertinentes, si son necesarias, a cada equipo de medición de la Unidad de Generación de Vapor, puesto que esta se encuentra bajo condiciones ambientales diferentes a las de calibración de los instrumentos.

V.3.3.2 Almacenamiento y manejo del equipo de medición

La función metroológica de la gerencia establecerá, mantendrá y documentará los procedimientos para recibir, manejar, transportar, almacenar y despachar el equipo de medición, para prevenir el abuso, mal uso, daño y cambios en las características metroológicas. Habrá procedimientos para la disposición del equipo de medición removido del sistema de control de medición.

V.3.3.3 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales necesarias para la operación correcta del proceso de medición cubierta por el sistema de control de medición de la Unidad de Generación de Vapor serán documentadas. Los factores ambientales que afecten las mediciones serán monitoreados y archivados. Las correcciones serán archivadas y aplicadas a los resultados de medición, si es apropiado.

Es necesario tener presente que las condiciones ambientales pueden ocasionar que los equipos de medición requieran de las correcciones de las lecturas presentadas por lo que se debe ser cuidadoso.

Las condiciones empleadas comúnmente en los laboratorios de calibración son:

- Presión, de acuerdo con la ubicación del laboratorio de calibración y determinada por un barómetro o equipo que permita determinar la presión barométrica, en base a la altitud del lugar;
- Temperatura, se suele tener un intervalo de 18 a 24 °C, para lo cual se utilizan sistemas de aire acondicionado que permiten además controlar la humedad;
- Humedad, se recomienda de 30 a 60 %, se utilizan sistemas de aire acondicionado para su control.

Las condiciones ambientales que pueden afectar los resultados de medición en la Unidad de Generación de Vapor incluyen: control de polvo, humedad, temperatura, presencia de gases de combustión y limpieza del equipo. Estos factores pueden afectar al equipo de medición si se permite su interacción con las partes susceptibles a corrosión principalmente.

V.3.4 Proveedores externos

La función metrológica de la gerencia definirá y documentará los requisitos de productos y servicios a ser proporcionados por proveedores externos para el sistema de control de medición de la Unidad de Generación de Vapor. Los proveedores externos serán evaluados y seleccionados en base a su habilidad para conocer los requerimientos documentados. El criterio para la selección, monitoreo y evaluación serán definidos y documentados y los resultados archivados. Los archivos de los productos o servicios suministrados serán mantenidos por los proveedores externos.

V.4. Realización del sistema de control de medición

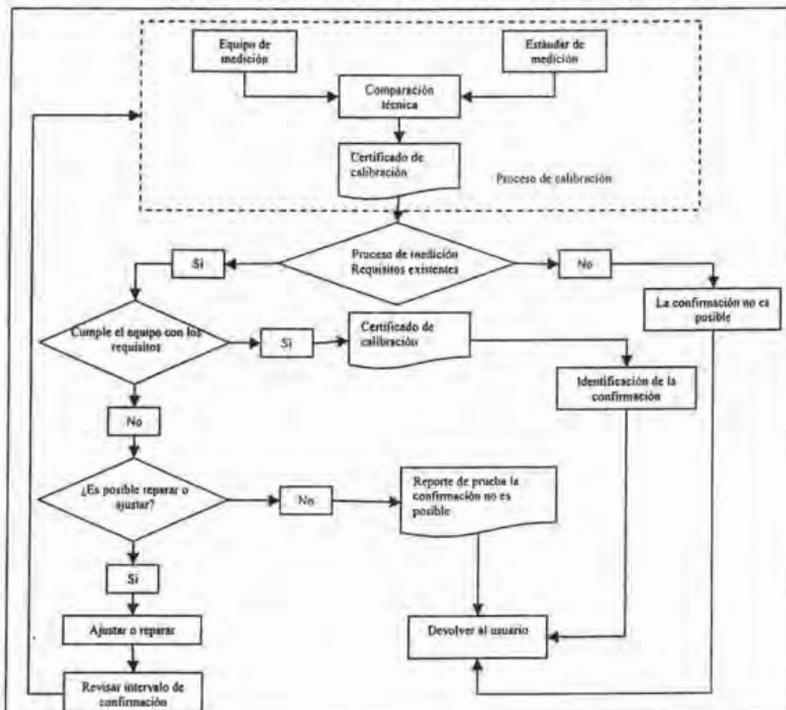
V.4.1 Proceso de confirmación metrológica

V.4.1.1 Confirmación metrológica

La confirmación metrológica (ver figura V.2) será diseñada e implementada para dar la seguridad de que las mediciones satisfacen los requisitos del proceso de medición de la Unidad de Generación de Vapor. Para cada confirmación, las características metrológicas del equipo de medición serán comparadas contra los requisitos metrológicos.

Para poder llevar a cabo el proceso de confirmación metrológica primeramente se definen las exigencias metrológicas del usuario (EMU), establecidas para poder realizar la evaluación de la eficiencia de la Unidad así como su monitoreo continuo. Enseguida se presenta la Unidad a ser estudiada, así como las (CEM) características del equipo de medición de la misma. Tanto las EMU como las CEM son empleadas en la confirmación de los equipos de la Unidad de Generación de Vapor.

Figura V.2 Proceso de confirmación metrológica



Exigencias Metrológicas del Usuario (EMU)

Puesto que lo que se pretende en el trabajo, es realizar el Aseguramiento de Mediciones para poder determinar la eficiencia de la Unidad de Generación de Vapor, se consideran los requerimientos del Código ASME⁽¹¹⁾ (PTC4, ASME POWER TEST CODES, Test Code for Steam Generating Units) y de la Norma referente a la seguridad de la Unidad de Generación de Vapor (NOM-020-STPS-2002⁽¹²⁾), como las Exigencias Metrológicas del Usuario (EMU) a ser cumplidas por las características del equipo de medición (CEM) para alcanzar la confirmación metrológica.

Las tablas V.1 y V.2 han sido tomadas del Código ASME PTC-4⁽¹¹⁾ y son consideradas como guía para definir las EMU, en estas se puede observar que a cada uno de los errores de medición corresponderá un efecto en la eficiencia que deberá de ser considerado. Se debe de tener cuidado ya que los datos ajustan aproximadamente con la experiencia, pero no están pensados para ser usados en los cálculos. En las tablas se presentan los errores para equipos calibrados (marcados con negritas) que serán empleados en la confirmación metrológica.

Tabla V.1. Método de entradas y salidas

Medición	Error de medición, %	Error en la η calculada del Generador de Vapor, %
(1) Peso de tanques (escalas calibradas)	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
(2) Tanques volumétricos (Calibrados)	$\pm 0,25$	$\pm 0,25$
(3) Boquilla u orificio de flujo calibrado incluyendo manómetro	$\pm 0,35$	$\pm 0,35$
(4) Boquilla u orificio de flujo calibrado incluyendo registrador	$\pm 0,55$	$\pm 0,55$
(5) Escalas de carbón – lote o vertido (calibrado)	$\pm 0,25$	$\pm 0,25$

Tabla V.1. Método de entradas y salidas (continuación)

Medición		Error de medición, %	Error en la η calculada del Generador de Vapor, %
(6) Boquilla u orificio de flujo no calibrado incluyendo manómetro		$\pm 1,25$	$\pm 1,25$
(7) Boquilla u orificio de flujo no calibrado incluyendo registrador		$\pm 1,60$	$\pm 1,60$
(8) Valor calorífico del combustible	(carbón)	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$
	(gas y aceite)	$\pm 0,35$	$\pm 0,35$
(9) Flujo recalentado (basado en los cálculos del balance de calor)		$\pm 0,60$	$\pm 0,10$
(10) Temperatura de salida del sobrecalentador (dispositivo de medición calibrado)		$\pm 0,25$	$\pm 0,15$
(11) Presión de salida del sobrecalentador (dispositivo de medición calibrado)*		$\pm 1,00$	$\pm 0,00$
(12) Temperatura de entrada y salida del recalentador (dispositivo de medición calibrado)		$\pm 0,25$	$\pm 0,10$
(13) Presión de entrada y salida del recalentador (dispositivo de medición calibrado)*		$\pm 0,50$	$\pm 0,00$
(14) Temperatura del agua de alimentación (dispositivo de medición calibrado)		$\pm 0,25$	$\pm 0,10$

*Como se puede observar en la tabla V.1 para la medición de presión, el instrumento calibrado con un 1,00 y 0,50 % de error no tiene efecto para la eficiencia por lo que para la confirmación se podrá utilizar un % de error superior (de igual manera se podrá proceder para los errores de los instrumentos en que el efecto en la eficiencia sea nulo: humedad y temperatura del aire).

Tabla V.2. Método de pérdidas de calor

Medición		Error de medición, %	Error en la eficiencia calculada del Generador de Vapor, %
(1) Valor calorífico del combustible	(carbón)	$\pm 0,50$	$\pm 0,03$
	(gas y aceite)	$\pm 0,35$	$\pm 0,02$
(2) Análisis de orsat		$\pm 3,00$	$\pm 0,30$
(3) Temperatura del gas de salida (dispositivo de medición calibrado)		$\pm 0,50$	$\pm 0,02$
(4) Temperatura del aire de entrada (dispositivo de medición calibrado)		$\pm 0,50$	$\pm 0,00$
(5) Último análisis de carbón (carbón)		$\pm 1,00$	$\pm 0,10$
(5) Último análisis de hidrogeno		$\pm 1,00$	$\pm 0,10$
(6) Humedad del combustible		$\pm 1,00$	$\pm 0,00$

Además, se deben de considerar otras mediciones referentes al buen funcionamiento de la Unidad de Generación de Vapor que deben de formar parte del sistema de control de mediciones de la Unidad, estas mediciones son:

- la calidad del agua de alimentación, la cual permite tener control del contenido de sales entrante a la Unidad. Este control lleva a que se puedan disminuir las incrustaciones debido a la presencia de estas sales y por tanto a una mejor transferencia de calor. Además se requiere del control del agua dentro de la Unidad con la finalidad de poder realizar el purgado de la misma y así de esta manera evitar la acumulación y mantener en un nivel adecuado su concentración. Los límites recomendados de las características del agua entrante a las calderas de tubos de humo son las presentadas en la tabla V.3⁽¹³⁾.

Tabla V.3. Características del agua entrante (tubos de humo)

Presión máxima de servicio (MPa)	≤ 0,049	> 0,049
Aspecto visual	Transparente, sin color ni sedimentos	
Dureza en mg/l de CaCO ₃	≤ 10	≤ 5
Oxígeno disuelto (O ₂), en mg/l	-	≤ 0,2
pH a 20 °C	8 a 9	8 a 9
CO ₂ en forma de HCO ₃ ⁻ , en mg/l	≤ 25	≤ 25
Aceites y grasas en mg/l	≤ 3	≤ 1
Materias orgánicas valoradas en mg/l de KMnO ₄ consumido ¹⁾	≤ 10	≤ 10

1) en el caso de alta concentración de materias orgánicas no oxidables con KMnO₄ y si oxidables con K₂CrO₇ se consultara un especialista

Las características correspondientes al agua en el interior de las calderas de tubos de humo son las de la tabla V.4.

Tabla V.4. Características del agua interna (tubos de humo)

Presión máxima de servicio (MPa)		≤ 0,049	0,049 < p ≤ 1,275	> 1,275
Salinidad total en mg/l	Vaporización media ≤ 40 kg/m ² (<0.39 kPa)	≤ 6000	≤ 6000	≤ 4000
	> 40 kg/m ² (>0.39 kPa)	≤ 5000	≤ 5000	≤ 3000
Sólidos en suspensión, en mg/l		≤ 300	≤ 300	≤ 250
Alcalinidad total, en mg/l CaCO ₃		≤ 1000	≤ 800	≤ 600
pH a 20 °C		10,5 a 12,5	10 a 12	10 a 12
Fosfatos, en mg/l P ₂ O ₅ ⁻		≤ 30	≤ 25	≤ 20
Sílice, en mg/l SiO ₂ ¹⁾		≤ 250	≤ 200	≤ 150 ²⁾

1) La concentración de SiO₂ en el agua de la caldera guardarán la relación: $\frac{\text{SiO}_2 \text{ (mg/l)}}{m} < 12,5$
m (m mol/l)

2) En aquellos casos en que exista un sobrecalentador, se limitara a 100 mg/l para p < 1,96 MPa y a 75 mg/l para presiones superiores

- La medición del nivel de agua en la Unidad, el cual se controla para conocer que el mismo es el adecuado para mantener un funcionamiento seguro, así como para regular el flujo de agua de alimentación⁽¹³⁾.

Finalmente la única exigencia que se debe de cubrir en cuanto a instrumentos de medición por parte de la Norma de seguridad es solamente la referente al instrumento de presión en el punto 7.1.5 inciso a) que establece que el rango de los instrumentos de medición de presión debe abarcar entre 1,5 y 4 veces la presión normal de operación. Las válvulas de seguridad no son empleadas para obtener mediciones que se requieran en la operación o en cálculos, sin embargo, estas deben de ser calibradas para garantizar la seguridad de la Unidad en caso de presentarse una sobre presión.

Definición de la Unidad a ser confirmada

La Unidad de Generación de Vapor, de la cual se realizará la confirmación de sus equipos de medición, es del tipo de tubos de humo, horizontal de cámara húmeda, que maneja vapor saturado, y que cuenta con la siguiente información referente a sus características de diseño y operación (los datos de placa se presentan con las unidades originales y entre paréntesis su valor correspondiente en el Sistema Internacional):

Presión de diseño	22,0 kg/cm ² (2 157,5 kPa)
Temperatura de diseño	Temperatura de saturación @ Presión de diseño
Presión de operación	15,0 kg/cm ² (1 471,0 kPa)
Temperatura de operación	Temperatura de saturación @ Presión de operación 200,4 °C
Capacidad	6 000 kg/h
<i>Agua de alimentación</i>	
Flujo	6 000 kg/h
Presión	15,0 kg/cm ² (1 471,0 kPa)
Temperatura	20 °C
<i>Combustible (Diesel)</i>	
Flujo	459,7 kg/h
Presión	6,8 kg/cm ²
Temperatura	40 °C
<i>Condiciones ambientales</i>	
Temperatura	25 °C
Presión barométrica	585 mm de Hg (77 993,6 kPa)

Humedad relativa	50 %
<i>Gases de combustión</i>	
Temperatura	250 °C
CO ₂	11,9 % vol.
O ₂	5,0 % vol.
CO	20 ppm

Características del equipo de medición (CEM)

Aunado a la información de la Unidad, esta la información de las características del equipo de medición, las cuales están de acuerdo con el uso destinado de cada uno de los equipos. Todos los equipos de medición deben estar calibrados para poder llevar a cabo la confirmación metrológica (ver figura V.2 Proceso de confirmación metrológica), por lo que las características que aparecen en la tabla V.5. corresponden a equipos calibrados.

Tabla V.5 Características del equipo de medición.

Variable a medir	Equipo de medición	Características
Presión de combustible	Manómetro de carátula circular tipo expansión por muelle	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance: 21 Kg/cm² (2 059,4 kPa) ➤ Fiable desde: 2,6 kg/cm² (255,0 kPa) ➤ T ambiental de uso entre -20 °C y 50°C ➤ Error debido a la temperatura del instrumento es de $\pm 0,3$ % por cada 10 °C por encima (+) o por debajo () de la temperatura de referencia ➤ Uso de manómetro en baño de glicerina par evitar oscilaciones de la aguja ➤ Colocado lo más cerca del cabezal de combustión ➤ Repetibilidad $\pm 0,1$ % del alcance total (2 kPa) ➤ Sensibilidad $\pm 0,05$ % del alcance total (1 kPa) ➤ Precisión de 1,6 % de la escala total ➤ Incertidumbre $\pm 0,45$ kg/cm² (44 kPa) con un factor de cobertura de $k=2$

Tabla V.5 Características del equipo de medición (continuación).

Variable a medir	Equipo de medición	Características
Presión de agua	Manómetro de carátula circular tipo expansión por muelle	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance: 35,0 kg/cm² (3 432,3 kPa) ➤ Fiable desde: 8,42 kg/cm² (825,7 kPa) ➤ T ambiental de uso entre -20 °C y 50°C ➤ Error debido a la temperatura del instrumento es de + 0,3 % por cada 10 °C por encima (+) o por debajo () de la temperatura de referencia ➤ Uso de manómetro en baño de glicerina par evitar oscilaciones de la aguja ➤ Colocado a la descarga de la bomba de agua de alimentación ➤ Repetibilidad + 0,1 % del alcance total (3,0 kPa) ➤ Sensibilidad + 0,05 % del alcance total (1,6 kPa) ➤ Incertidumbre + 0,40 kg/cm² (39 kPa) con un factor de cobertura de k=2
Presión de vapor	Manómetro de carátula circular tipo expansión por muelle	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance: 36,0 kg/cm² (3 530,4 kPa) ➤ Fiable desde: 9,0 kg/cm² (882,6 kPa) ➤ T ambiental de uso entre -20 °C y 50°C ➤ Error debido a la temperatura del instrumento es de ± 0,3 % por cada 10 °C por encima (+) o por debajo () de la temperatura de referencia ➤ Señal con una marca en rojo de la presión máxima de operación (Presión de relevo de las válvulas de seguridad) ➤ Repetibilidad ± 0,1 % del alcance total (3,5 kPa) ➤ Sensibilidad ± 0,05 % del alcance total (1,8 kPa) ➤ Incertidumbre ± 0,5 kg/cm² (49 kPa) con un factor de cobertura de k=2

Tabla V.5 Características del equipo de medición (continuación).

Variable a medir	Equipo de medición	Características
Temperatura del combustible	Termómetro de líquido en vidrio de mercurio	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance desde: 0 °C hasta 90 °C ➤ Fiable desde 0 °C ➤ Corrección debida a la columna emergente ➤ División mínima de 1 °C ➤ Evitar variaciones en la temperatura de $\pm 5\%$ ➤ Disponer de burbuja de expansión al final del capilar ➤ Repetibilidad $\pm 0,5\text{ °C}$ ➤ Precisión de $\pm 1\%$ de la escala total ➤ Sensibilidad $\pm 0,5\text{ °C}$ ➤ Incertidumbre $\pm 0,66\text{ °C}$ con un factor de cobertura de $k=2$
Temperatura del agua de alimentación	Termómetro de líquido en vidrio de mercurio	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance desde: 0 °C a 100 °C ➤ Fiable desde 0 °C ➤ Disponer de burbuja de expansión al final del capilar ➤ División mínima de 1 °C ➤ Corrección por columna emergente ➤ Repetibilidad $\pm 0,5\text{ °C}$ ➤ Sensibilidad $\pm 0,5\text{ °C}$ ➤ Incertidumbre $\pm 0,5\text{ °C}$ con un factor de cobertura de $k=2$
Temperatura del vapor	Termopar de carátula	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance: 300,0 °C ➤ Fiable desde: 75,0 °C ➤ División mínima de 2 °C ➤ Corrección del cero ➤ Repetibilidad $\pm 1\text{ °C}$ ➤ Sensibilidad $\pm 1\text{ °C}$ ➤ Incertidumbre $\pm 1,2\text{ °C}$ con un factor de cobertura de $k=2$

Tabla V.5 Características del equipo de medición (continuación).

Variable a medir	Equipo de medición	Características
Temperatura de gases de combustión	Pirómetro	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance desde 0 °C hasta 500 °C ➤ Fiable desde: 70 °C ➤ División mínima de 5 °C ➤ Corrección del cero ➤ Repetibilidad $\pm 2,5$ °C ➤ Sensibilidad $\pm 2,5$ °C ➤ Incertidumbre ± 4 °C con un factor de cobertura de $k=2$
Flujo de combustible ¹⁾	Báscula *	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance de 0 a 2 000,0 kg ➤ División mínima de 0,1 kg ➤ Error máximo tolerado 0,3 kg ➤ Sensibilidad ± 200 g ➤ Repetibilidad ± 100 g ➤ Incertidumbre $\pm 0,3$ kg con un factor de cobertura de $k=2$
	Cronómetro	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance 24 h ➤ División mínima 1 s ➤ Incertidumbre ± 1 s con un factor de cobertura de $k=2$
Flujo de vapor ²⁾		Determinado por balance de materia
Flujo de agua	Báscula *	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance de 0 a 30 000 kg ➤ División mínima de 0,1 kg ➤ Error máximo tolerado 0,3 kg ➤ Repetibilidad $\pm 0,6$ kg ➤ Sensibilidad $\pm 0,3$ kg ➤ Incertidumbre $\pm 0,6$ kg
	Cronómetro	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alcance 24 h ➤ División mínima 1 s ➤ Incertidumbre ± 1 s con un factor de cobertura de $k=2$

Tabla V.5 Características del equipo de medición (continuación).

Variable a medir	Equipo de medición	Características
Gases de chimenea	Analizador portátil (celdas electroquímicas)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resolución O₂ 0,1 % vol; incertidumbre $\pm 0,37$ ➤ Resolución CO₂ 0,1 % vol; incertidumbre $\pm 0,30$ ➤ Resolución CO 1 ppm; incertidumbre $\pm 0,45$ ➤ Tiempo máximo de respuesta 30 segundos

Notas:

- 1) El flujo de combustible, para el caso de estudio permite que sea calculado por diferencia (entre la masa inicial y final), utilizando báscula y cronómetro calibrados y procurando que la medición se realice durante la prueba, de tal manera que se asegure el régimen permanente para un nivel de carga de la Unidad previamente establecido.
- 2) El flujo de vapor para el caso de estudio puede ser calculado por balance de materia, siempre y cuando se tenga la seguridad de que no existen fugas presentes en los límites establecidos en la Unidad. Además al realizar la evaluación de la eficiencia de la Unidad debe asegurarse que la purga sea evitada. Las básculas manejan una cantidad aproximada a la consumida por la Unidad en un periodo de 4 h.

Como se puede observar en la tabla V.5, no se han incluido medidores de nivel ni de la calidad del agua, esto debido a que para el agua de alimentación es preferible que se realice un estudio de la calidad de forma tal que, con el previo conocimiento de sus características, se puedan establecer los flujos y los intervalos con que se debe de realizar la purga y de esta forma minimizar los efectos por incrustación, al igual que la pérdida de energía por este concepto.

Por otro lado, el nivel de agua de la unidad no se presenta como un equipo que deba de estar confirmado, ya que, su importancia radica básicamente en que este funcione y se mantenga en el intervalo especificado; es decir, que le indique al operador o fogonero que el nivel de agua se mantiene en los límites de funcionamiento y que él debe realizar su verificación cada vez que inicie su turno para comprobar que el equipo está funcionando.

Resultado de la confirmación

La información relevante para el estado de confirmación de los equipos de medición en la Unidad de Generación de Vapor, es accesibles para el usuario, incluyendo algunas limitaciones o requisitos especiales.

La tabla V.6 muestra los resultados de la confirmación metrológica. Solamente se incluye la información concerniente al % de error de medición para las EMU (tablas V.1

Método de entradas y salidas; V.2 Método de pérdidas de calor), la cuales se han de comparar ante las incertidumbres y características de los equipos de medición CEM (tabla V.5 Características del equipo de medición). Las incertidumbres de los equipos de medición se encuentran en las cartas de trazabilidad, todas con un factor de cobertura de $k=2$.

Tabla V.6 Confirmación metrológica.

Variable a medir	Instrumento	EMU % de error (\pm error)	CEM Incertidumbre	Estado de confirmación
Flujo de agua de alimentación	Báscula	$\pm 0,10$ (± 30 kg) 23 000 a 30 000 kg	$\pm 0,3$ kg 0 a 30 000 kg	Confirmado
	Cronómetro	0-24 h	± 1 s	
Presión agua de alimentación	Manómetro	$\pm 1,00$ ($\pm 0,35$ kg/cm ²) 13,0 a 16,0 kg/cm ²	$\pm 0,2$ kg/cm ² 0 a 35,0 kg/cm ²	Confirmado
Temperatura de agua de alimentación	Termómetro de líquido en vidrio	$\pm 0,25$ ($\pm 0,25$ °C) 0 a 45 °C	$\pm 0,25$ °C 0 a 100 °C	Confirmado
Flujo de combustible	Balanza	$\pm 0,10$ (± 2 kg) 1 750 a 1 950 kg	$\pm 0,15$ kg 0 a 2 000,0 kg	Confirmado
	Cronómetro	0 – 24 h	± 1 s	
Presión del combustible	Manómetro	$\pm 1,20$ ($\pm 0,25$ kg/cm ²) 6,0 a 8,0 kg/cm ²	$\pm 0,22$ kg/cm ² 0 a 21,0 kg/cm ²	Confirmado
Temperatura del combustible	Termómetro de líquido en vidrio	$\pm 0,50$ (± 45 °C) 30 a 50 °C	$\pm 0,33$ °C 0 a 90 °C	Confirmado
Temperatura del aire	Termo higrómetro	$\pm 0,50$ ($\pm 0,35$ °C) 18 a 35 °C	$\pm 0,29$ °C 0 a 70 °C	Confirmado

Tabla V.6 Confirmación metroológica (continuación).

Variable a medir	Instrumento	EMU % de error (\pm error)	CEM Incertidumbre	Estado de confirmación
Humedad relativa	Termo higrómetro	$\pm 3,00$ ($\pm 3,00$ % HR) 30 a 60 %HR	$\pm 1,55$ % HR	Confirmado
Presión barométrica	Barómetro	$\pm 0,5$ ($\pm 0,5$ kPa)	$\pm 0,5$ kPa	Confirmado
Flujo de vapor	Por balance de materia			Confirmado
Presión de vapor	Manómetro	$\pm 1,00$ ($\pm 0,40$ kg/cm ²) 12 a 17 kg/cm ²	$\pm 0,25$ kg/cm ² 0 a 40,0 kg/cm ²	Confirmado
Temperatura del vapor	Termopar	$\pm 0,50$ ($\pm 1,5$ °C) 180 a 220 °C	$\pm 0,6$ 0 a 300 °C	Confirmado
Temperatura de gases de combustión	Termopar	$\pm 0,50$ ($\pm 2,5$ °C) 200 a 300 °C	± 2 0 a 500 °C	Confirmado
Composición de gases de combustión	Analizador portátil	$\pm 3,00$ 3,0 a 6,0 % vol. O ₂ 10,0 a 15,0 % CO ₂ 20 a 150 ppm CO	$\pm 0,34$ $\pm 0,185$ $\pm 0,150$ $\pm 0,225$	Confirmado

V.4.1.2 Intervalos de confirmación

Los métodos usados en los equipos de medición de la Unidad de Generación de Vapor para determinar o cambiar los intervalos de confirmación son descritos en el procedimiento documentado P-ER-004 (Intervalos de confirmación, ver Anexo). Los intervalos de confianza serán regularmente revisados y ajustados cuando sea necesario para seguridad continua, de acuerdo con los requisitos metroológicos especificados.

V.4.1.3 Control de ajuste del equipo

El acceso a los dispositivos de ajuste en los equipos de medición confirmados de la Unidad de Generación de Vapor, será sellado o salvaguardado para prevenir cambios no autorizados. Los sellos o salvaguardas serán designados y localizados de forma tal que pueda ser detectada su falsificación. El sello usado para el control de ajustes puede ser la etiqueta usada en la identificación del equipo definida en V.3.2.4; se coloca simplemente en un lugar visible y en el que se pueda controlar el acceso al equipo, así que para poderlo ajustar o modificar se tendrá que romper, lo que propiciará una sanción por el rompimiento.

Los procedimientos del proceso de confirmación en la Unidad de Generación de Vapor incluirán acciones que serán tomadas cuando los sellos o salvaguardas sean encontrados dañados o rotos.

Los requisitos para el sellado no aplican para dispositivos de ajuste que estén destinados a ser puestos por el usuario sin la necesidad de referencias externas, por ejemplo cero ajustes.

V.4.1.4 Archivos del proceso de confirmación

Las confirmaciones serán soportadas por archivos, dando fe a las condiciones bajo las cuales los resultados fueron obtenidos. Cada uno de tales archivos será aprobado, fechado y marcado por una persona autorizada para dar fe al cumplimiento de los resultados.

Los archivos de la Unidad de Generación de Vapor de la organización, de todos los equipos de medición relevantes cubiertos por el proceso de confirmación serán mantenidos. Estos archivos demostrarán que cada artículo del equipo de medición satisface los requisitos metrológicos especificados dentro del proceso de confirmación para ese equipo. Los certificados de calibración o informes y otra información relevante de la Unidad de Generación de Vapor (por ejemplo, archivos de ajuste y reparación) estarán disponibles. La tabla V.7 presenta el formato sugerido para este propósito.

Tabla V.7 formato de archivo para equipos de medición.

Equipo:	Identificación:	No. de serie:
Descripción:		
Fecha de calibración:		
Número de certificado de calibración:		
Procedimiento de confirmación:	Fecha de confirmación:	
Incertidumbre:	Intervalo de confianza asignado:	
Error máximo permisible designado:		
Condiciones ambientales relevantes (especificar):		
Presión:	Temperatura:	% HR:
Correcciones necesarias		
Notas de mantenimiento (ajuste o reparación)		
Limitaciones de uso:		
Trazabilidad de la calibración (trazabilidad identificada con el informe de calibración correspondiente):		
Requisitos para su uso destinado:		
Persona ejecutora de la confirmación:	Persona responsable de la corrección:	
Nombre y Firma	Nombre y Firma	

Los resultados de calibración de los equipos de medición de la Unidad de Generación de Vapor deberán ser archivados, así que la trazabilidad de todas las mediciones puede ser demostrada y también las mediciones de calibración pueden ser reproducidas bajo condiciones cercanas a las condiciones originales. Estos resultados se encuentran directamente en los informes de calibración de cada uno de los equipos calibrados. Cuando una segunda o tercera parte lleva a cabo una calibración, el sistema de confirmación deberá garantizar que la segunda o tercera parte es competente para hacer esto (ver V.3.4).

En algunas instancias un resultado de verificación es incluido en el reporte de calibración donde se declara si el equipo cumple con (o falla para cumplir con) los requerimientos declarados.

El uso apropiado de las técnicas estadísticas para analizar los resultados de calibraciones precedentes y para apreciar los resultados de calibraciones de varios artículos similares del equipo de medición, puede ayudar en la predicción de incertidumbres acumulativas.

Las estadísticas se pueden obtener a partir de los informes de calibraciones existentes para cada uno de los equipos de medición y en caso de no existir se tendrán que empezar a generar con las calibraciones subsecuentes.

La función metrológica de la gerencia garantizará que solo personas autorizadas puedan generar, enmendar, publicar y borrar archivos. Esas personas serán las establecidas por la entidad responsable en el procedimiento "P-ER-002 (almacenamiento de documentos y archivos, ver Anexo)"

Los archivos de la Unidad de Generación de Vapor pueden estar en manuscritos, en máquina de escribir o microfilm, o en una memoria electrónica o magnética u otro medio de datos (ver P-ER-002).

El tiempo mínimo para la retención de archivos de la Unidad de Generación de Vapor "P-ER-003 (Tiempo de retención y disposición de archivos, ver Anexo)" depende de muchos factores incluyendo los requisitos del cliente, requisitos regulatorios o estatutos, responsabilidad de fabricantes. Los archivos concernientes con los estándares de medición pueden necesitar ser retenidos indefinidamente (ver V.3.2.3).

V.4.2 Proceso de medición

V.4.2.1 Diseño y planeación del proceso

Los requisitos metrológicos de la Unidad de Generación de Vapor serán determinados basados en el cliente (usuarios del servicio), la organización, los requisitos regulatorios y estatutos (ver V.4.1 Proceso de confirmación metrológica). Los procesos de medición designados para conocer estos requisitos específicos estarán documentados y, si es necesario, estarán de acuerdo con el cliente.

Los procesos de medición necesarios para demostrar el cumplimiento de los requisitos de la Unidad de Generación de Vapor serán determinados, planeados, validados, implementados, y controlados. La influencia de cantidades que afecten el cumplimiento de los requisitos del proceso de medición será identificada.

El plan del proceso de medición para determinar la eficiencia de la Unidad de Generación de Vapor, será establecido de manera tal que se pueda realizar la evaluación por lo menos una vez cada dos meses. Lo anterior con la finalidad de poder determinar el funcionamiento de la Unidad y así contar con antecedentes de la misma. Puesto que para realizar la evaluación de la eficiencia se requiere de condiciones de repetibilidad se debe de establecer mediante el comportamiento diario de la Unidad presentado en las cartas de control de la misma, el mejor día para su evaluación. Así mismo, de las cartas de control se pueden determinar las condiciones bajo las cuales habrá de realizarse la evaluación.

Por ejemplo: si el comportamiento de la Unidad en un período de tres semanas ha mantenido un funcionamiento homogéneo a carga máxima de producción de vapor con variaciones mínimas entre cada día, se establecerá como día para la evaluación aquel en que se mantengan mejor las condiciones de funcionamiento, es decir aquel en que el consumo por parte de los usuarios no presente variaciones de consideración.

La validación del procedimiento de medición se realizará mediante la comparación de la eficiencia obtenida en la evaluación y la eficiencia reportada o garantizada por el fabricante. Las cartas de control son de gran utilidad para monitorear el comportamiento de la Unidad durante el período previo a la evaluación. Estas nos permiten establecer los días para el mantenimiento preventivo y de limpieza de la Unidad con la finalidad de poder mantener el funcionamiento en el nivel óptimo.

Si el consumo de combustible, la temperatura de gases de chimenea, la producción de vapor y la temperatura del vapor principalmente se encuentra fuera de sus límites de operación normal se verifica la lectura mediante las otras variables, si las otras han variado se verifica que todas mantengan la relación adecuada (esta verificación la puede realizar el fogonero de manera rápida ya que cuenta con esta capacitación), en caso de no mantener la relación el equipo de medición ha de haberse dañado lo que representa que se tiene que retirar del servicio, sustituyéndose por otro que este confirmado para realizar su función.

Previamente a la realización de la evaluación de la eficiencia de la Unidad, se deben de tener presentes las siguientes recomendaciones:

- ✓ revisar si existen fugas, en caso de existir se deben de anular
- ✓ determinar si el combustible a ser quemado es substancialmente como se quiere (es decir si se encuentra en cantidad suficiente y en condiciones)
- ✓ revisar las condiciones previamente especificadas en el estado físico del equipo, limpieza a superficies de calentamiento, características del combustible o constancia de la carga (esto se debe de haber revisado por lo menos con una semana de antelación, de acuerdo con el calendario establecido para la evaluación de la eficiencia)
- ✓ revisar que los instrumentos estén calibrados y confirmados (la información concerniente debe de haber sido previamente revisada)

Durante la prueba para la eficiencia de la Unidad se debe de considerar:

- ✓ que la prueba inicie al haberse alcanzado la estabilización de la Unidad (régimen permanente)
- ✓ que el tiempo de duración no sea menor a cuatro horas
- ✓ la frecuencia y consistencia de las lecturas. Las lecturas deberán ser tomadas a intervalos de 30 minutos (este intervalo puede ser modificado dependiendo del personal disponible, recordando que a mayor número de datos se tendrá una mejor representación del comportamiento de la Unidad)
- ✓ si las cantidades a determinar son pesadas, la frecuencia de pesado será tal que se pueda obtener un total por cada hora.

Una vez realizada la evaluación de la Unidad se debe de revisar la información obtenida, por tanto no se realizarán modificaciones o ajustes a la Unidad sino hasta

que se cuente con la evidencia de que se debe de realizar un ajuste. Por ejemplo; si la Unidad presenta un exceso de consumo de combustible superior al promedio normal, se debe de verificar primeramente mediante las cartas de control e información de los procesos que éste no se deba a un aumento en el consumo de vapor u otra circunstancia parecida, si no es así se procederá a revisar la otras variables en cuyo caso alguna o varias de las siguientes situaciones se pueden estar presentado: aumentó en la temperatura de los gases de escape; disminución en la temperatura del vapor, ambas debidas probablemente a una mala transferencia de calor (se requiere de limpieza de las zonas de transferencia de calor); combustión ineficiente, se requiere de ajuste del exceso de aire y revisión del quemador; purga excesiva (implica un desperdicio extra de combustible) etc.

El sistema preverá los errores al garantizar la pronta detección de deficiencias y acciones correctivas como se ha mencionado en los párrafos anteriores, el personal encargado de la Unidad (fogoneros y mantenimiento) al estar capacitado cuenta con herramientas que le permiten determinar si el funcionamiento de la Unidad es el adecuado y si no que es lo que debe de hacer para corregir la situación y prevenir errores mayores.

El control mínimo de procesos puede ser adecuado para mediciones simples de partes no críticas. Los procedimientos para el control de procesos pueden estar en forma genérica para tipos similares de equipos de medición y aplicaciones.

El impacto de la influencia de cantidades en el proceso de medición de la Unidad de Generación de Vapor deberá ser cuantificado. Las cantidades de influencia son consideradas en los cálculos de incertidumbre, además de estos se debe de tener presente que el instrumento puede requerir correcciones debidas a condiciones que difieran demasiado de las de calibración por ejemplo, o correcciones debidas a el valor medido y que se encuentran en el informe de calibración como sucede en los termómetros.

V.4.2.2 Realización del proceso

Las características de funcionamiento requeridas para el uso destinado del proceso de medición de la Unidad de Generación de Vapor serán identificadas y cuantificadas, y sujetas a monitoreo y/o control.

Los fogoneros tienen la capacidad para realizar los diferentes procesos de medición de la Unidad de Generación de Vapor, tal y como se ha especificado en el punto correspondiente a la asignación del personal correspondiente a recursos humanos. Por tal motivo, no se manejarán características requeridas para los fogoneros, en lo referente a equipos nuevos (equipos portátiles) que sean desconocidos por los fogoneros el área de mantenimiento se encargará de recibir la capacitación del manejo y uso del equipo, y a su vez le comunicará esta información a las áreas involucradas (entre ellas la de fogoneros), de tal forma que pueda estar actualizado todo el personal involucrado. Algunos puntos relevantes han sido definidos en la parte de características del equipo de medición.

La tabla V.8 presenta algunas consideraciones a ser tomadas en cuenta para los diferentes procesos de medición involucrados en el Sistema.

Tabla V.8 consideraciones adicionales del proceso de medición

Proceso de medición	Consideraciones
Determinación de la presión de: combustible; agua de alimentación y vapor	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Manómetro de carátula circular tipo expansión por muelle ✓ Error debido a la temperatura del instrumento es de $\pm 0,3\%$ por cada $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima o por debajo de la temperatura de referencia ✓ Uso de manómetro en baño de glicerina para evitar oscilaciones de la aguja ✓ Correcciones debidas al informe de calibración En caso de que aplique ✓ Para este caso específico se recomienda realizar el cambio del sistema de unidades a SI, es decir kPa. Se puede realizar mediante el cambio de carátula con SI y mks para facilitar la familiarización del personal ✓ Conocer las escalas de cada manómetro ✓ Evitar errores de paralaje

Tabla V.8 consideraciones adicionales del proceso de medición (continuación)

Proceso de medición	Consideraciones
Determinación de la temperatura del agua, aire y combustible	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Termómetros de líquido en vidrio ✓ Corrección debida a la columna emergente ✓ Disponer de burbuja de expansión al final del capilar ✓ Tener presente las correcciones debidas al uso del termómetro y de acuerdo con el informe de calibración ✓ Para el combustible mantener el termómetro limpio después de cada uso ✓ Familiarizarse con las escalas de cada termómetro, ya que pueden ser diferentes para cada uno ✓ Evitar errores de paralaje
Determinación de la temperatura de gases de combustión y vapor	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Termopar ✓ Corrección del cero ✓ Familiarizarse con las escalas de cada termómetro, ya que la resolución y el alcance pueden diferir
Masa de combustible y de agua	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Báscula ✓ Familiarizarse con las escalas de las básculas, ya que pueden tener diferente resolución y alcance ✓ Al realizar la lectura observar por un minuto previo al tiempo de lectura para tomar el valor para dicho tiempo y evitar errores
Análisis de gases de combustión	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Analizador portátil ✓ Conocimiento del equipo de medición y su manejo ✓ Evitar la presencia de aire infiltrado en el punto de lectura, puede ocasionar la dilución de los gases

La información presentada en las bitácoras o cartas de control debe de ser archivada, para que pueda ser empleada en la toma de decisiones y en los cambios de intervalos y por tanto en la mejora del servicio.

La especificación completa del proceso de medición incluye la identificación de todo el equipo relevante, procedimientos de medición, software de medición, condiciones de uso, habilidad del operador y todos los otros factores que afecten la confiabilidad del resultado de medición.

V.4.2.3 Equipo no conforme

Cualquier artículo del equipo de medición confirmado que se sospecha o conoce por:

- a) haber sido dañado;
- b) haber sido sobrecargado;
- c) mal funcionamiento en tal sentido que pueda invalidar su uso propuesto;
- d) produce resultados de medición incorrectos;
- e) estar más allá de su intervalo de confianza designado;
- f) haber sido maltratado;
- g) haber un daño o ruptura del sello o salvaguarda;

será removido de servicio e identificado por rotulado o marcado que sobresalga, y se generará un reporte de la no conformidad. Tal equipo no será regresado a servicio hasta que los motivos de su no conformidad hayan sido eliminados, y sea confirmado de nuevo.

Cada vez que la no conformidad del equipo de medición es reparada, ajustada o modificada, su intervalo de confirmación debe ser revisado.

La no conformidad del equipo de medición el cual no es regresado a sus características metrológicas propuestas, será claramente marcado o de otra manera identificado. La confirmación de tal equipo para otros usos garantizará que el estado alterado es claramente aparente e incluye identificación de algunas limitaciones de uso.

Degradar o cambiar el uso propuesto de un equipo es una opción, cuando es impráctico ajustar, reparar o examinar el equipo. Esta opción debe ser usada con cuidado, ya que se puede causar confusión entre los usos permisibles de piezas aparentemente idénticas del equipo.

V.4.2.4 Archivos de control del proceso de medición

La organización mantendrá archivos para demostrar acuerdo con los requerimientos del proceso de medición, incluyendo:

- a) una descripción completa del sistema de control del proceso de medición implementado, incluso todos los elementos únicos, por ejemplo, operadores, cualquier equipo de medición único o estándares de inspección usados y las condiciones relevantes de operación;
- b) los datos relevantes obtenidos del sistema de control del proceso de medición, incluyendo cualquier información relevante a la incertidumbre de medición;
- c) cualquier acción tomada como un resultado de los datos de control del proceso de medición;
- d) los datos en los cuales cada actividad de control del proceso de medición fue llevada a cabo;
- e) la identificación de cualquier verificación relevante y otros documentos;
- f) identificación de la persona responsable de proporcionar la información para los archivos;
- g) calificaciones (requeridas y archivadas) del personal.

La función metrológica garantizará que solamente personal autorizado sea el encargado de generar, corregir, emitir y borrar tales archivos.

V.4.3 Realización de la medición

V.4.3.1 Incertidumbre de medición

La incertidumbre de medición será estimada para cada proceso de medición cubierto por el sistema de control de medición (ver VI.1)

Las estimaciones de la incertidumbre serán archivadas. El análisis de incertidumbres de medición será completado antes de la confirmación del equipo de medición, y la validación del proceso de medición. Todas las fuentes conocidas de variabilidad de medición serán documentadas.

Los conceptos involucrados y los métodos que pueden ser usados en los componentes de la incertidumbre combinada para presentar los resultados están dados en

la "Guide to the expresión of uncertainty in measurement" y en otros documentos aceptados^(14, 15).

Es posible que algunos componentes de la incertidumbre puedan ser pequeños comparados con otros componentes, como para hacer su injustificable determinación detallada por motivos técnicos o económicos. En todos los casos, el esfuerzo dedicado para determinar y archivar las incertidumbres de las mediciones debe estar acorde con la importancia de las mediciones a la calidad del producto final. La comparación de las contribuciones de las fuentes de incertidumbre es de gran utilidad para poder observar los efectos de cada una de ellas al resultado final. Además estos resultados son la base para poder justificar aquellas fuentes de incertidumbre, que por su contribución son insignificantes al ser comparadas con contribuciones mayores.

V.4.3.2 Trazabilidad

La función metrológica de la gerencia garantizará que todas las mediciones son trazables a través de un laboratorio nacional de estándares al (Sistema Internacional) SI de unidades de medición, o a constantes naturales cuyos valores en términos del SI de unidades estén conocidos y recomendados por la Conferencia General de Pesos y Medidas.

Cuando la trazabilidad a través de un laboratorio nacional de estándares no esta disponible, o el SI de unidades no esta establecido, un estándar de referencia y la calibración relacionada o los métodos de comparación, los cuales son claramente especificados y están de acuerdo mutuamente por todas las partes concernientes, será aplicado.

Los archivos de trazabilidad de los resultados de medición serán mantenidos mientras que se requiera por los procedimientos del sistema, el cliente, o por requisitos regulatorios o estatutorios.

La trazabilidad de cada una de las mediciones involucradas en el Sistema de Control de Mediciones, se ha desarrollado como un capítulo independiente en este trabajo, en el cual se presentan las cadenas de trazabilidad de acuerdo con la estructura establecida en la figura V.3 presentada a continuación.

Figura V.3 Estructura de la cadena de trazabilidad

V.5. Análisis y mejora del sistema de control de medición

V.5.1 Auditoría del sistema de control de medición

La organización llevará a cabo, o arreglará para ser llevadas a cabo, auditorías planeadas del sistema de control de medición para garantizar su instrumentación y acuerdo con los requisitos. Las auditorías serán conducidas por otras personas que aquellas quienes representan la actividad a ser auditada, y los resultados de la auditoría serán reportados a la gerencia de la organización.

Los planes y procedimientos para la auditoría del sistema de control de medición serán documentados. Basada en los resultados de las auditorías y de otros factores relevantes, tales como retroalimentaciones de los clientes, la organización revisará y modificará el sistema como sea necesario para mejorar. Los resultados de todas las auditorías del sistema de control de medición, y todas las acciones correctivas serán archivados. La organización garantizará que las acciones estén tomadas sin retrasos excesivos para eliminar las no conformidades detectadas y sus causas.

La realización de las auditorías del Sistema de Control de Mediciones podrá ser llevada de acuerdo con el plan establecido por la entidad responsable, en el punto V.2.4 de este Sistema, se empleará la norma ISO 19011 o su equivalente en normas mexicanas⁽¹⁶⁾

Para poder obtener los resultados de la auditoría se emplea la lista de verificación, mediante la cual se establecen los puntos a verificar y a partir de ello su cumplimiento, los hallazgos de la auditoría son asentados en las actas correspondientes para que posteriormente puedan ser tomadas las acciones correctivas que sean pertinentes. Los resultados de las auditorías realizadas servirán para poder proceder a la mejora continua del sistema. La toma de decisiones deberá de estar basada en las evidencias encontradas al auditar el sistema.

V.5.2 Monitoreo del proceso de medición

El proceso de medición controlado para la Unidad de Generación de Vapor será monitoreado de acuerdo con los procedimientos documentados y a intervalos establecidos. La prevención de desviaciones a partir de los requisitos garantizará la detección inmediata de deficiencias y las acciones oportunas para su corrección.

La avería del sistema de control de medición, puede ser revelado por procesos post indicadores tales como:

- análisis de cartas de control;
- análisis de cartas de tendencia;
- auditorías internas;
- retroalimentación de los usuarios del servicio.

V.5.2.1 Análisis del proceso de medición

Para cada proceso de medición que este sujeto a control, los elementos del proceso para el análisis serán identificados y limitados para los elementos establecidos. La selección de elementos y límites estarán acorde con el riesgo de falla para cumplir con los requisitos especificados. Estos elementos pueden incluir los efectos de operadores, equipo, condiciones ambientales, influencia de cantidades, método de aplicación, etc.

La inspección con cartas de control es uno de los métodos usados para monitorear el proceso de medición. Para el Sistema se podrán llevar cartas de control de las variables de mayor importancia como son: consumos de combustible; producción de vapor; demandas de vapor; temperatura de gases de chimenea; composición de gases de chimenea; purga intermitente y continua de la unidad; temperatura y presión del vapor.

VI. INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNIDADES DE GENERACIÓN DE VAPOR (MÉTODO DE ENTRADAS Y SALIDAS)

VI.1 Principio de medición y mensurando

La evaluación de la eficiencia en Unidades de Generación de Vapor consiste en determinar la cantidad de calor aprovechado respecto al calor suministrado. El Código ASME PTC 4⁽¹⁾ presenta los métodos de entradas y salidas y de pérdidas. Para realizar el cálculo de la incertidumbre en este trabajo se emplea el método de entradas y salidas.

El modelo físico está representado por la ecuación de la eficiencia:

$$\eta_g = \frac{\text{Salida}}{\text{entrada}}$$

Donde

Salida: es el calor transferido hacia el fluido de trabajo (vapor)

Entrada: es el calor químico en el combustible más los créditos de calor adicionados al fluido de trabajo, aire, gas y otros circuitos que atraviesan el límite de la envoltura.

La ecuación que aparece en el Código ASME para la evaluación de la eficiencia o rendimiento de la Unidad es la presentada a continuación, en esta se mantiene la nomenclatura original y se modifican solamente las unidades para manejarla en las Unidades del Sistema Internacional (SI), y es utilizada como el modelo matemático:

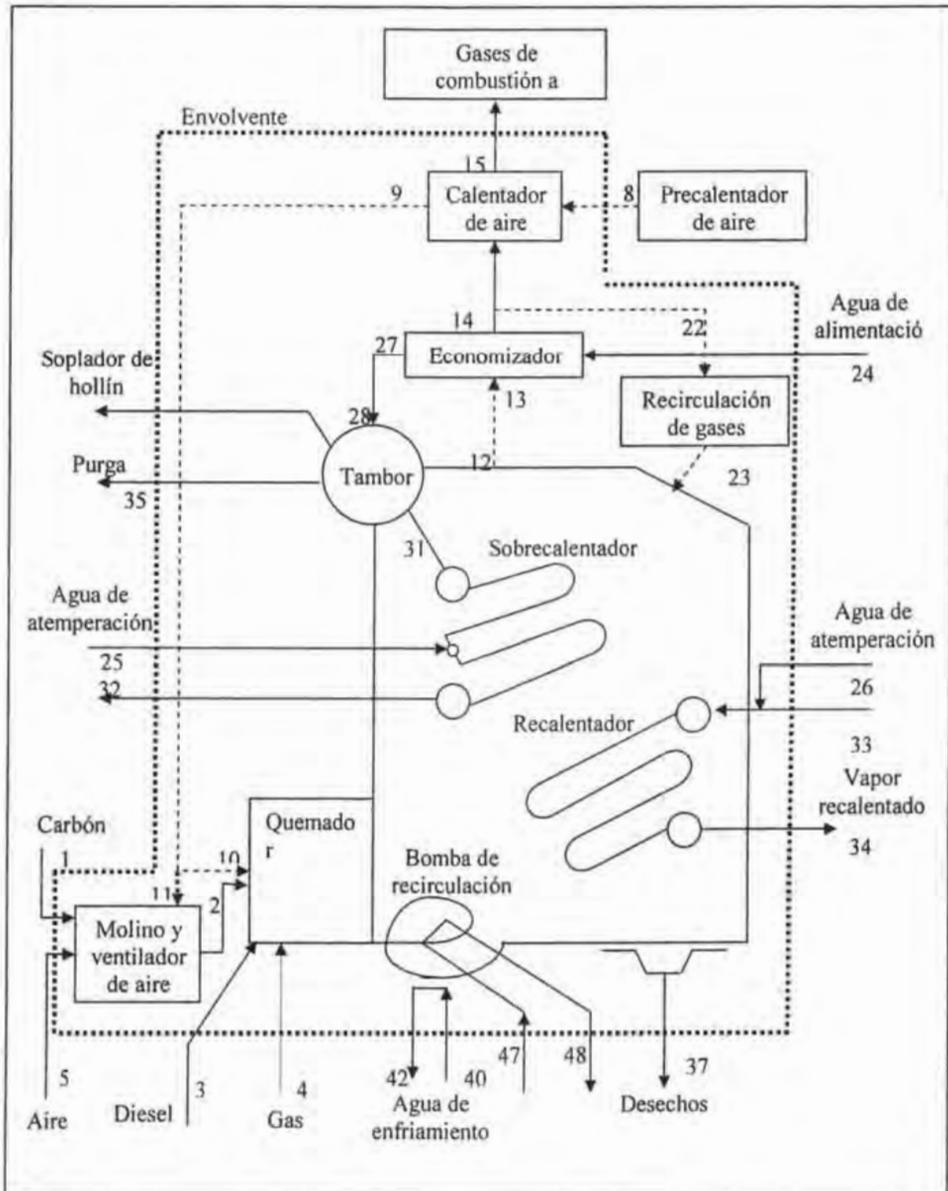
$$\eta_g = \left\{ \frac{W_{w31} * (h_{s32} - h_{w24}) + W_{w25} * (h_{s32} - h_{w25}) + W_{w33} * (h_{s34} - h_{s33}) + W_{w26} * (h_{s34} - h_{w26}) + W_{w35} * (h_{w35} - h_{w24})}{H_f * W_{fc} + B_e} \right\} * 100$$

η_g = Por ciento de eficiencia = Eficiencia gruesa

Los números a que se hace referencia en la ecuación anterior corresponden a la ubicación del o de los puntos en que se puede medir la variable en cuestión, y aparecen en el diagrama de la Unidad de Generación de Vapor, el cual se presenta en la Figura VI.1 (Diagrama de la Unidad de Generación de Vapor).

Dependiendo de las características de la unidad, a esta ecuación se le puede incrementar o disminuir el número de términos.

Figura VI. 1 Diagrama de la Unidad de Generación de Vapor.



VI.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre

W_{se31} = *kg de vapor / s* = flujo de vapor entrando al sobrecalentador

W_{se33} = *kg de vapor / s* = flujo de vapor en el recalentador

W_{we25} = *kg de agua / s* = flujo de agua rociada al sobrecalentador

W_{we26} = *kg de agua / s* = flujo de agua rociada al recalentador

W_{we35} = *kg de agua / s* = flujo de purga

$h_{s32}, h_{s33}, h_{s34}, h_{s35}$ = *kJ / kg de vapor* = Entalpía de vapor a la salida del sobrecalentador, entrada del recalentador y salida del recalentador respectivamente

$h_{w24}, h_{w25}, h_{w26}, h_{w35}$ = *kJ / kg de agua* = Entalpía del agua de alimentación entrante a la unidad, entalpía del agua rociada al sobrecalentador, entalpía del agua rociada, entalpía de purga.

H_f = *kJ / kg de combustible quemado* = Valor calorífico de combustible a ser obtenido por análisis de laboratorio y ajustado a una base "quemada" a partir de la determinación de humedad del laboratorio en el combustible

W_{fe} = *kg de combustible quemado / s* = velocidad de flujo medido

B_e = *kJ / s* = Calor total de los créditos, es definido como aquellas cantidades de calor adicionados a la envoltura del generador de vapor de otra manera al calor químico en el combustible "quemado".

La Unidad de Generación de Vapor seleccionada para la evaluación de la eficiencia y de la incertidumbre es del tipo de tubos de humo, y maneja vapor saturado a la presión de operación. Antes de iniciar la evaluación deberá de alcanzarse el régimen permanente en la Unidad, de tal forma que las mediciones realizadas sean representativas de las condiciones bajo las cuales se ha realizado el estudio. El tiempo mínimo por corrida es de cuatro horas.

Esta Unidad solo cuenta con un suministro de agua de alimentación y una única salida de vapor, por lo que el modelo matemático se reduce considerablemente. Aunado a lo anterior, durante la evaluación de la Unidad se mantiene cerrada la válvula de purga, con lo que se elimina un término más quedando solamente:

$$\eta_{st} = \frac{W_{se} * (h_s - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 = \frac{W_{we} (h_w - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100$$

Donde:

W_{se} = *kg de vapor / s* = flujo de vapor saliendo de la unidad

W_{we} = kg de agua / s = flujo de agua entrando a la unidad

h_s = kJ /kg de vapor = Entalpía de vapor a la salida de la unidad

h_w = kJ /kg de agua = Entalpía del agua de alimentación entrante a la unidad

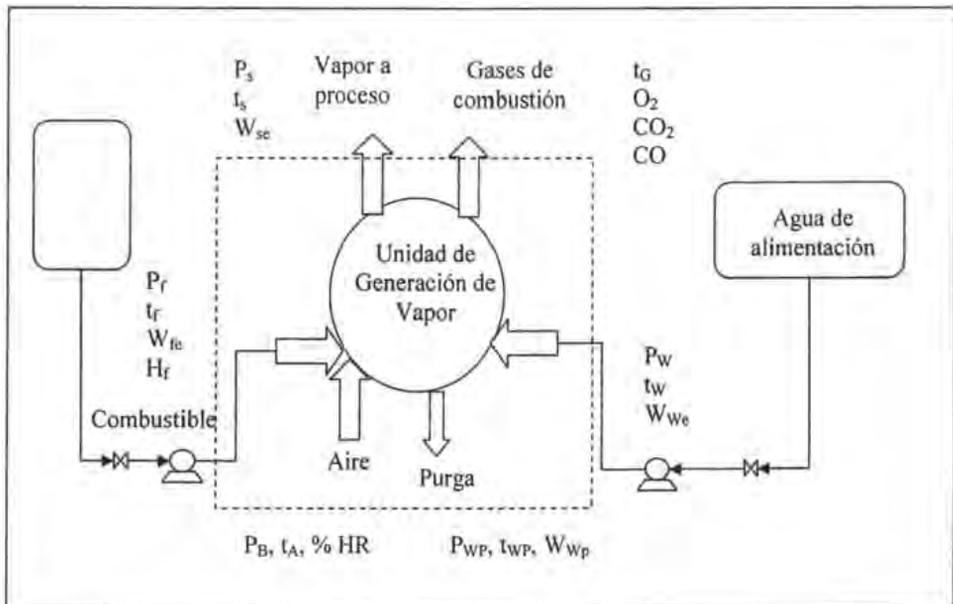
H_r = kJ/ kg de combustible quemado = Valor calorífico de combustible a ser obtenido por análisis de laboratorio y ajustado a una base "quemada" a partir de la determinación de humedad del laboratorio en el combustible

W_{fe} = kg de combustible quemado / s = velocidad de flujo medido

B_e = kJ / s = Calor total de los créditos, es definido como aquellas cantidades de calor adicionados a la envoltura del generador de vapor de otra manera al calor químico en el combustible "quemado".

La figura VI.2 muestra la ubicación de las diferentes variables involucradas en esta unidad, como se puede observar se omiten los números en la identificación, ya que por su sencillez no son requeridos al presentarse únicamente entradas y salidas simples.

Figura VI. 1 Diagrama simplificado de la Unidad de Generación de Vapor.



1) El flujo de vapor (W_{se}) se puede obtener por medio del balance de materia, previo conocimiento del flujo de agua de alimentación (W_{we}), el cual se determina mediante el pesado del tanque de agua de alimentación (mediante báscula calibrada) y

el intervalo de tiempo transcurrido. Para la toma de tiempo se utiliza un cronómetro calibrado. Las fuentes de incertidumbre involucradas en la medición son:

- a. Calibración de la báscula y el cronómetro
- b. Repetibilidad de las mediciones
- c. Resolución de la balanza y cronómetro

2) Entalpía del vapor (H_v), se determina para este caso específico (por ser vapor saturado) mediante la presión (P_s) registrada en el domo de la Unidad o en el cabezal de vapor a la salida de la misma, a la cual se suma la presión barométrica (P_b) para obtener la presión absoluta, y con este valor se emplean las tablas de vapor. Las fuentes de incertidumbre involucradas en la obtención de la entalpía son:

- a. Repetibilidad de las mediciones
- b. Resolución del manómetro empleado en la medición de la presión
- c. Calibración del manómetro
- d. Temperatura de las mediciones (influencia al equipo de medición)

3) Entalpía del agua de alimentación (h_w), se determina mediante la presión del agua (P_w) de alimentación tomada a la descarga de la bomba y la temperatura de la misma (t_w). Al igual que para el vapor se utilizan las tablas de vapor. Las fuentes de incertidumbre involucradas en la determinación de la entalpía son:

- a. Repetibilidad de las mediciones
- b. Resolución de los instrumentos de medición (manómetro y termómetro)
- c. Calibración de los instrumentos
- d. Temperatura de las mediciones (corrección debida a este valor, si es requerida)

4) Valor calorífico del combustible (H_f), se obtiene del análisis de laboratorio proporcionado por el proveedor, la incertidumbre del análisis y las condiciones a las que se realizó la determinación se incluyen en el documento

5) Medición del flujo másico del combustible (W_{fe}). Se realiza por pesado del tanque de almacenamiento de combustible (con báscula calibrada) y la medición del tiempo transcurrido para cada lectura (la toma de tiempo se realiza con un cronómetro calibrado). Las fuentes de incertidumbres involucradas en esta medición son:

- a. Calibración de la báscula y cronómetro
- b. Repetibilidad de las mediciones
- c. Resolución de la balanza y cronómetro

6) Las mediciones de los créditos involucrados en la Unidad se presentan al final de este capítulo en un anexo especial en el que se incluyen las incertidumbres correspondientes a cada uno de ellos

Para realizar la medición correctamente se deben de tener bien establecidas las condiciones bajo las cuales se realiza la operación de la Unidad, y el tiempo cero de la corrida es el momento en que se alcancen las condiciones del régimen permanente, previo acuerdo de las partes involucradas.

VI.3 Cuantificación y reducción

1) Flujo de agua o vapor: $W_{se} = m/t$ y $U_{se} = f(U_{cronómetro}, U_{Báscula})$

a. Calibración de la báscula y el cronómetro. Los informes de calibración permiten asegurar la trazabilidad de los instrumentos, así como, el conocimiento de la incertidumbre correspondiente a cada uno de ellos. En este informe o certificado, según sea el caso, se establece el factor de cobertura utilizado.

b. Repetibilidad de las mediciones. Se llevan a cabo las mediciones de flujo de agua de alimentación en dos lecturas cada hora y durante el período de tiempo establecido para la prueba (4 horas mínimo). Puesto que la medición se realiza de manera continua y esta no se puede repetir ya que a cada instante hay variación en el peso de agua, para obtener el flujo promedio se debe establecer el tiempo de toma de lectura del peso. A partir de este dato se puede obtener una diferencia entre el valor inicial y el valor final, dado entre dos lecturas sucesivas, lo cual permite que se obtengan varias lecturas. Los valores obtenidos para el flujo medido son promediados y de éstos se obtiene la varianza, posteriormente se obtiene la desviación estándar de la media la cual es equivalente a la incertidumbre tipo A.

c. Resolución de la báscula y cronómetro. A partir de la resolución de cada uno de estos instrumentos se puede calcular la incertidumbre estándar, considerando una distribución rectangular para cada uno de ellos.

2) Entalpía del vapor: $H_s = f(P_s)$ y $U_{P_s} = f(U_{tipoA}, U_{cal.}, U_{res.})$

a. Repetibilidad de las mediciones. Las mediciones realizadas de la variable de presión durante el tiempo de duración de la prueba, son utilizadas para obtener un promedio, la varianza y finalmente la desviación estándar de la media de las mediciones (con el valor de varianza se podría obtener el intervalo de la entalpía)

- b. La resolución del manómetro permite conocer la incertidumbre estándar para lo cual se considera que la distribución es de tipo rectangular
- c. El informe de calibración del manómetro garantiza la trazabilidad de las mediciones, así como los valores de incertidumbre de nuestro equipo de medición.
- d. Temperatura de las mediciones. En caso de que el equipo de medición requiera de la corrección debida a temperaturas diferentes a las estipuladas por el fabricante
- 3) Entalpía del agua de alimentación: $h_w = f(t_w, P_w)$; $U_{t_w} = f(U_{\text{lipoA}}, U_{\text{I cal.}}, U_{\text{res.}})$ y $U_{P_w} = f(U_{\text{lipoA}}, U_{\text{I cal.}}, U_{\text{res.}})$
- a. Repetibilidad de las mediciones. Las mediciones realizadas de la presión y temperatura durante el tiempo de duración de la prueba, son utilizadas para obtener un promedio, la varianza y finalmente la desviación estándar de la media de las mediciones (con el valor de varianza se podría obtener el intervalo de la entalpía)
- b. La resolución del manómetro y termómetro nos permite conocer la incertidumbre estándar para lo cual se considera que la distribución es de tipo rectangular
- c. El informe de calibración del manómetro y del termómetro. Garantiza la trazabilidad de las mediciones, así como los valores de incertidumbre de nuestros equipos de medición.
- d. Temperatura de las mediciones. En caso de que los equipos de medición requieran de la corrección debida a temperaturas diferentes a las estipuladas por el fabricante de los equipos
- 4) Valor calorífico del combustible (H_f). Depende de la información asentada en el informe otorgado por el proveedor del combustible, o si no se cuenta con esta información se debe de solicitar a un laboratorio externo, que cuente con la capacidad de realizar dicha medición, la determinación de este parámetro y de la composición del combustible.
- 5) Medición del flujo de combustible: $W_{fe} = m/t$ y $U_{W_{fe}} = f(U_{\text{cronómetro}}, U_{\text{Balanza}})$
- a. Calibración de la báscula y el cronómetro. Los informes de calibración permiten asegurar la trazabilidad de los instrumentos, así como, el conocimiento de la incertidumbre correspondiente a cada uno de ellos. En este informe o certificado, según sea el caso, se establece el factor de cobertura utilizado.

b. Repetibilidad de las mediciones. Se llevan a cabo las mediciones de flujo de combustible en dos lecturas por hora y durante el período de tiempo establecido para la prueba (4 horas mínimo). Puesto que la medición se realiza de manera continua y esta no se puede repetir ya que a cada instante hay variación en el peso de combustible, para obtener el flujo promedio se debe establecer el tiempo de toma de lectura del peso. A partir de este dato se puede obtener una diferencia entre el valor inicial y el valor final, dado entre dos lecturas sucesivas, lo cual permite que se obtengan varias lecturas. Los valores obtenidos para el flujo medido son promediados y de éstos se obtiene la varianza, posteriormente se obtiene la desviación estándar de la media la cual es equivalente a la incertidumbre tipo A.

c. Resolución de la báscula y cronómetro. A partir de la resolución de cada uno de estos instrumentos se puede calcular la incertidumbre estándar considerando una distribución rectangular para cada uno de ellos.

6) La medición de los créditos, así como, las fuentes de incertidumbre involucradas en la medición de ellos se encuentran al final del capítulo.

VI.4 Combinación

La incertidumbre combinada de la eficiencia estará dada a partir de cada uno de los componentes de la ecuación, expresados como coeficientes de sensibilidad:

$$\eta_g = \frac{W_{sc} * (h_x - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 = \frac{W_{sc} (h_x - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100$$

Las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad quedaran como sigue:

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{sc}} = \frac{(h_x - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 \quad \frac{\partial \eta_g}{\partial H_f} = \left\{ \frac{W_{sc} * (h_x - h_w) * (-1) * (W_{fe})}{(H_f * W_{fe} + B_e)^2} * 100 \right\}$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial h_x} = \frac{W_{sc}}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 \quad \frac{\partial \eta_g}{\partial W_{fe}} = \left\{ \frac{W_{sc} * (h_x - h_w) * (-1) * (H_f)}{(H_f * W_{fe} + B_e)^2} * 100 \right\}$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial h_w} = -\frac{W_{sc}}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 \quad \frac{\partial \eta_g}{\partial B_e} = \left\{ \frac{W_{sc} * (h_x - h_w) * (-1) * (1)}{(H_f * W_{fe} + B_e)^2} * 100 \right\}$$

Y la incertidumbre combinada quedará de la siguiente manera:

$$U_{\eta_g}^2 = \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{xe}}\right)^2 U_{W_{xe}}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial h_x}\right)^2 U_{h_x}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial h_w}\right)^2 U_{h_w}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial H_f}\right)^2 U_{H_f}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{fe}}\right)^2 U_{W_{fe}}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial B_e}\right)^2 U_{B_e}^2$$

VI.5 Cálculo de los créditos

Los créditos de calor son analizados a continuación y son usados como el valor de B_e y de su incertidumbre en la ecuación para el cálculo de la eficiencia por el método de entradas y salidas. Puesto que son varios términos los involucrados, se considera cada uno de manera independiente. Los términos involucrados son los que aparecen a continuación:

$$B_e = B_{Ae} + B_{ze} + B_{fe} + B_{xe} + B_{mAe}$$

$B_e = kJ/s$ = Calor total de los créditos y es definido como aquellas cantidades de calor adicionados a la envoltura del generador de vapor de otra manera al calor químico en el combustible "quemado".

$B_{Ae} = kJ/s$ = Calor suministrado por el aire entrante a partir de fuentes tales como calentadores de aire de vapor.

$B_{ze} = kJ/s$ = Calor suministrado por vapor de atomización cuando la fuente es externa a la unidad a ser probada.

$$B_{fe} = kJ/s = \text{Calor proporcionado por el calor sensible en el combustible.}$$

$B_{xe} = kJ/s$ = Calor suministrado por accionamientos auxiliares dentro de la envoltura.

$$B_{mAe} = kJ/s = \text{Calor proporcionado desde la humedad en el aire de entrada}$$

Estos términos se simplifican para el caso de estudio, ya que la Unidad no cuenta con vapor de atomización quedando solo los cuatro términos restantes.

$$B_e = B_{Ae} + B_{fe} + B_{xe} + B_{mAe}$$

VI.5.1 B_{Ae} Calor suministrado por el aire entrante

VI.5.1.1 Principio de medición y mensurando

El principio de medición se basa en determinar la cantidad de calor que se introduce a la Unidad mediante el flujo de aire que se alimenta para la combustión.

$$B_{Ac} = (W_{A'} - W_{A'S}) * W_{je} * cp_{A'} * (t_{A7,AB} - t_{RA}) + W_{A'S} * W_{je} * cp_{A'} * (t_{A'S} - t_{RA})$$

La ecuación presenta la forma que aparece en el código ASME citado en la bibliografía⁽¹¹⁾, pero esta se puede reducir dependiendo de las características de la Unidad estudiada.

VI.5.1.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre

Nota: Los términos que aparecen precedidos de un número son medidos durante el tiempo de la evaluación, mientras que los que se encuentran sin éste se han obtenido mediante cálculos o a partir de otras mediciones. En los casos que incluyen la composición del combustible se encuentran todos los componentes empleados precedidos por el mismo número.

$W_{A'}$ = kg / kg de combustible quemado = kg de aire seco por kilogramos de combustible quemado (valor calculado mediante ecuaciones de balance de materia para la combustión y mediciones de la composición de los gases de chimenea)

1) W_{je} = kg de combustible quemado / s = Velocidad de flujo determinado por procedimientos de pesado (con balanza calibrada) y la medición del tiempo transcurrido para cada lectura (se realiza con un cronómetro calibrado). Las fuentes de incertidumbre involucradas en esta medición son iguales a las establecidas en el punto VI.2.

$cp_{A'}$ = Calor específico promedio a la temperatura de entrada. Es determinado a partir de los valores instantáneos por encima del intervalo entre la temperatura del aire de entrada y la temperatura de referencia.

2) t_{A7} o t_{AB} = °C = Temperatura del aire de entrada. Si la unidad está equipada con un serpentín de agua o vapor de calentamiento de aire antes del calentador principal de aire y se abastece con calor de una fuente externa a la Unidad a ser probada, la temperatura del aire de entrada t_{AB} será medida en la corriente de aire después de este calentador y en este caso el calor adicionado al aire de entrada es un crédito de calor. Si el serpentín o el aire caliente recirculado se está suministrando por calor directo de la unidad a ser probada, la temperatura del aire de entrada t_{A7} será medida en la corriente de aire delante de el calentador y no hay crédito de calor. La temperatura puede ser determinada por un termómetro de líquido en vidrio calibrado, las fuentes de incertidumbre involucradas son:

- a. Resolución del termómetro utilizado

- b. Calibración del termómetro
- c. Repetibilidad de las mediciones

$t_{RA} = ^\circ C$ = Temperatura de referencia del aire. Esta es la temperatura base para que las pérdidas de calor sensible y los créditos sean comparados para cálculos de eficiencia. Cuando el calor es adicionado al aire de combustión antes del tiro forzado del ventilador, deben ser hechas correcciones para la temperatura medida en la ubicación 7.

Determinación de $W_{A'}$ mediante:

$$W_{A'} = \frac{W_{G'N_2} - N}{0,7685}$$

Donde:

$W_{G'N_2}$ = kg de nitrógeno en el gas seco / kg de combustible quemado = (kg de gas seco / kg de combustible quemado) * (kg de nitrógeno en el gas seco/kg de gas seco)

3) N = kg / kg de combustible quemado = kg de nitrógeno por kg de combustible quemado. Determinado por análisis del combustible

$$W_{G'N_2} = \frac{W_G * 28,0134 * N_2}{44,0095 * CO_2 + 31,9988 * O_2 + 28,0134 * N_2 + 28,0101 * CO}$$

W_G = kg / kg de combustible quemado = kilogramos de gas seco por kilogramos de combustible "quemado"

$$W_G = \frac{44,0095 * CO_2 + 31,9988 * O_2 + 28,0134 * N_2 + 28,0101 * CO}{12,0107(CO_2 + CO)} \left(Cb + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

Sustituyendo W_G en $W_{G'N_2}$ queda finalmente como:

$$W_{G'N_2} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)} \left(Cb + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

Donde:

4) CO_2 , O_2 y CO = Por ciento por volumen de flujo de gas seco. El N_2 se determina por sustraer el total del CO_2 , O_2 y CO de 100 %. Este análisis se determina mediante el equipo portátil de medición de gases de chimenea (celdas electroquímicas) y las fuentes de incertidumbre involucradas son:

- a. Calibración del equipo de medición

- b. Resolución del equipo
- c. Repetibilidad de las mediciones.

3) $S = \text{kg} / \text{kg de combustible quemado}$ = kilogramos de azufre por kilogramo de combustible quemado determinado por el análisis de laboratorio del combustible

El valor de C_b se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$C_b = C - \frac{W_{d'p'} * H_{d'p'}}{33704}$$

Donde

$C_b = \text{kg} / \text{kg de combustible quemado}$ = kilogramos de carbón quemado por kilogramo de combustible quemado.

3) $C = \text{kg} / \text{kg de combustible quemado}$ = kilogramos de carbón en el combustible quemado por análisis de laboratorio. Determinado por análisis del combustible.

3) $W_{d'p'} = \text{kg} / \text{kg de combustible quemado}$ = kilogramos de desecho total seco por kilogramo de combustible quemado. Determinado por análisis del combustible. Si en el análisis del combustible no se presenta desperdicio o desecho este cálculo no es requerido y queda solamente $C_b = C$.

3) $H_{d'p'} = \text{KJ} / \text{kg de desecho seco}$ = Valor calorífico para el desecho total seco a partir de la determinación de laboratorio. Determinado por análisis del combustible.

$33\ 704 = \text{KJ} / \text{kg}$ = Valor calorífico de una kilogramo de carbón como ocurre en el desecho.

VI.5.1.3 Cuantificación y reducción

1) Flujo de combustible quemado

Las fuentes de incertidumbre se establecieron en el punto VI.2 e incluyen: Calibración de la balanza y el cronómetro; Repetibilidad de las mediciones; y Resolución de la balanza y cronómetro

2) Temperatura del aire

- a. Resolución del termómetro utilizado. A partir de la resolución del termómetro se puede calcular la incertidumbre estándar considerando una distribución rectangular.

-
- b. Calibración del termómetro. Los informes de calibración nos permiten asegurar la trazabilidad de los instrumentos y por tanto las mediciones, así como, el conocimiento de la incertidumbre correspondiente. En el informe o certificado, se establece el factor de cobertura utilizado y cualquier corrección requerida.
 - c. Repetibilidad de las mediciones. Se llevan a cabo las mediciones de temperatura, seis lecturas cada hora y durante el periodo de tiempo establecido para la prueba (4 horas mínimo). Si durante la evaluación no se presentan variaciones de consideración se pueden tomar dos lecturas por hora. Los valores obtenidos de las lecturas de temperatura son promediados y de éstos se obtiene la varianza, posteriormente se obtiene la desviación estándar de la media la cual es equivalente a la incertidumbre tipo A.
- 3) Análisis del laboratorio para la composición del combustible. Depende la información otorgada en el informe proporcionado por el proveedor
- 4) Análisis de gases de combustión
- a. Calibración del equipo de celdas electroquímicas. Garantiza la trazabilidad de las mediciones (mediante gases certificados para tal propósito), así como, los valores de incertidumbre y factor de cobertura con el que se reporta dicha incertidumbre.
 - b. Resolución del equipo. Se considera que es del tipo de distribución es rectangular, y se emplea en el cálculo de la incertidumbre del equipo (equipo digital).
 - c. Repetibilidad de las mediciones. Es importante que se realice una medición por hora, por lo menos, para poder corroborar el comportamiento de la Unidad y verificar que se realiza en régimen estacionario y en caso contrario poder corregir para volver a empezar la prueba. Los resultados de las mediciones se promedian y se obtiene la varianza. Posteriormente se obtiene la desviación estándar de la media o incertidumbre tipo A de las mediciones.

VI.5.1.4 Combinación

La incertidumbre combinada para el crédito por aire está dada a partir de cada uno de los componentes de la ecuación principal y de las ecuaciones auxiliares. Expresados como coeficientes de sensibilidad.

$$B_{Ae} = (W_{A'} - W_{A'S}) * W_{fe} * cp_{A'} * (t_{A7,AB} - t_{RA}) + W_{A'S} * W_{fe} * cp_{A'} * (t_{A'S} - t_{RA})$$

Puesto que para el caso de estudio, el equipo no cuenta con un sistema de calentamiento de aire previo a su entrada a la Unidad, la ecuación se reduce y queda como sigue:

$$B_{Ae} = W_{A'} * W_{fe} * cp_{A'} * (t_{A7,AB} - t_{RA})$$

Las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad correspondientes serán los siguientes:

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{A'}} = W_{fe} * cp_{A'} * (t_{A7,AB} - t_{RA})$$

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial cp_{A'}} = W_{A'} * W_{fe} * (t_{A7,AB} - t_{RA})$$

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{fe}} = W_{A'} * cp_{A'} * (t_{A7,AB} - t_{RA})$$

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial t_{A7,AB}} = W_{A'} * W_{fe} * cp_{A'}$$

Y finalmente la incertidumbre combinada queda como sigue:

$$U_{B_{Ae}}^2 = \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{A'}} \right)^2 U_{W_{A'}}^2 + \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{fe}} \right)^2 U_{W_{fe}}^2 + \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial cp_{A'}} \right)^2 U_{cp_{A'}}^2 + \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial t_{A7,AB}} \right)^2 U_{t_{A7,AB}}^2$$

Igualmente se tienen que utilizar las otras ecuaciones para poder obtener las incertidumbres correspondientes y emplearlas en la incertidumbre combinada.

Para $W_{A'}$ tenemos:

$$W_{A'} = \frac{W_{G'N2} - N}{0,7685}$$

$$\frac{\partial W_{A'}}{\partial W_{G'N2}} = \frac{1}{0,7685}$$

Sus coeficientes de sensibilidad son:

$$\frac{\partial W_{A'}}{\partial N} = \frac{1}{0,7685}$$

La incertidumbre combinada para W_A es:

$$U_{W_A}^2 = \left(\frac{\partial W_A}{\partial W_{GN2}} \right)^2 U_{W_{GN2}}^2 + \left(\frac{\partial W_A}{\partial N} \right)^2 U_{W_A}^2$$

Para W_{GN2} tenemos:

$$W_{GN2} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)} \left(Cb + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

Las derivadas parciales quedan como:

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial N_2} = \frac{28,0134}{12,0107(CO_2 + CO)} * \left(Cb + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO_2} = (-1) \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)^2} * \left(Cb + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO} = (-1) \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)^2} * \left(Cb + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial C_b} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)}$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial S} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)} * \left(\frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

La incertidumbre combinada para W_{GN2} es:

$$U_{W_{GN2}}^2 = \left(\frac{\partial W_{GN2}}{\partial N_2} \right)^2 U_{N_2}^2 + \left(\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO_2} \right)^2 U_{CO_2}^2 + \left(\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO} \right)^2 U_{CO}^2 + \\ + \left(\frac{\partial W_{GN2}}{\partial C_b} \right)^2 U_{C_b}^2 + \left(\frac{\partial W_{GN2}}{\partial S} \right)^2 U_S^2$$

Para C_b tenemos:

$$C_b = C - \frac{W_{d'p'} * H_{d'p'}}{33704}$$

Sus coeficientes de sensibilidad son los siguientes:

$$\frac{\partial C_b}{\partial C} = 1$$

$$\frac{\partial C_b}{\partial W_{d'p'}} = -\frac{H_{d'p'}}{33704}$$

$$\frac{\partial C_b}{\partial H_{d'p'}} = -1 \frac{W_{d'p'}}{33704}$$

La incertidumbre combinada para C_b es:

$$U_{C_b}^2 = \left(\frac{\partial C_b}{\partial C}\right)^2 U_C^2 + \left(\frac{\partial C_b}{\partial W_{d'p'}}\right)^2 U_{W_{d'p'}}^2 + \left(\frac{\partial C_b}{\partial H_{d'p'}}\right)^2 U_{H_{d'p'}}^2$$

VI.5.2 B_{fe} Calor suministrado por el calor sensible en el combustible

VI.5.2.1 Principio de medición y mensurando

El principio de medición se basa en determinar la cantidad de calor que se introduce a la Unidad mediante el flujo de combustible que se alimenta para la combustión.

$$B_{fe} = W_{fe} * c_{p_f} * (t_{f1,3,4} - t_{RA})$$

VI.5.2.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre

Donde

1) $W_{fe} = \text{kg de combustible quemado} / \text{s} = \text{Velocidad de flujo de combustible}$, determinado por procedimiento de pesado (con balanza calibrada) y la medición de tiempo tomada con un cronometro calibrado como se estableció en el cálculo del crédito de B_{Ae} .

$c_{p_f} = \text{KJ} / (\text{kg } ^\circ\text{C}) = \text{Calor específico promedio del combustible}$. Se determina de los valores instantáneos. Si el combustible líquido es calentado por una fuente externa a la unidad a ser probada, la temperatura de entrada será medida después de este calentador, pero si es calentado directamente desde la unidad a ser probada la temperatura será medida antes del calentador.

2) $t_{f1}, t_{f3}, t_{f4} = ^\circ\text{C} = \text{Temperatura de entrada del combustible}$. La temperatura puede ser determinada por un termómetro de líquido en vidrio calibrado, las fuentes de incertidumbre involucradas son:

- a. Resolución del termómetro utilizado
- b. Calibración del termómetro
- c. Repetibilidad de las mediciones

t_{RA} = Temperatura de referencia del aire

VI.5.2.3 Cuantificación y reducción

1) Flujo de combustible quemado. Calculado previamente en el cálculo del crédito B_{Ab} .

2) Temperatura de entrada del combustible

a. Resolución del termómetro utilizado. A partir de la resolución del termómetro se puede calcular la incertidumbre estándar considerando una distribución rectangular.

b. Calibración del termómetro. Los informes de calibraciones permiten asegurar la trazabilidad de los instrumentos y por tanto las mediciones, así como, el conocimiento de la incertidumbre correspondiente. En el informe o certificado, se establece el factor de cobertura utilizado y cualquier corrección requerida.

c. Repetibilidad de las mediciones. Se llevan a cabo las mediciones de temperatura, seis lecturas cada hora y durante el periodo de tiempo establecido para la prueba (4 horas mínimo). Los valores obtenidos de las lecturas de temperatura son promediados y de éstos se obtiene la varianza, posteriormente se obtiene la desviación estándar de la media la cual es equivalente a la incertidumbre tipo A

VI.5.2.4 Combinación

La incertidumbre combinada para el crédito por combustible está dada a partir de cada uno de los componentes de la ecuación principal y de las ecuaciones auxiliares (cp_i). Expresados como coeficientes de sensibilidad.

$$B_{fe} = W_{fe} * cp_f * (t_{f1,3,4} - t_{RA})$$

Las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad se calculan como sigue:

$$\frac{\partial B_{fe}}{\partial W_{fe}} = c p_f * (t_{f1,3,4} - t_{RA})$$

$$\frac{\partial B_{fe}}{\partial c p_f} = W_{fe} * (t_{f1,3,4} - t_{RA})$$

$$\frac{\partial B_{fe}}{\partial t_{f1,3,4}} = W_{fe} * c p_f$$

Finalmente la incertidumbre combinada queda como sigue:

$$U_{B_{fe}}^2 = \left(\frac{\partial B_{fe}}{\partial W_{fe}} \right)^2 U_{W_{fe}}^2 + \left(\frac{\partial B_{fe}}{\partial c p_f} \right)^2 U_{c p_f}^2 + \left(\frac{\partial B_{fe}}{\partial t_{f1,3,4}} \right)^2 U_{t_{f1,3,4}}^2$$

VI.5.3 B_{mAe} Calor suministrado desde la humedad en el aire de entrada

VI.5.3.1 Principio de medición y mensurando

El principio de medición se basa en determinar la cantidad de calor que se introduce a la Unidad por la humedad del aire que se alimenta.

$$B_{mAe} = W_{mA'} * W_{A'e} * c p_s * (t_{A7}, t_{A8} - t_{RA})$$

VI.5.3.2 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre

$W_{mA'}$ = kg / kg de aire seco = kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco

$$W_{A'e} = W_{A'} * W_{fe}$$

Donde:

$W_{A'e}$ = kg / s = kilogramos de aire seco proporcionado por hora

$W_{A'}$ = kg / kg de combustible quemado = kilogramos de aire seco proporcionado por kilogramo de combustible quemado

1) W_{fe} = kg de combustible quemado / s = Velocidad de combustible medido por procedimientos de pesado (con balanza calibrada) y la medición del tiempo transcurrido para cada lectura (se realiza con un cronómetro calibrado). Las fuentes de incertidumbres involucradas en esta medición se han establecido en el punto VI.2.

$Cp_s = KJ / (kg \text{ } ^\circ C)$ = Calor específico del vapor. Se determina de los valores instantáneos y corresponde a las condiciones de entrada del aire.

4) t_{A7} , o $t_{A8} = \text{ } ^\circ C$ = Temperatura del aire de entrada. Explicado en el crédito B_{A8} . La temperatura puede ser determinada por un termómetro de líquido en vidrio calibrado, las fuentes de incertidumbre involucradas son:

- a. Resolución del termómetro utilizado
- b. Calibración del termómetro
- c. Repetibilidad de las mediciones

t_{RA} = Temperatura de referencia del aire

VI.5.3.3 Cuantificación y reducción

1) Flujo de combustible quemado. Calculado previamente.

2) Temperatura del aire de entrada

a. Resolución del termómetro utilizado. A partir de la resolución del termómetro se puede calcular la incertidumbre estándar considerando una distribución rectangular.

b. Calibración del termómetro. Los informes de Calibración permiten asegurar la trazabilidad de los instrumentos y por tanto las mediciones, así como, el conocimiento de la incertidumbre correspondiente. En el informe o certificado, se establece el factor de cobertura utilizado y cualquier corrección requerida.

c. Repetibilidad de las mediciones. Se llevan a cabo las mediciones de temperatura, seis lecturas cada hora y durante el periodo de tiempo establecido para la prueba (4 horas mínimo). Los valores obtenidos de las lecturas de temperatura son promediados y de éstos se obtiene la varianza, posteriormente se obtiene la desviación estándar de la media la cual es equivalente a la incertidumbre tipo A.

VI.5.3.4 Combinación

La incertidumbre combinada para el crédito por humedad en el aire entrante esta dada a partir de cada uno de los componentes de la ecuación principal y de las ecuaciones auxiliares (cp_s). Expresados como coeficientes de sensibilidad.

$$B_{mAe} = W_{mA} * W_{Ae} * cp_s * (t_{A7}, t_{A8} - t_{RA})$$

Las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad se calculan como sigue:

$$\frac{\partial B_{mAc}}{\partial W_{mA'}} = W_{A'e} * cp_s * (t_{A7}, t_{A8} - t_{RA}) \quad \frac{\partial B_{mAc}}{\partial cp_s} = W_{mA'} * W_{A'e} * (t_{A7}, t_{A8} - t_{RA})$$

$$\frac{\partial B_{mAc}}{\partial W_{A'e}} = W_{mA'} * cp_s * (t_{A7}, t_{A8} - t_{RA}) \quad \frac{\partial B_{mAc}}{\partial t_{A7}, t_{A8}} = W_{mA'} * W_{A'e} * Cp_s$$

Finalmente la incertidumbre combinada queda como sigue:

$$U_{B_{mAc}}^2 = \left(\frac{\partial B_{mAc}}{\partial W_{mA'}} \right)^2 U_{W_{mA'}}^2 + \left(\frac{\partial B_{mAc}}{\partial W_{A'e}} \right)^2 U_{W_{A'e}}^2 + \left(\frac{\partial B_{mAc}}{\partial cp_s} \right)^2 U_{cp_s}^2 + \left(\frac{\partial B_{mAc}}{\partial t_{A7}, t_{A8}} \right)^2 U_{t_{A7}, t_{A8}}^2$$

Se emplean las ecuaciones complementarias para obtener las incertidumbres correspondientes.

Para $W_{A'e}$ Tenemos:

$$W_{A'e} = W_{A'} * W_{fe}$$

$$\frac{\partial W_{A'e}}{\partial W_{A'}} = W_{fe}$$

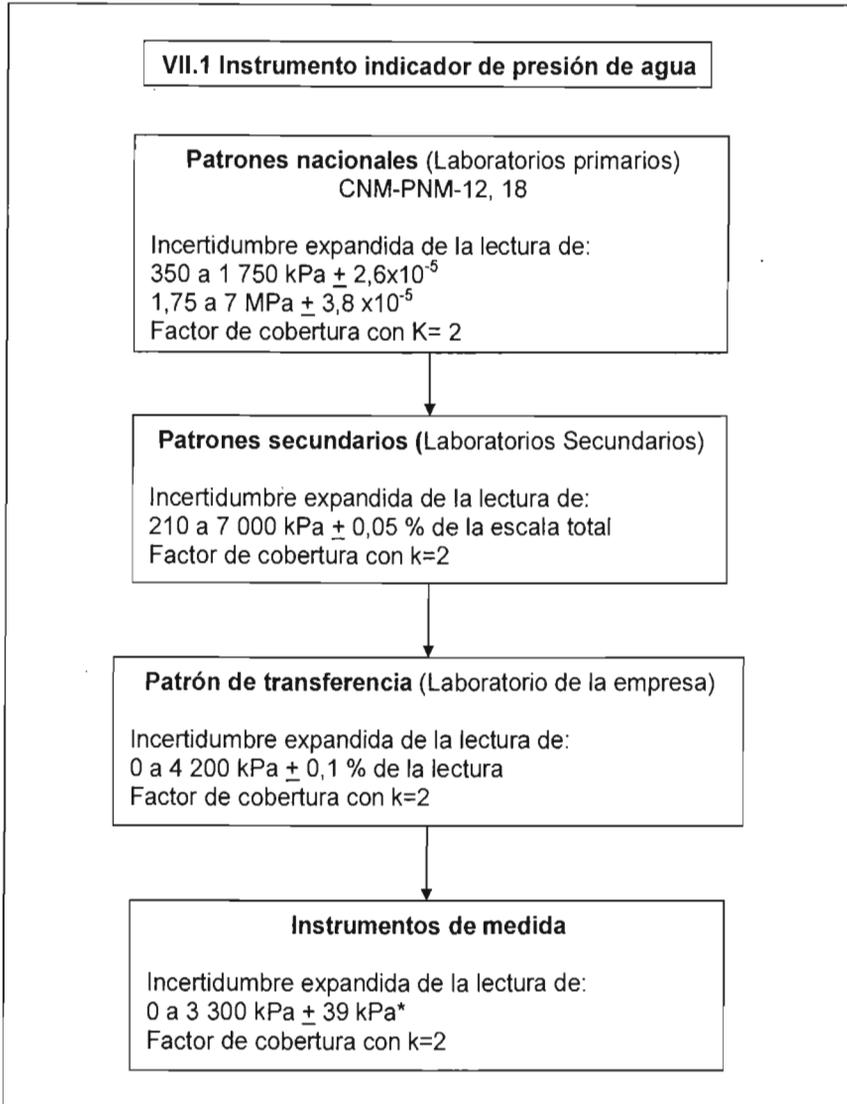
$$\frac{\partial W_{A'e}}{\partial W_{fe}} = W_{A'}$$

$$U_{W_{A'e}}^2 = \left(\frac{\partial W_{A'e}}{\partial W_{A'}} \right)^2 U_{W_{A'}}^2 + \left(\frac{\partial W_{A'e}}{\partial W_{fe}} \right)^2 U_{W_{fe}}^2$$

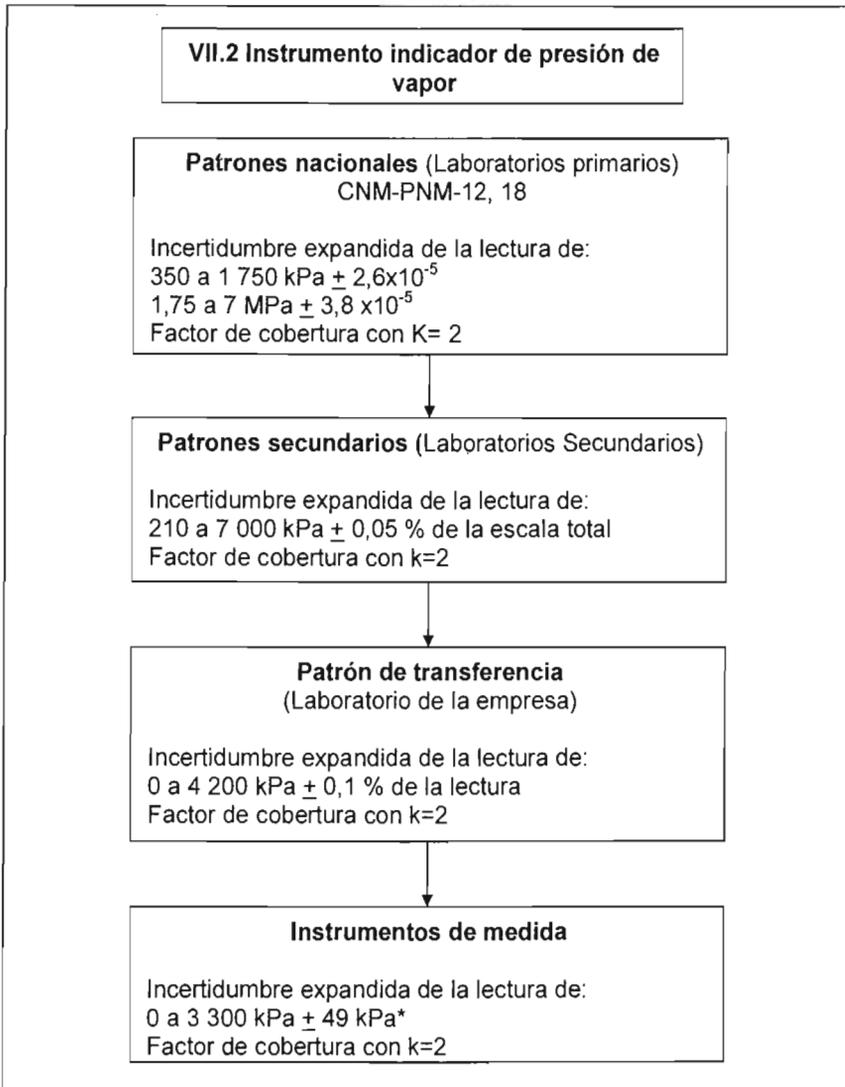
El cálculo de la eficiencia y de su incertidumbre se presenta en el capítulo VIII, aunque, para ello no se considera el orden aquí mostrado, debido a que tanto para el cálculo de la eficiencia como de su incertidumbre se necesita del conocimiento previo de todos los términos involucrados. En este capítulo se buscó llevar paso a paso cada uno de los términos involucrados en la eficiencia, tratando de hacerlo en orden y determinando para cada parámetro las fuentes de incertidumbre involucradas. En el cálculo por el contrario se inicia con los cálculos requeridos para finalmente obtener la evaluación de la incertidumbre en el cálculo de la eficiencia.

VII. TRAZABILIDAD

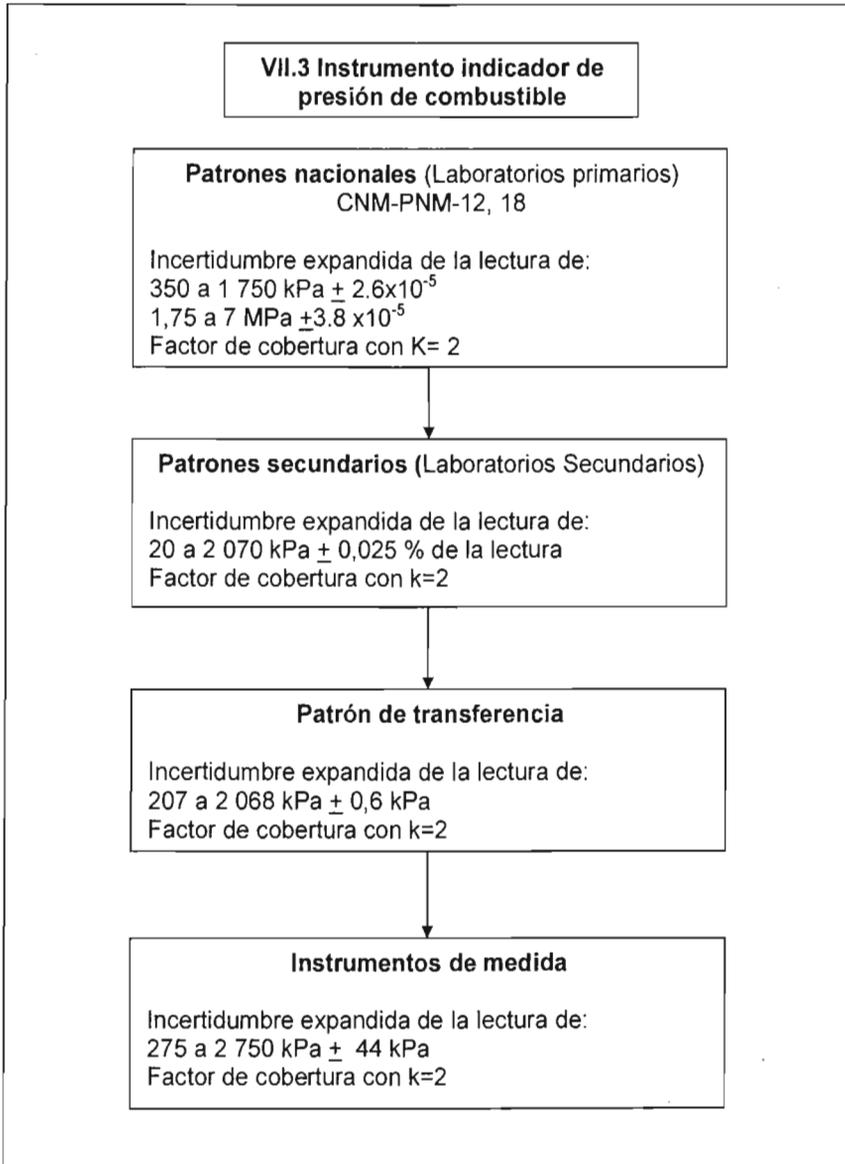
La trazabilidad de las mediciones involucradas en la Unidad, se encuentra en las siguientes cartas de Trazabilidad.



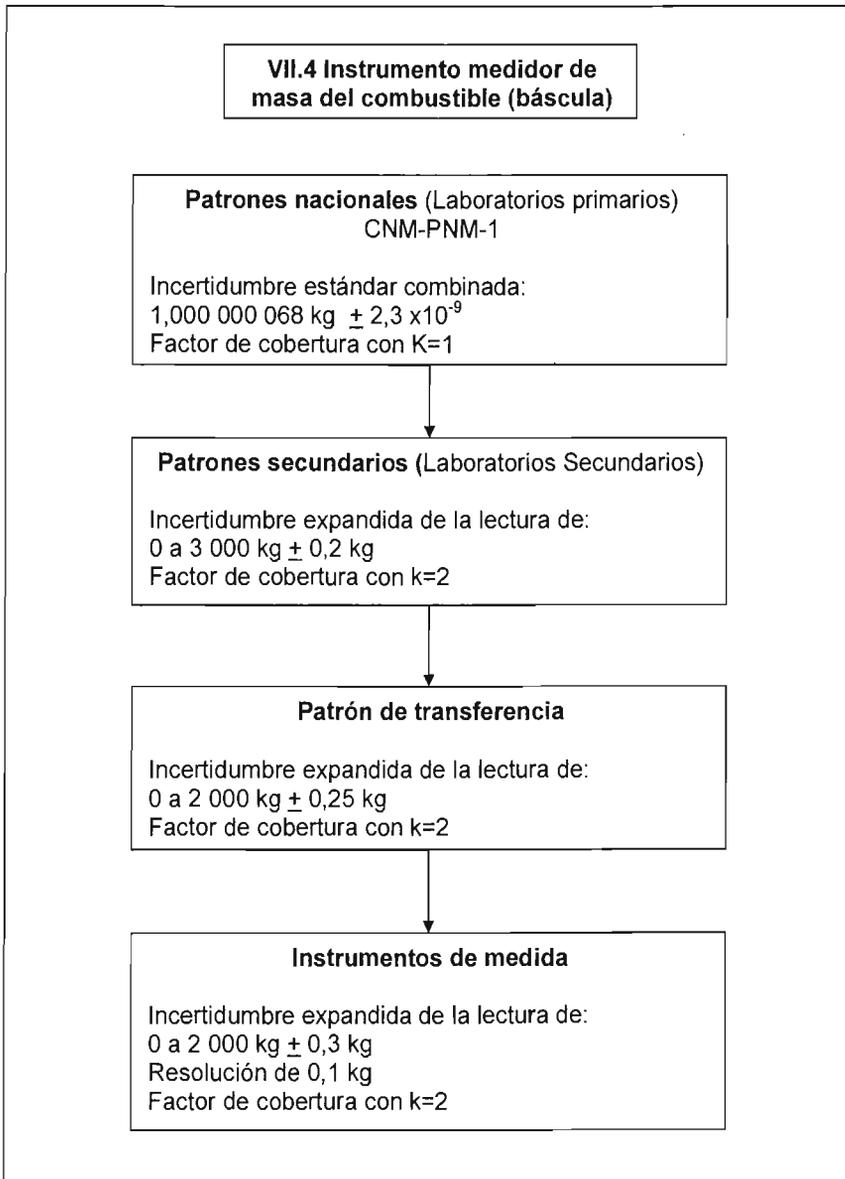
*Los equipos de medición de estas variables manejan las unidades de kg/cm² por lo que el valor de incertidumbre reportado corresponde a 0,4 kg/cm²

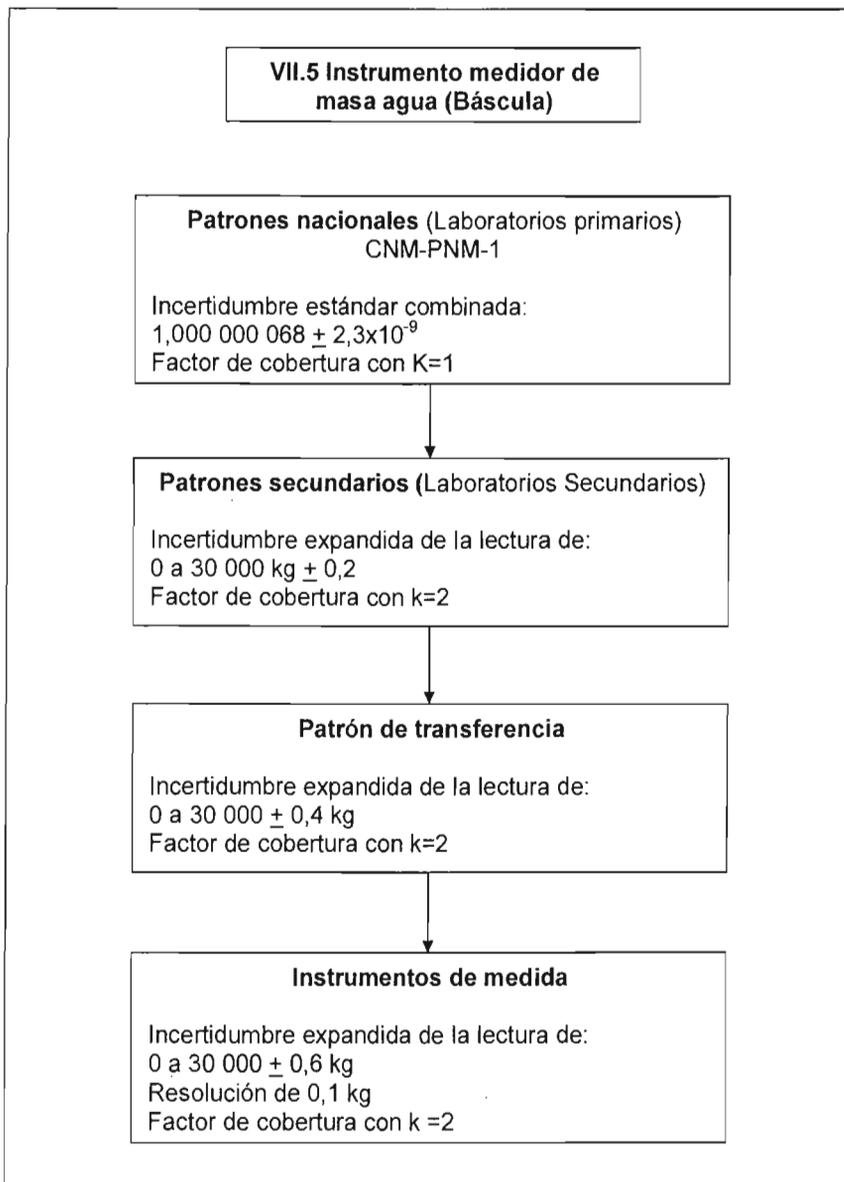


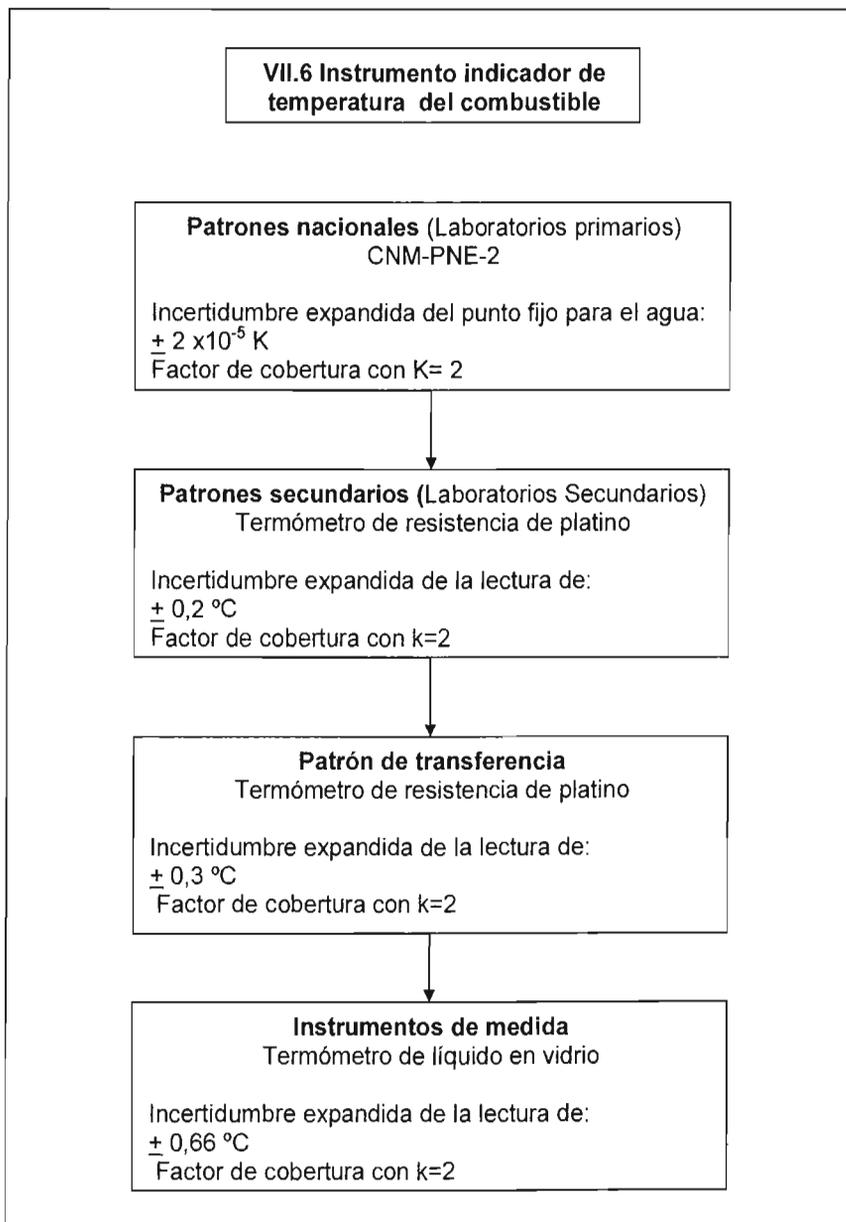
*Los equipos de medición de estas variables manejan las unidades de kg/cm² por lo que el valor de incertidumbre reportado corresponde a 0,5 kg/cm²

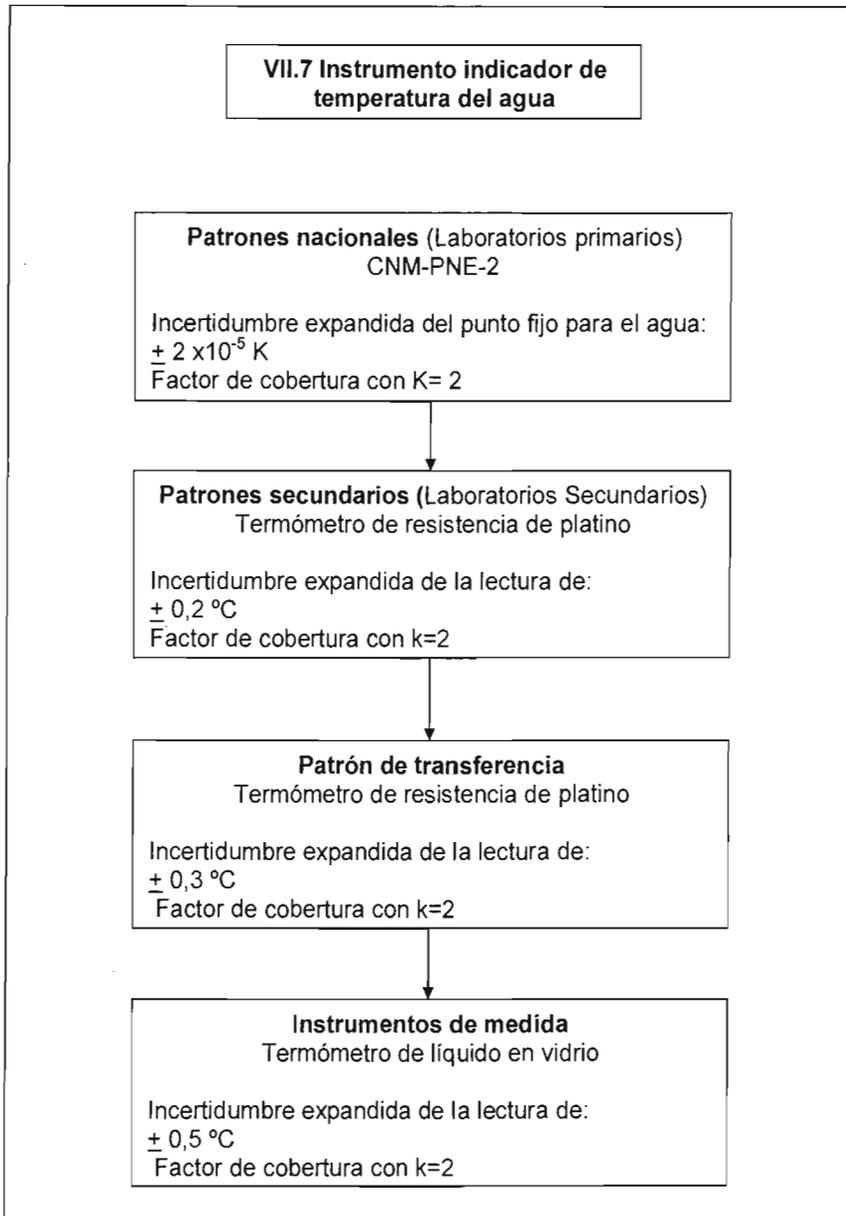


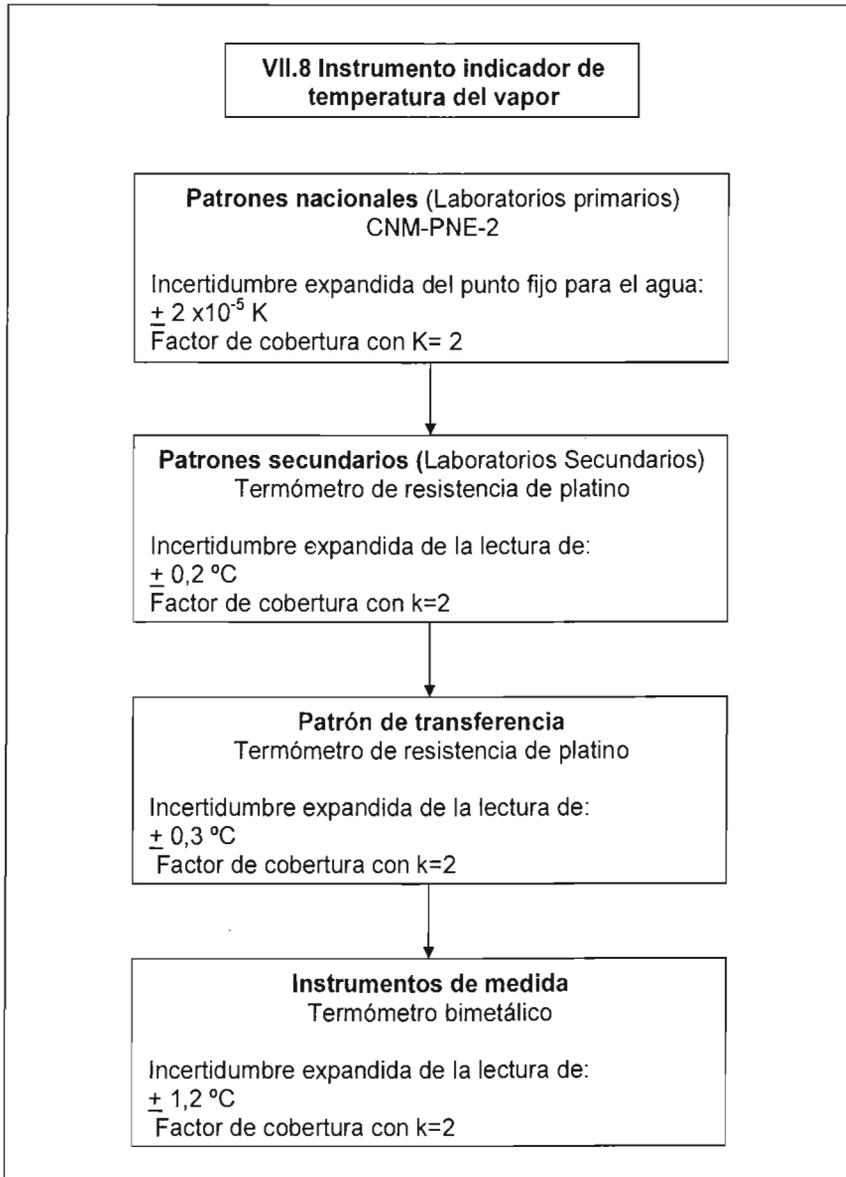
*Los equipos de medición de estas variables manejan las unidades de kg/cm^2 por lo que el valor de incertidumbre reportado corresponde a $0,45 \text{ kg/cm}^2$

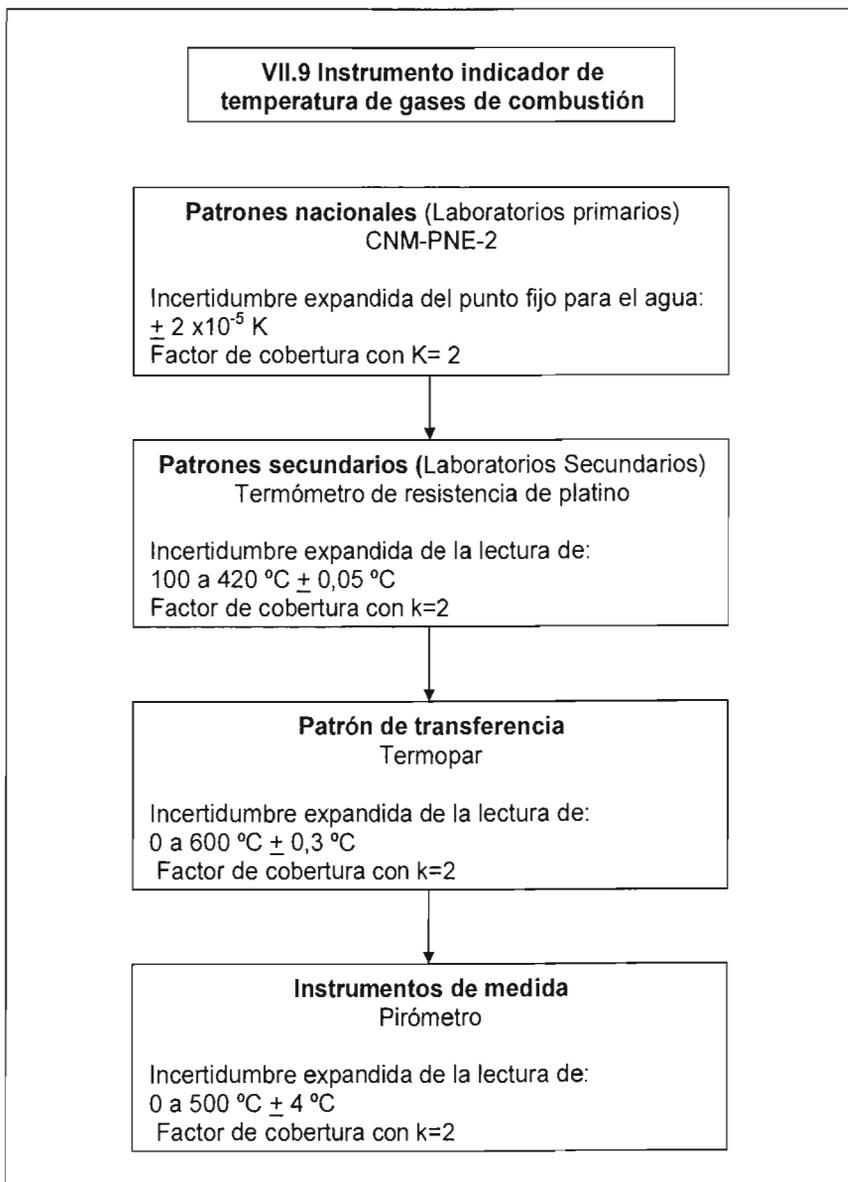












VII.10 Instrumento de medición de los gases de combustión (Celdas electroquímicas)

Laboratorios Secundarios

Materiales de referencia utilizados para la calibración
 Material de referencia: Gases especiales protocolo E.P.A.
 Fabricante: Praxair México S.A. de C.V.
 Trazabilidad: Trazabilidad a NIST, Protocolo 1,
 Procedimiento G2 EPA Análisis y Certificación de Estándares de
 Calibración Gaseosos, Estándar de Referencia Tipo SRM-1681b,
 CAL-014621 Cilindro No. XF000913B, CAL-014621

Materiales de referencia usados para la calibración

Gases	Cilindro	Certificado	Concentración	Incertidumbre
CO	CC61804	12375	1002 μ mol/mol	\pm 7,71 μ mol/mol
O ₂	CC120511	12009	21,0 % mol/mol	\pm 0,24 % mol/mol

Instrumentos de medida

Incertidumbre expandida de la lectura de:

Resolución	Incertidumbre
O ₂ 0,1 %	\pm 0,37
CO ₂ 0,1 %	\pm 0,30
CO 1×10^{-4}	\pm 0,45
Factor de cobertura con k=2	

VII.11 Instrumento indicador de % de HR y temperatura (Termo higrómetro)

Patrones nacionales (Laboratorios primarios)
CNM-PNE-8

<u>Humedad Relativa</u>	<u>Temperatura</u>
Alcance: 10 % a 95 % HR	0 a 64 °C
Incertidumbre: ± 0,2 % HR a ± 1,5 % HR	± 0,08 °C
Factor de cobertura con K= 2	

Patrones secundarios (Laboratorios secundarios)

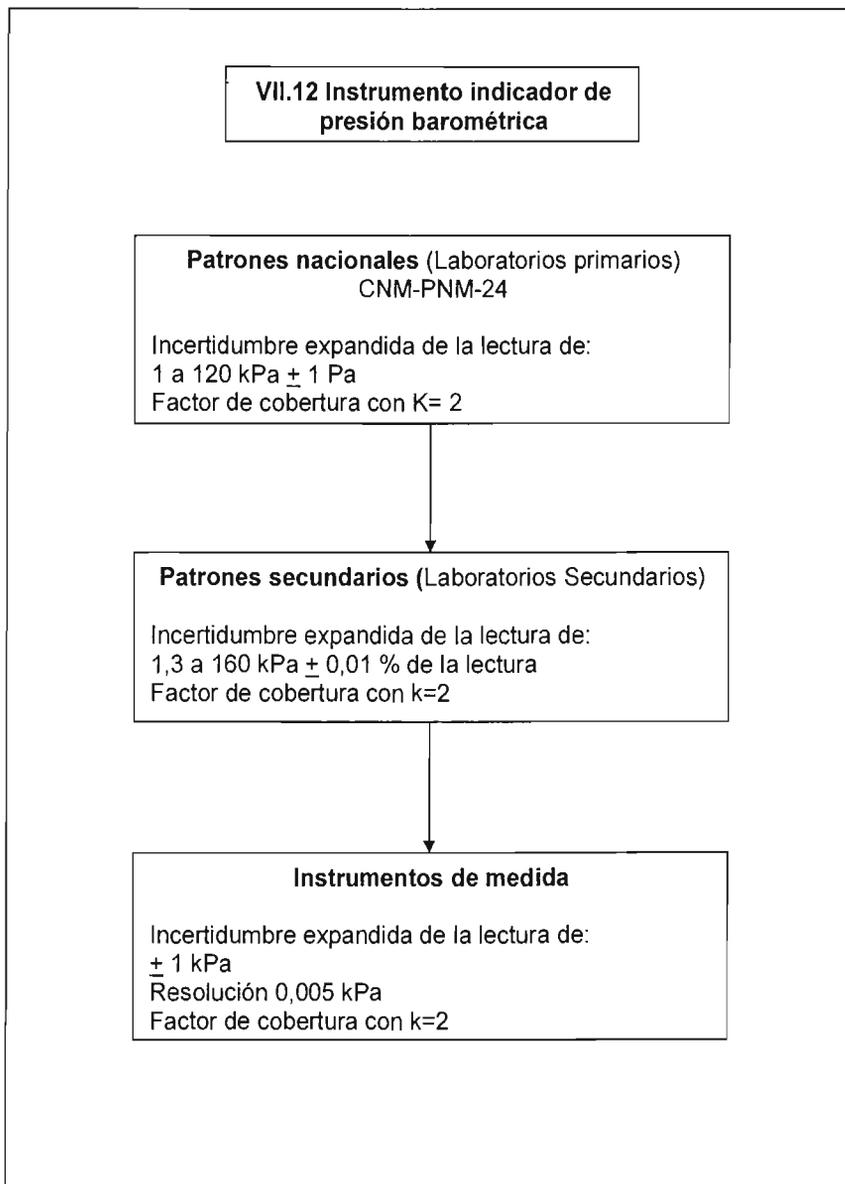
Incertidumbre expandida de la lectura:

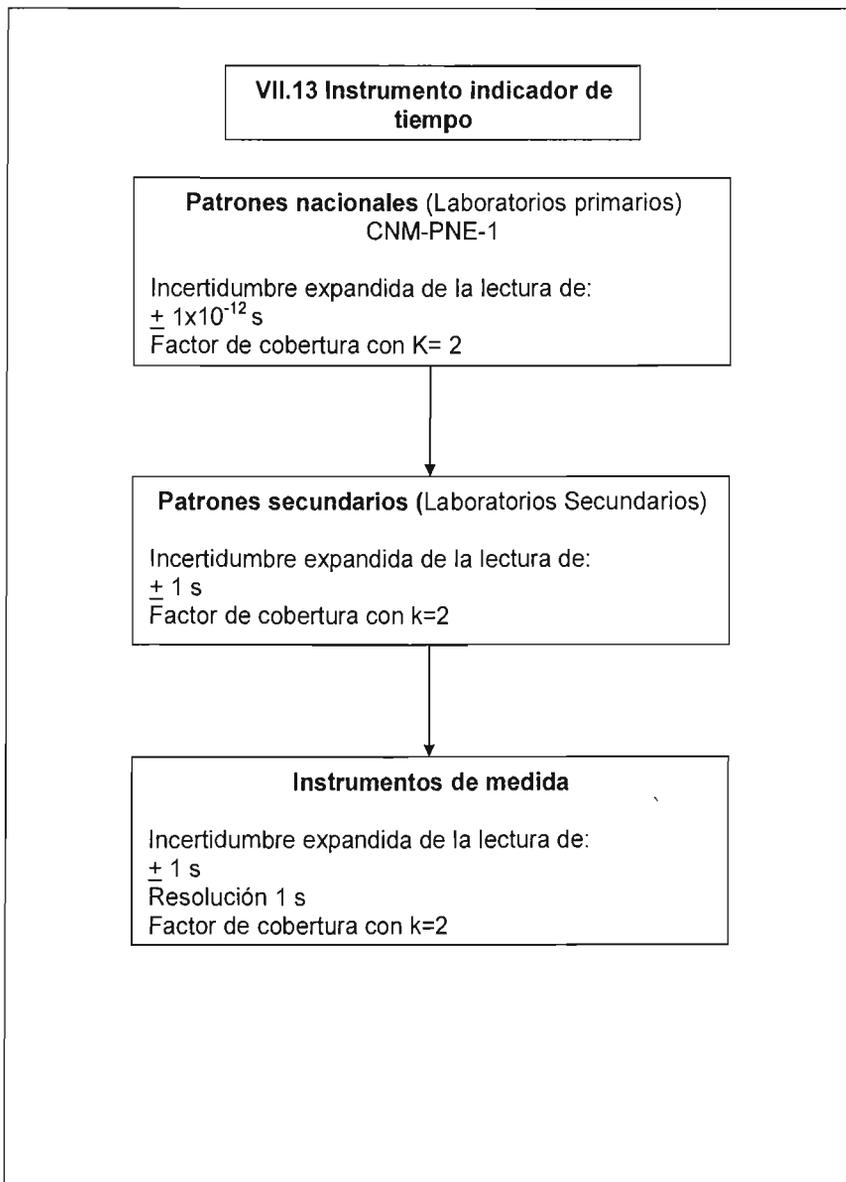
<u>Humedad Relativa</u>	<u>Temperatura</u>
± 2,0 % de HR de la lectura	± 0,2 °C
Factor de cobertura con k=2	

Instrumentos de medida

Incertidumbre expandida de la lectura de:

<u>Humedad Relativa</u>	<u>Temperatura</u>
± 3,1 % de HR	± 0,58 °C
Resolución: 0,1 % HR	0,1 °C
Factor de cobertura con k=2	





VIII. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA Y DE SU INCERTIDUMBRE

En este capítulo se realiza una simulación, tanto del cálculo de la eficiencia como de su incertidumbre, con el fin de ejemplificar lo expuesto en el capítulo VI. Se realiza de forma detallada cada uno de los cálculos y se han marcado (con subrayado, con cuadros cambiando el grosor y/o estilo) aquellos que son empleados en otro cálculo posterior para que puedan ser identificados y diferenciados. Los datos empleados en los cálculos se han obtenido de diversas fuentes, las cuales se señalan en la tabla correspondiente.

Los datos mostrados en las tablas VIII.1, 2, 3 y 4 se utilizan para simular el comportamiento de la Unidad de Generación de Vapor (definida en el punto V.1.4.1 Confirmación metrológica), considerando su capacidad al 100 % y después de alcanzar las condiciones de régimen permanente. Los valores serán empleados en cálculo de la eficiencia y de la Incertidumbre; por lo que de los valores presentados se han calculado los promedios y sus desviaciones estándar respectivas.

Tabla VIII.1 Datos del agua de alimentación y del combustible

Lecturas	Tiempo , h	Agua de alimentación			Combustible			
		Temperatura , °C*	Presión, kg/cm ² *	Flujo, kg/h	Temperatura, °C*	Presión, kg/cm ²	Consumo , kg*	Flujo, kg/h*
1	0:00	20	15,0	-----	40	6,8	-----	-----
2	0:30	20	14,5	5 970,8	40	7,0	226,5	453,0
3	1:00	20	14,5	6 074,2	38	6,9	230,6	461,2
4	1:30	20	14,8	5 965,0	42	7,0	229,8	459,6
5	2:00	21	14,6	6 059,0	40	6,8	229,9	459,8
6	2:30	21	15,0	6 011,4	40	6,9	228,3	456,6
7	3:00	20	14,7	6 041,2	41	6,7	229,2	456,4
8	3:30	21	14,8	6 094,0	40	6,8	231,1	462,2
9	4:00	20	14,6	6 059,0	40	6,8	230,2	460,4
x		20,3	14,72	6 034,32	40,1		229,45	458,90
S (x)		0,5	0,1922	47,4839	1,0541		1,4648	2,9297

* La fuente de los datos es la publicación "Ensayos de Recepción de Calderas desde 1 000 th/h hasta 25 000 th/h de producción, UNE 9-200-85; imprime y edita: Asociación Española de Normalización y certificación; Madrid, España, 1985⁽¹⁷⁾."

Tabla VIII.2 Datos de las condiciones ambientales y de los gases de combustión

Lecturas	Condiciones ambientales			Gases de combustión			
	Temperatura, °C*	Presión barométrica, kPa**	Humedad relativa, % HR**	Temperatura, °C*	% CO ₂ *	% O ₂	% CO *10 ⁻³
1	25	77,994	47,3	250	13,8	3,6	1,4
2	25	78,009	50,2	248	13,9	3,4	2,0
3	25	77,979	52,0	248	13,8	3,6	4,0
4	26	77,994	48,4	250	14,0	3,3	5,7
5	26	77,989	50,1	250	13,7	3,7	3,5
6	26	77,969	49,5	249	13,8	3,6	4,8
7	26	78,014	48,9	250	13,8	3,6	3,3
8	26	77,994	48,5	251	13,9	3,4	2,2
9	26	78,004	48,3	249	13,9	3,4	5,7
x	25,7	77,994	49,24	249,4	13,84	3,51	3,62
s (x)	0,5	0,0141	1,3857	1,0138	0,0882	0,1364	1,5762

* La fuente de los datos es la publicación "Ensayos de Recepción de Calderas desde 1 000 th/h hasta 25 000 th/h de producción, UNE 9-200-85; imprime y edita: Asociación Española de Normalización y certificación; Madrid, España, 1985⁽¹⁷⁾."

** Estos valores corresponden a condiciones que se presentan en la Ciudad de México, se han empleado de esta manera para poder llevar a cabo la simulación.

Los datos del vapor presentados en la tabla VIII.3 han sido obtenidos de diversas formas. El flujo de vapor se ha obtenido por balance de materia a partir de los datos del flujo de agua, puesto que el agua que entra se transforma en vapor y no existe purga. Los datos de entalpía⁽¹⁸⁾ presentados son obtenidos a partir de la presión absoluta del vapor, esto porque el vapor es saturado y por lo tanto solo se requiere de una de las variables para determinar su valor (presión absoluta o temperatura).

Tabla VIII.3 Datos del vapor

Lecturas	Vapor				
	Temperatura, °C (tablas vapor)*	Presión, kg/cm ² (kPa)*	Flujo, kg/h	Presión absoluta kPa	Entalpía, kJ/kg
1	200,4 (200,2)	15,1 (1480,80)	-----	1558,79	2793
2	198,9 (198,1)	14,4 (1412,16)	5 970,8	1490,17	2791
3	198,9 (198,7)	14,6 (1431,77)	6 074,2	1509,75	2792
4	199,2 (199,0)	14,7 (1441,58)	5 965,0	1519,57	2792
5	199,0 (199,0)	14,7 (1441,58)	6 059,0	1519,57	2792
6	200,4 (199,6)	14,9 (1461,19)	6 011,4	1539,16	2792
7	199,0 (199,3)	14,8 (1451,38)	6 041,2	1529,39	2792
8	199,2 (199,0)	14,7 (1441,58)	6 094,0	1519,57	2792
9	199,2 (199,0)	14,7 (1441,58)	6 059,0	1519,58	2792
x	199,36 (199,1)	14,73	6 034,32	1522,839	2792,0
S (x)	0,6044 (0,5809)	0,1936	47,4839	18,9836	0,50

Tabla VIII.4 Datos de la composición del combustible

Composición del diesel		
Elemento	(kg/kg de combustible)	Incertidumbre ¹
Carbón (C)	0,86	4,3x10 ⁻³
Hidrógeno (H)	0,11	5,5x10 ⁻⁴
Azufre (S)	0,008	4,0x10 ⁻⁵
Oxígeno (O)	0,01	5,0x10 ⁻⁵
Nitrógeno (N)	0,002	1,0x10 ⁻⁵
Humedad (H ₂ O)	0,01	5,0x10 ⁻⁵
Cenizas	-	-
Poder calorífico BTU/lb (kJ/kg)	18 873 (43 899)	18,873 (43,899)

¹ La incertidumbre se encuentra expandida con un factor de cobertura de k=2

Debido a que para obtener tanto la eficiencia como su incertidumbre se requiere de tener la información de cada uno de los términos involucrados, se presentan primero todos los cálculos necesarios para finalmente obtener la eficiencia.

A partir de la información presentada en las tablas precedentes se procede al cálculo de la eficiencia; primero se realizan el cálculo del flujo de aire seco, ya que este ha de ser empleado en el cálculo de los créditos de acuerdo con lo establecido en el punto VI.5.

VIII.1 Cálculos preliminares

VIII.1.1 Gasto de nitrógeno

$$\% \text{mol} N_2 = 100 - O_2 - CO_2 - CO$$

En la tabla VIII.2 se presentan los valores de las lecturas correspondientes a los gases de combustión.

$$\% \text{mol} N_2 = 100 - 3,51 - 13,84 - 0,00362 = 82,6464 \quad \% \text{ mol de } N_2$$

$$W_{G:N_2} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)} \left(Cb + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right) \text{ Puesto que en el análisis del}$$

combustible no se presenta desecho C_b queda como C simplemente

$$W_{G:N_2} = \frac{28,0134 * 82,6464}{12,0107(13,84 + 0,00362)} \left(0,86 + \frac{12,0107 * 0,008}{32,065} \right) = 12,0166 \text{ kg} N_2 / \text{kg} cq$$

kg cq: kg de combustible quemado

VIII.1.2 Gasto de aire seco

$$W_{A'} = \frac{W_{G:N_2} - N}{0,7685} \quad W_{A'} = \frac{12,0166 - 0,002}{0,7685} = 15,6338 \text{ kg as/kg cq}$$

kg as: kg de aire seco

VIII.1.3 Aire teórico y exceso de aire

$$A'_0 = \frac{11,51 * C + 34,30 * \left[H - \frac{O}{7,937} \right] + 4,335 * S}{100}$$

$$A'_{\theta} = \frac{11,51 * 86,0 + 34,30 * \left[11,0 - \frac{1,0}{7,937} \right] + 4,335 * 0,8}{100} = 13,6631 \text{ kg as/kg cq}$$

$$A'_x = \frac{W_{A'} - A'_{\theta}}{A'_{\theta}} * 100 \quad A'_x = \frac{15,6338 - 13,6631}{13,6631} * 100 = 14,42 \text{ \% de exceso de aire}$$

VIII.2 Cálculo de créditos

VIII.2.1 Calor en el aire de entrada

$$B_{Ac} = W_{A'} * W_{fe} * c_{p_{A'}} * (t_{A'} - t_{RA})$$

Par calcular el $C_{p_{A'}}$ del aire⁽¹⁹⁾ se emplea la ecuación siguiente con los valores de temperatura del aire de la tabla VIII.2.

$$C_{p_{A'}} = \frac{28,94 + 0,4147 * 10^{-2} * t_{A'} + 0,3191 * 10^{-5} * t_{A'}^2 - 1,965 * 10^{-9} * t_{A'}^3}{28,9635}$$

$$C_{p_{A'}} = \frac{28,94 + 0,4147 * 10^{-2} * 25,7 + 0,3191 * 10^{-5} * 25,7^2 - 1,965 * 10^{-9} * 25,7^3}{28,9635}$$

$$C_{p_{A'}} = 1,0029 \text{ kJ l(kg}^{\circ}\text{C)}$$

El flujo de aire seco se ha calculado en el punto VIII.1, mientras que el flujo de combustible y la temperatura del aire de alimentación se encuentran en la tabla VIII.1

$$B_{Ac} = 15,6338 * 0,1275 * 1,0029 * (25,7 - 17) = 17,3921 \text{ kJ / s}$$

VIII.2.2 Calor sensible en el combustible

$$B_{fe} = W_{fe} * c_{p_f} * (t_{f1,3,4} - t_{RA})$$

Los valores del flujo de combustible y su temperatura son obtenidos de la tabla VIII.1

$$B_{fe} = 0,1275 * 1,9037 * (40,1 - 17) = 5,6069 \text{ kJ / s}$$

VIII.2.3 Calor suministrado con la humedad que entra con el aire

$$B_{mAe} = W_{A'} * W_{fe} * W_{mA'} * c_{p_s} * (t_{A'} - t_R)$$

La humedad en el aire es calculada a partir de la información de las condiciones ambientales, de la ecuación de presión de vapor⁽²⁰⁾ y de la de humedad para el sistema aire-agua⁽²¹⁾:

$$\ln P_s = 18,3036 - \frac{3816,44}{-46,13 + t_A} \quad P_s = e \left(18,3036 - \frac{3816,44}{-46,13 + t_A} \right)$$

La temperatura debe de estar en grados Kelvin

$$P_s = e \left(18,3036 - \frac{3816,44}{-46,13 + 298,85} \right) = 24,58 \text{ mmHg}$$

$$P_s = 24,58 \text{ mmHg} * \frac{1,333224 \times 10^{-1} \text{ kPa}}{1 \text{ mmHg}} = 3,2771 \text{ kPa}$$

La presión de vapor es utilizada para el cálculo de la humedad molar en la ecuación siguiente:

$$W_{m,s} = \frac{y_p * P_s}{100 (P - P_s)}$$

La presión P barométrica es tomada de la tabla VIII.2 así como la humedad relativa y_p

$$W_{m,s} = \frac{49,24 * 3,2771 * 18,01528}{100 * (77,9940 - 3,2771) * 28,9635} = 0,0134 \frac{\text{kg de H}_2\text{O}}{\text{kg de aire seco}}$$

El cp_s del vapor⁽²²⁾ corresponde a la humedad del aire de entrada y por tanto se determina a las condiciones de esta, se emplea la ecuación siguiente:

$$cp_s = 1,8349 + 5,5885 \times 10^{-4} * t_A - 2,4949 \times 10^{-6} * t_A^2 + 1,9516 \times 10^{-8} * t_A^3$$

$$cp_s = 1,8349 + 5,5885 \times 10^{-4} * 25,7 - 2,4949 \times 10^{-6} * 25,7^2 + 1,9516 \times 10^{-8} * 25,7^3$$

$$cp_s = 1,8479 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$B_{m,s} = 15,6338 * 0,1275 * 0,0134 * 1,8479 * (25,7 - 17) = 0,4294 \text{ kJ/s}$$

VIII.3 Energía en el combustible y los créditos

Calor que entra con el combustible = 43 899 kJ/kg

43 899 kJ/kg * 0,1275 kg cq /s = 5 597,1225 kJ/s

Créditos

B = 17,3921 + 5,6069 + 0,4294 = 23,4284 kJ/s

Total

$$5\,597,1225 \text{ kJ/s} + 23,4284 \text{ kJ/s} = 5\,620,5509 \text{ kJ/s}$$

VIII.4 Cálculo de la eficiencia**Método de entradas y salidas**

$$\eta_k = \frac{W_{se} * (h_s - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_c} * 100 = \frac{W_{wc} (h_w - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_c} * 100$$

De donde se obtiene:

$$\eta_k = \frac{1,6762 * (2792,0 - 86,59)}{5\,620,5509} * 100 = 80,6826 \%$$

A continuación se procede al cálculo de la incertidumbre correspondiente a este valor de eficiencia utilizando el método de propagación de la incertidumbre^(14, 15).

VIII.5 Incertidumbres de medición en el gasto de aire seco

Incertidumbre de los gases de combustión. La composición de los gases de combustión se presenta en la tabla VIII.2

$$\%mol N_2 = 100 - O_2 - CO_2 - CO$$

$$U_{N_2} = f(U_{O_2}, U_{CO_2}, U_{CO})$$

Por lo tanto se deben de calcular las incertidumbres de las mediciones de gases de chimenea para poder obtener la del N_2 .

VIII.5.1 Cálculo de incertidumbre para el O_2 .

$$U_{O_2} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{cal.}}, U_{\text{res.}})$$

Donde: i cal. significa informe de calibración; res. significa resolución

$$U_{\text{tipoA}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(0,1364)^2}{9}} * 1,07 = 0,0486$$

t es la corrección por el número de datos de acuerdo con la distribución t de Student.

$$U_{\text{res}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{\text{cal}} = \frac{0,37}{2} = 0,185$$

Y la incertidumbre correspondiente al O₂ será:

$$U_{\text{O}_2} = \sqrt{(0,0486)^2 + (0,0289)^2 + (0,185)^2} = 0,1934$$

Se procede de manera similar para el CO₂ y el CO.

VIII.5.2 Cálculo de incertidumbre para el CO₂.

$$U_{\text{CO}_2} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{cal.}}, U_{\text{res.}})$$

$$U_{\text{tipoA}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(0,0882)^2}{9}} * 1,07 = 0,0315$$

$$U_{\text{res}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289$$

$$U_{\text{cal}} = \frac{0,30}{2} = 0,15$$

Y la incertidumbre correspondiente al CO₂ será:

$$U_{\text{CO}_2} = \sqrt{(0,0315)^2 + (0,0289)^2 + (0,15)^2} = 0,1560$$

VIII.5.3 Cálculo de incertidumbre para el CO.

$$U_{\text{CO}} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{cal.}}, U_{\text{res.}})$$

$$U_{\text{tipoA}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(1,5762 \times 10^{-3})^2}{9}} * 1,07 = 5,6218 \times 10^{-4}$$

La resolución para este gas esta dada en ppm por lo que se tiene que pasar primero a % en volumen.

$$1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-4}$$

$$U_{\text{res}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{2\sqrt{3}} = 2,8868 \times 10^{-5}$$

$$U_{\text{cal}} = \frac{0,45}{2} = 0,225$$

Y la incertidumbre correspondiente al CO será:

$$U_{CO} = \sqrt{(5,6218 \times 10^{-4})^2 + (2,8868 \times 10^{-5})^2 + (0,225)^2} = 0,2250$$

VIII.5.4 Cálculo de incertidumbre para el N₂.

Para calcular la incertidumbre del N₂ se emplea la ley de propagación de incertidumbre^(14, 15).

$$U_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 * U_{x_i}^2$$

$$U_{N_2}^2 = \left(\frac{\partial N_2}{\partial O_2} \right)^2 * U_{O_2}^2 + \left(\frac{\partial N_2}{\partial CO_2} \right)^2 * U_{CO_2}^2 + \left(\frac{\partial N_2}{\partial CO} \right)^2 * U_{CO}^2$$

Las derivadas parciales se conocen también como coeficientes de sensibilidad y para este caso particular valen -1, por lo que la incertidumbre para el N₂ se calcula mediante estos valores y los previamente obtenidos de los gases de combustión.

$$U_{N_2}^2 = (-1)^2 * (0,1934)^2 + (-1)^2 * (0,1560)^2 + (-1)^2 * (0,2250)^2 = 0,1124$$

$$U_{N_2} = 0,3352$$

Ahora se calcula la incertidumbre del gasto de aire seco

VIII.5.5 Incertidumbre del gasto de nitrógeno

La información concerniente a la composición del combustible se encuentra en la tabla VIII.4

$$W_{A'} = \frac{W_{G'N_2} - N}{0,7685} \quad U_{A'} = f(U_{WG'N_2}, U_N)$$

Pero a su vez la incertidumbre de W_{G'N₂} debe ser calculada previamente.

$$W_{G'N_2} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)} \left(C + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

$$U_{WG'N_2} = f(U_{N_2}, U_{CO_2}, U_{CO}, U_C, U_S)$$

Y empleando la ley de propagación de incertidumbre.

$$U_{WG'N_2}^2 = \left(\frac{\partial W_{G'N_2}}{\partial N_2} \right)^2 * U_{N_2}^2 + \left(\frac{\partial W_{G'N_2}}{\partial CO_2} \right)^2 * U_{CO_2}^2 + \left(\frac{\partial W_{G'N_2}}{\partial CO} \right)^2 * U_{CO}^2 + \\ + \left(\frac{\partial W_{G'N_2}}{\partial C} \right)^2 * U_C^2 + \left(\frac{\partial W_{G'N_2}}{\partial S} \right)^2 * U_S^2$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial N_2} = \frac{28,0134}{12,0107(CO_2 + CO)} * \left(C + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial N_2} = \frac{28,0134}{12,0107(13,84 + 0,00362)} * \left(0,86 + \frac{12,0107 * 0,008}{32,065} \right) = 0,1454$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO_2} = (-1) \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)^2} * \left(C + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO_2} = (-1) \frac{28,0134 * 82,6464}{12,0107(13,84 + 0,00362)^2} * \left(0,86 + \frac{12,0107 * 0,008}{32,065} \right) = -0,8680$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO} = (-1) \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)^2} * \left(C + \frac{12,0107 * S}{32,065} \right)$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial CO} = (-1) \frac{28,0134 * 82,6464}{12,0107(13,84 + 0,00362)^2} * \left(0,86 + \frac{12,0107 * 0,008}{32,065} \right) = -0,8680$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial C} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)} = \frac{28,0134 * 82,6464}{12,0107(13,84 + 0,00362)} = 13,9243$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial S} = \frac{28,0134 * N_2}{12,0107(CO_2 + CO)} * \left(\frac{12,0107}{32,065} \right)$$

$$\frac{\partial W_{GN2}}{\partial S} = \frac{28,0134 * 82,6464}{12,0107(13,84 + 0,00362)} * \left(\frac{12,0107}{32,065} \right) = 5,2157$$

La incertidumbre combinada se complementa con los valores de incertidumbres individuales previamente calculados.

$$U_{WGN2}^2 = (0,1454)^2 * (0,3352)^2 + (-0,8680)^2 * (0,1560)^2 + (-0,8680)^2 * (0,2250)^2 + (13,9243)^2 * \left(\frac{4,3 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 + (5,2157)^2 * \left(\frac{4,0 \times 10^{-5}}{2} \right)^2 = 0,0597$$

$$U_{WGN2} = 0,2444$$

VIII.5.6 Incertidumbre del gasto de aire seco

$$W_{A'} = \frac{W_{G'N2} - N}{0,7685} \quad U_{A'} = f(U_{W_{G'N2}}, U_N)$$

$$\frac{\partial W_{A'}}{\partial W_{G'N2}} = \frac{1}{0,7685} \quad \frac{\partial W_{A'}}{\partial N} = -\frac{1}{0,7685}$$

La incertidumbre combinada para $W_{A'}$ es:

$$U_{W_{A'}}^2 = \left(\frac{\partial W_{A'}}{\partial W_{G'N2}} \right)^2 U_{W_{G'N2}}^2 + \left(\frac{\partial W_{A'}}{\partial N} \right)^2 U_N^2 = (1,3012)^2 * (0,2444)^2 + (-1,3012)^2 * \left(\frac{1,0 \times 10^{-5}}{2} \right)^2$$

$$U_{W_{A'}}^2 = 0,1011 \quad \boxed{U_{W_{A'}} = 0,3180}$$

VIII.6 Incertidumbre de los créditos

VIII.6.1 Incertidumbre del calor en el aire de entrada

Principio de medición: $B_{Ac} = W_{A'} * W_{fc} * c_{pA'} * (t_{A'} - t_{RA})$

$$U_{B_{Ac}} = f(U_{W_{A'}}, U_{W_{fc}}, U_{c_{pA'}}, U_{t_{A'}})$$

Primeramente se calculan las incertidumbres del flujo de combustible (tabla VIII.1), de la capacidad calorífica del aire (a partir de la ecuación presentada en el punto VIII.2.1) y de la temperatura del aire (tabla VIII.2). La incertidumbre del flujo de aire ha sido calculada en el punto precedente.

VIII.6.1.1 Incertidumbre del flujo de combustible

$$U_{W_{fe}} = f(U_{\text{cronómetro}}, U_{\text{Balanza}}) \quad W_{fe} = m/t$$

m: masa (kg) y t: tiempo (s)

Incertidumbres de la balanza y del cronómetro

$$U_{\text{cronómetro}} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{res}}, U_{\text{cal}})$$

Puesto que las mediciones fueron tomadas en función de los intervalos de tiempo previamente establecidos, para el tiempo no se considera la incertidumbre tipo A.

$$U_{\text{res}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,2887$$

La resolución mínima es de 1 segundo con una distribución rectangular

$$U_{ical} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Y la incertidumbre correspondiente al cronómetro será:

$$U_{cronómetro} = \sqrt{(0,2887)^2 + (0,5)^2} = 0,5774$$

Para la incertidumbre, de la báscula empleada en la determinación del consumo de combustible, se emplea la desviación estándar la tabla VIII.1.

$$U_{Báscula} = f(U_{tipoA}, U_{i cal.}, U_{res.})$$

$$U_{tipoA} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(1,4648)^2}{8}} * 1,08 = 0,5593$$

La resolución es de 0,1 kg con una distribución rectangular

$$U_{res} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289$$

$$U_{ical} = \frac{0,3}{2} = 0,15$$

Y la incertidumbre correspondiente a la báscula será:

$$U_{Báscula} = \sqrt{(0,5593)^2 + (0,0289)^2 + (0,15)^2} = 0,5798$$

Finalmente para el flujo de combustible se requiere de las derivadas parciales para calcular la incertidumbre combinada

$$\frac{\partial W_{fc}}{\partial m} = \frac{1}{t} = \frac{1}{1800} = 5,5556 \times 10^{-4} \quad \frac{\partial W_{fc}}{\partial t} = -\frac{m}{t^2} = -\frac{229,45}{(1800)^2} = -7,0818 \times 10^{-5}$$

$$U_{W_{fc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_{fc}}{\partial t}\right)^2 * U_t^2 + \left(\frac{\partial W_{fc}}{\partial m}\right)^2 * U_m^2}$$

$$U_{W_{fc}} = \sqrt{(5,5556 \times 10^{-4})^2 * (0,5798)^2 + (-7,0818 \times 10^{-5})^2 * (0,5774)^2}$$

$$U_{W_{fc}} = 3,2470 \times 10^{-4}$$

VIII.6.1.2 Incertidumbre de la temperatura del aire

La información de la temperatura del aire aparece en la tabla VIII.2.

$$U_{IA} = f(U_{tipoA}, U_{i cal.}, U_{res.})$$

$$U_{\text{tipoA}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(0,5)^2}{9}} * 1,07 = 0,1783$$

$$U_{\text{res}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,2887$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{\text{ical}} = \frac{0,58}{2} = 0,29$$

Y la incertidumbre correspondiente al t_A será:

$$U_{t_A} = \sqrt{(0,1783)^2 + (0,2887)^2 + (0,29)^2} = 0,4464$$

VIII.6.1.3 Incertidumbre del C_{pA}

$$U_{C_{pA}} = f(U_{t_A})$$

Para encontrar la incertidumbre se emplea la ecuación utilizada para determinarlo, de esta se obtiene la derivada y se combina con la incertidumbre de la temperatura.

$$C_{pA} = \frac{28,94 + 0,4147 \times 10^{-2} * t_{A'} + 0,3191 \times 10^{-5} * t_{A'}^2 - 1,965 \times 10^{-9} * t_{A'}^3}{28,9635}$$

$$\frac{\partial C_{pA}}{\partial t_{A'}} = \frac{0,4147 \times 10^{-2} + 6,382 \times 10^{-6} t_{A'} - 5,895 \times 10^{-9} t_{A'}^2}{28,9635}$$

$$\frac{\partial C_{pA}}{\partial t_{A'}} = \frac{0,4147 \times 10^{-2} + 6,382 \times 10^{-6} * 25,7 - 5,895 \times 10^{-9} (25,7)^2}{28,9635} = 1,4871 \times 10^{-4}$$

La incertidumbre de la temperatura del aire se cálculo en el punto VIII.6.1.2.

$$U_{C_{pA}} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{pA}}{\partial t_{A'}}\right)^2 * U_{t_A}^2} = \sqrt{(1,4871 \times 10^{-4})^2 * (0,4464)^2}$$

$$U_{C_{pA}} = 6,6384 \times 10^{-5}$$

La incertidumbre combinada de B_{Ae} será calculada a partir de las incertidumbres de cada medición y las derivadas parciales correspondientes:

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{A'}} = W_{fe} * c_{p_{A'}} * (t_{A'} - t_{R'}) = 0,1275 * 1,0029(25,7 - 17) = 1,1125$$

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{fe}} = W_{A'} * c_{p_{A'}} * (t_{A'} - t_{R'}) = 15,6338 * 1,0029(25,7 - 17) = 136,4085$$

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial C_{p_{A'}}} = W_{A'} * W_{fe} * (t_{A'} - t_{R'}) = 15,6338 * 0,1275(25,7 - 17) = 17,3418$$

$$\frac{\partial B_{Ae}}{\partial t_{A'}} = W_{A'} * W_{fe} * c_{p_{A'}} = 15,6338 * 0,1275 * 1,0029 = 1,9991$$

$$U_{BAe}^2 = \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{A'}} \right)^2 U_{WA'}^2 + \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial W_{fe}} \right)^2 U_{Wfe}^2 + \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial c_{p_{A'}}} \right)^2 U_{cp_{A'}}^2 + \left(\frac{\partial B_{Ae}}{\partial t_{A'}} \right)^2 U_{t_{A'}}^2$$

$$U_{BAe} = \sqrt{(1,1125)^2 (0,2920)^2 + (136,4085)^2 (3,2340 \times 10^{-4})^2 + (17,3418)^2 (6,6384 \times 10^{-5})^2 + (1,9991)^2 (0,4464)^2} =$$

$$U_{BAe} = 0,9507$$

VIII.6.2 Incertidumbre del calor sensible en el combustible

Principio de medición: $B_{fe} = W_{fe} * c_{p_f} * (t_f - t_{R'})$

Para el c_{p_f} el valor ha sido obtenido de una tabla y por tanto no se tiene un valor de incertidumbre por lo que no se considera para el cálculo.

La incertidumbre del combustible ya ha sido determinada anteriormente (VIII.6.1.1) por lo que solo resta calcular la incertidumbre de la temperatura del combustible.

VIII.6.2.1 Incertidumbre de la temperatura del combustible

Los datos de la temperatura del combustible aparecen en la tabla VIII.1

$$U_{If} = f(U_{ipoa}, U_{ical}, U_{res})$$

$$U_{ipoa} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(1,0541)^2}{9}} * 1,07 = 0,3760$$

$$U_{res} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,2889$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{icel} = \frac{0,66}{2} = 0,33$$

Y la incertidumbre correspondiente al t_f será:

$$U_{t_f} = \sqrt{(0,3760)^2 + (0,2889)^2 + (0,33)^2} =$$

$$U_{t_f} = 0,5777$$

Para calcular la incertidumbre de B_{fe} se requiere de los coeficientes de sensibilidad y de las incertidumbres correspondientes a cada término, de donde:

$$\frac{\partial B_{fe}}{\partial W_{fe}} = cp_f * (t_f - t_R) = 1,9037(40,1 - 17) = 43,9755$$

$$\frac{\partial B_{fe}}{\partial t_f} = W_{fe} * cp_f = 0,1275 * 1,9037 = 0,2427$$

$$U_{B_{fe}} = \sqrt{\left(\frac{\partial B_{fe}}{\partial W_{fe}}\right)^2 U_{W_{fe}}^2 + \left(\frac{\partial B_{fe}}{\partial t_f}\right)^2 U_{t_f}^2}$$

$$U_{B_{fe}} = \sqrt{(43,9775)^2 (3,2340 \times 10^{-4})^2 + (0,2427)^2 (0,5777)^2} =$$

$$U_{B_{fe}} = 0,1409$$

VIII.6.3 Incertidumbre del calor suministrado con la humedad que entra con el aire

$$\text{Principio de medición: } B_{mAe} = W_{A'e} * W_{fe} * W_{mA'} * cp_s * (t_{A'} - t_R)$$

Puesto que los valores de la incertidumbre del flujo de aire (VIII.5.6) y del flujo de combustible (VIII.6.1.1) ya han sido calculados, se procede al cálculo de los restantes.

VIII.6.3.1 Incertidumbre del % de HR

$$U_{\%HR} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{i \text{ cal.}}, U_{res.})$$

$$U_{\text{hipoA}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(1,3857)^2}{9}} * 1,07 = 0,4942$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{\text{res}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289$$

$$U_{\text{ical}} = \frac{3,1}{2} = 1,55$$

Y la incertidumbre correspondiente al % HR será:

$$U_{\%HR} = \sqrt{(0,4942)^2 + (0,0289)^2 + (1,55)^2} = 1,6271$$

VIII.6.3.2 Incertidumbre de la presión de vapor (en el aire)

Este vapor no es el vapor generado en la Unidad, sino, la humedad presente en el aire para la combustión en forma de vapor de agua.

$$P_s = (1,333224 \times 10^{-1}) e \left(18,3036 - \frac{3816,44}{-46,13 + t_{A'}} \right)$$

El coeficiente de sensibilidad es el correspondiente a la derivada de la presión de vapor respecto a la temperatura del aire.

$$\frac{\partial P_s}{\partial t_{A'}} = (1,333224 \times 10^{-1}) * \left(\frac{3816,44}{(-46,13 + t_{A'})^2} \right) e \left(18,3036 - \frac{3816,44}{-46,13 + t_{A'}} \right)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial t_{A'}} = (1,333224 \times 10^{-1}) * \left(\frac{3816,44}{(-46,13 + 298,85)^2} \right) e \left(18,3036 - \frac{3816,44}{-46,13 + 298,85} \right) = 0,1959$$

La incertidumbre de la temperatura del aire se encuentra en el punto VIII.6.1.2.

La incertidumbre de la presión de vapor queda como sigue:

$$U_{P_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_s}{\partial t_{A'}} \right)^2 * U_{t_{A'}}^2} = \sqrt{(0,1959)^2 * (0,4464)^2}$$

$$U_{P_s} = 0,0874$$

VIII.6.3.3 Incertidumbre de la presión barométrica

La incertidumbre de la presión barométrica se obtiene con la información de la tabla VII.2

$$U_{P_{\text{barométrica}}} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{cal.}}, U_{\text{res.}})$$

$$U_{\text{tipoA}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(0,0141)^2}{9}} * 1,07 = 5,029 \times 10^{-3}$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{\text{res}} = \frac{0,001}{2\sqrt{3}} = 2,8867 \times 10^{-4}$$

$$U_{\text{cal}} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Y la incertidumbre correspondiente a la presión barométrica será:

$$U_{P_{\text{barométrica}}} = \sqrt{(5,0290 \times 10^{-3})^2 + (2,8867 \times 10^{-4})^2 + (0,5)^2} = 0,5000$$

VIII.6.3.4 Incertidumbre de la humedad del aire

$$W_{mA'} = \frac{y_p * P_s * 18,01528}{100 (P - P_s) * 28,9635} \quad \text{En esta ecuación } y_p \text{ representa el \% de HR}$$

$$U_{W_{mA'}} = f(U_{y_p}, U_{P_s}, U_{P_s})$$

Los coeficientes de sensibilidad se calculan con respecto a la presión absoluta y la presión del vapor (VIII.6.3.2)

$$\frac{\partial W_{mA'}}{\partial y_p} = \frac{18,01528 * P_s}{100 * (P - P_s) * 28,9635} = \frac{18,01528 * 3,2771}{100 * (77,994 - 3,2771) * 28,9635} = 2,7281 \times 10^{-4}$$

$$\frac{\partial W_{mA'}}{\partial P_s} = \frac{18,01528 * y_p * P}{100 * (P - P_s)^2 * 28,9635} = \frac{18,01528 * 49,24 * 77,994}{100 * (77,994 - 3,2771)^2 * 28,9635} = 4,2789 \times 10^{-3}$$

$$\frac{\partial W_{mA'}}{\partial P} = -\frac{18,01528 * y_p * P_s}{100 * (P - P_s)^2 * 28,9635} = -\frac{18,01528 * 49,24 * 3,2771}{100 * (77,994 - 3,2771)^2 * 28,9635} = -1,7979 \times 10^{-4}$$

$$U_{W_{mA'}}^2 = \left(\frac{\partial W_{mA'}}{\partial y_p} \right)^2 U_{y_p}^2 + \left(\frac{\partial W_{mA'}}{\partial P_s} \right)^2 U_{P_s}^2 + \left(\frac{\partial W_{mA'}}{\partial P} \right)^2 U_P^2$$

$$U_{W_{mA'}} = \sqrt{(2,7281 \times 10^{-4})^2 (1,6271)^2 + (4,2789 \times 10^{-3})^2 (0,0874)^2 + (-1,7979 \times 10^{-4})^2 (0,5000)^2}$$

$$U_{W_{mA'}} = 5,8735 \times 10^{-4}$$

VIII.6.3.5 Incertidumbre del C_{ps}

$$cp_s = 1,8349 + 5,5885x10^{-4} * t_{A'} - 2,4949x10^{-6} * t_{A'}^2 + 1,9516x10^{-8} * t_{A'}^3$$

El coeficiente de sensibilidad es determinado por la derivación de la ecuación del C_{ps} respecto de la temperatura.

$$\frac{\partial cp_s}{\partial t_{A'}} = 5,5885x10^{-4} - (2)2,4949x10^{-6} * t_{A'} + (3)1,9516x10^{-8} * t_{A'}^2$$

$$\frac{\partial cp_s}{\partial t_{A'}} = 5,5885x10^{-4} - (2)2,4949x10^{-6} * 25,7 + (3)1,9516x10^{-8} * (25,7)^2 = 4,6928x10^{-4}$$

$$U_{cp_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial cp_s}{\partial t_{A'}}\right)^2} * U_{t_{A'}}^2 = \sqrt{(4,6928x10^{-4})^2 * (0,4464)^2} =$$

$$U_{cp_s} = 2,0949x10^{-4}$$

Para calcular la incertidumbre de B_{mAe} se requiere de los coeficientes de sensibilidad y de las incertidumbres correspondientes a cada término, de donde:

$$\frac{\partial B_{mAe}}{\partial W_{A'}} = W_{je} * W_{mA'} * cp_s * (t_{A'} - t_R) = 0,1275 * 0,0134 * 1,8479(25,7 - 17) = 0,0275$$

$$\frac{\partial B_{mAe}}{\partial W_{je}} = W_{A'} * W_{mA'} * cp_s * (t_{A'} - t_R) = 15,6338 * 0,0134 * 1,8479(25,7 - 17) = 3,3680$$

$$\frac{\partial B_{mAe}}{\partial W_{mA'}} = W_{A'} * W_{je} * cp_s * (t_{A'} - t_R) = 15,6338 * 0,1275 * 1,8479(25,7 - 17) = 32,0459$$

$$\frac{\partial B_{mAe}}{\partial cp_s} = W_{A'} * W_{je} * W_{mA'} * (t_{A'} - t_R) = 15,6338 * 0,1275 * 0,0134(25,7 - 17) = 0,2324$$

$$\frac{\partial B_{mAe}}{\partial t_{A'}} = W_{A'} * W_{je} * W_{mA'} * cp_s = 15,6338 * 0,1275 * 0,0134 * 1,8479 = 0,0494$$

$$U_{B_{mAe}}^2 = \left(\frac{\partial B_{mAe}}{\partial W_{A'}}\right)^2 U_{W_{A'}}^2 + \left(\frac{\partial B_{mAe}}{\partial W_{je}}\right)^2 U_{W_{je}}^2 + \left(\frac{\partial B_{mAe}}{\partial W_{mA'}}\right)^2 U_{W_{mA'}}^2 + \left(\frac{\partial B_{mAe}}{\partial cp_s}\right)^2 U_{cp_s}^2 + \left(\frac{\partial B_{mAe}}{\partial t_{A'}}\right)^2 U_{t_{A'}}^2$$

$$U_{B_{MAe}} = \sqrt{(0,0275)^2 (0,2920)^2 + (3,3680)^2 (3,2340 \times 10^{-4})^2 + (32,0459)^2 (5,8735 \times 10^{-4})^2 + (0,2324)^2 (2,0949 \times 10^{-4})^2 + (0,0494)^2 (0,4464)^2}$$

$$U_{B_{MAe}} = 0,0301$$

VIII.6.4 Incertidumbre combinada de los créditos

Finalmente en este punto se obtiene la incertidumbre de los créditos, la cual se obtiene de la suma de los tres términos involucrados para este caso particular de la manera siguiente.

$$B_e = B_{Ac} + B_{fe} + B_{MAe}$$

La incertidumbre combinada queda determinada por los coeficientes de sensibilidad, en este caso por ser una suma con valor de 1, y de las incertidumbres individuales previamente calculadas.

$$\frac{\partial B_e}{\partial B_{Ac}} = 1$$

$$\frac{\partial B_e}{\partial B_{fe}} = 1$$

$$\frac{\partial B_e}{\partial B_{MAe}} = 1$$

$$U_{B_e} = \sqrt{(1)^2 * (0,9507)^2 + (1)^2 * (0,1409)^2 + (1)^2 * (0,0301)^2}$$

$$U_{B_e} = 0,9615$$

VIII.7 Incertidumbre en la eficiencia

Hasta este punto se han realizado los cálculos de incertidumbre de los créditos, y del flujo de combustible restando solamente las incertidumbres del flujo de agua, así como aquellas correspondientes a las entalpías tanto de agua como de vapor.

VIII.7.1 Incertidumbre del flujo de vapor

Los datos correspondientes al flujo de vapor (o de agua) aparecen en la tabla

VIII.3

$$U_{se} = f(U_{\text{cronómetro}}, U_{\text{Báscula}}) \quad W_{se} = m/t$$

m: masa (kg) y t: tiempo (s)

Incertidumbres de la balanza y del cronómetro

$$U_{\text{cronómetro}} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{res}}, U_{\text{i cal.}})$$

Puesto que las mediciones fueron tomadas en función de los intervalos de tiempo previamente establecidos, para el tiempo no se considera la incertidumbre tipo A.

La resolución mínima es de 1 segundo con una distribución rectangular

$$U_{res} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,2887$$

$$U_{icai} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Y la incertidumbre correspondiente al cronómetro será:

$$U_{cronómetro} = \sqrt{(0,2887)^2 + (0,5)^2} = 0,5774$$

Para el flujo del vapor se emplean la desviación estándar de los datos de masa del vapor y no los de flujo presentado en la tabla VIII.3, por lo que se presentan de forma repetida los valores de flujo y sus correspondientes valores de masa en la tabla VIII.5 presentada a continuación.

Tabla VIII.5 Datos de agua de alimentación

Lecturas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	x	s (x)
Flujo (kg/h)	---	5 970,8	6 074,2	5 965,0	6 059,0	6 011,4	6 041,2	6 094,0	6 059,0	6 034,32	47,4839
Masa (kg)	---	2 985,4	3 037,1	2 985,5	3 029,5	3 005,7	3 020,6	3 047,0	3 029,5	3 017,54	23,1321

$$U_{Báscula} = f(U_{tipoA}, U_{icai}, U_{res})$$

$$U_{tipoA} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(23,1321)^2}{8}} * 1,08 = 8,8327$$

La resolución de la báscula es de 0,1 kg con una distribución rectangular

$$U_{res} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289$$

$$U_{icai} = \frac{0,6}{2} = 0,3$$

Y la incertidumbre correspondiente al cronómetro será:

$$U_{\text{Básculo}} = \sqrt{(8,8327)^2 + (0,0289)^2 + (0,3)^2} = 8,8378$$

Finalmente para el flujo de vapor se requiere de las derivadas parciales para calcular la incertidumbre combinada. Realmente lo que se ha pesado es el agua y por diferencia se han obtenidos los flujos que corresponden al vapor que se ha generado.

$$\frac{\partial W_{\text{ve}}}{\partial m} = \frac{1}{t} = \frac{1}{1800} = 5,5556 \times 10^{-4}$$

$$\frac{\partial W_{\text{ve}}}{\partial m} = -\frac{m}{t^2} = -\frac{3017,54}{(1800)^2} = 9,3134 \times 10^{-4}$$

$$U_{W_{\text{ve}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_{\text{ve}}}{\partial t}\right)^2 * U_t^2 + \left(\frac{\partial W_{\text{ve}}}{\partial m_w}\right)^2 * U_m^2} = \sqrt{(5,5556 \times 10^{-4})^2 * (8,8378)^2 + (9,3134 \times 10^{-4})^2 * (0,5774)^2} = 4,9393 \times 10^{-3}$$

$$U_{W_{\text{ve}}} = 4,9393 \times 10^{-3}$$

VIII.7.2 Incertidumbre de la entalpía del agua

Las incertidumbres de la entalpía del agua y del vapor se obtienen de acuerdo con lo propuesto a continuación y con los datos de las tablas VIII.3 y VIII.5.

Puesto que el modelo matemático para calcular las entalpías, tanto de agua como de vapor, es complejo y por tanto el cálculo de su incertidumbre lo es aun más, se propone combinar las incertidumbres involucradas con los incrementos de entalpías al incrementar solamente una de las variables manteniendo la otra constante, como sigue:

$$h_w = f(t_w, P_w)$$

$$U_{h_w}^2 = \left(\frac{\Delta h_w}{\Delta t_w}\right)^2 * U_{t_w}^2 + \left(\frac{\Delta h_w}{\Delta P_w}\right)^2 * U_{P_w}^2$$

Para calcular estos incrementos se toman las entalpías de agua y de vapor, y son obtenidas sus diferencias absolutas entre el valor promedio y cada uno de los valores. Posteriormente se calcula los coeficientes de sensibilidad y entonces se obtiene las incertidumbres de las entalpías.

En la tabla VIII.6 se ha generado la información necesaria para el cálculo de la incertidumbre de la entalpía del agua de alimentación.

Tabla VIII.6 Entalpía de agua⁽¹⁸⁾

Presión absoluta kPa	ΔP agua	t_w °C	Agua		Δh_w	$\frac{\Delta h_w}{\Delta t_w}$	$\frac{\Delta h_w}{\Delta P_w}$
			Δt_w	h_w kJ/kg			
1549	27,1	20	0,3	85,22	1,372	4,5733	0,0506
1500	21,9	20	0,3	85,18	1,412	4,7067	0,0645
1500	21,9	20	0,3	85,18	1,412	4,7067	0,0645
1529	7,1	20	0,3	85,20	1,392	4,6400	0,1961
1510	11,9	21	0,7	89,37	2,778	3,9686	0,2334
1549	27,1	21	0,7	89,40	2,808	4,0114	0,1036
1520	1,9	20	0,3	85,20	1,392	4,6400	0,7326
1530	8,1	21	0,7	89,39	2,798	3,9971	0,3454
1510	11,9	20	0,3	85,19	1,402	4,6733	0,1178
1521,9		20,3		86,592		4,4352	0,2120

Nota: los valores en negritas son los promedios correspondientes a la columna.

Además de la información de la tabla VIII.6 se requiere de las incertidumbres de la temperatura y de la presión absoluta del agua. A continuación se obtienen estos valores.

VIII.7.2.1 Incertidumbre de la temperatura del agua

La incertidumbre de la temperatura del agua depende solamente de las características del instrumento de medición.

$$U_{tw} = f(U_{lpoA}, U_{lcal}, U_{res.})$$

$$U_{lpoA} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(0,5)^2}{9}} * 1,07 = 0,1783$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{res} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,2887$$

$$U_{lcal} = \frac{0,5}{2} = 0,25$$

Y la incertidumbre correspondiente al t_w será:

$$U_{tw} = \sqrt{(0,1783)^2 + (0,2887)^2 + (0,25)^2}$$

$$U_{tw} = 0,4215$$

VIII.7.2.2 Incertidumbre de la presión del agua

$$U_{P_w} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{cal.}}, U_{\text{res.}})$$

$$U_{\text{tipoA}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(0,1922)^2}{9}} * 1,07 = 0,0685$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{\text{res}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289$$

$$U_{\text{cal}} = \frac{0,4}{2} = 0,2$$

Y la incertidumbre correspondiente al P_w será:

$$U_{P_w} = \sqrt{(0,0685)^2 + (0,0289)^2 + (0,2)^2} = 0,2134$$

La incertidumbre de la presión de agua en kPa es:

$$U_{P_w} = 20,9274$$

VIII.7.2.3 Incertidumbre de la presión absoluta del agua

El valor de presión empleado para obtener la entalpía del agua es el de presión absoluta, por lo tanto se tiene que combinar con el valor de incertidumbre de la presión barométrica el cual ha sido calculado en el punto VIII.6.3.3. La incertidumbre de la presión absoluta quedará como:

$$P_{\text{abs}} = P_w + P_{\text{barométrica}}$$

$$U_{P_{\text{abs}}} = f(U_{P_w}, U_{P_{\text{barométrica}}})$$

$$U_{P_{\text{abs}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\text{abs}}}{\partial P_w}\right)^2 U_{P_w}^2 + \left(\frac{\partial P_{\text{abs}}}{\partial P_{\text{barométrica}}}\right)^2 U_{P_{\text{barométrica}}}^2}$$

Ambos coeficientes de sensibilidad tiene el valor unitario puesto que se están sumando. La incertidumbre de la presión absoluta será:

$$U_{P_{\text{abs}}} = \sqrt{(1)^2 (20,9274)^2 + (1)^2 (0,5000)^2}$$

$$U_{P_{\text{abs}}} = 20,9334$$

Finalmente la incertidumbre de la entalpía del agua queda como:

$$U_{hw}^2 = \left(\frac{\Delta h_w}{\Delta t_w} \right)^2 * U_{tw}^2 + \left(\frac{\Delta h_w}{\Delta P_w} \right)^2 * U_{Pw}^2$$

$$U_{hw} = \sqrt{(4,4352)^2 * (0,4215)^2 + (0,2120)^2 * (20,9334)^2} = 4,8156$$

$$U_{hw} = 4,8156$$

VIII.7.3 Incertidumbre de la entalpía del vapor

Los datos de la entalpía de vapor aparecen en la tabla VIII.3

Puesto que el vapor manejado en nuestro cálculo es vapor saturado la entalpía es función únicamente de la presión o de la temperatura quedando:

$$H_s = f(P_s)$$

$$U_{hs}^2 = \left(\frac{\Delta h_s}{\Delta P_s} \right)^2 * U_{Ps}^2$$

Los valores de los incrementos de presión y de entalpía se calculan restando el valor promedio respectivo del valor puntual (tal como se hizo para la entalpía de agua). La tabla VIII.7 presenta los valores correspondientes.

Tabla VIII.7 Entalpía de vapor⁽¹⁸⁾

	Vapor			
Presión absoluta kPa	ΔP vapor	h_s kJ/kg	Δh_s	$\frac{\Delta h_s}{\Delta P_s}$
1559	36,0	2793	1,0	0,0277
1490	33,0	2791	1,0	0,0303
1510	13,0	2792	0,0	0,0000
1520	3,0	2792	0,0	0,0000
1520	3,0	2792	0,0	0,0000
1539	16,0	2792	0,0	0,0000
1529	6,0	2792	0,0	0,0000
1520	3,0	2792	0,0	0,0000
1520	3,0	2792	0,0	0,0000
1523,0		2792,0		0,0064

VIII.7.3.1 Incertidumbre de la presión del vapor

$$U_{Ps} = f(U_{\text{tipoA}}, U_{\text{cal}}, U_{\text{res}})$$

$$U_{\text{ipca}} = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} * t = \sqrt{\frac{(0,1936)^2}{9}} * 1,07 = 0,0690$$

En el cálculo de la incertidumbre debida a la resolución del instrumento se considera una distribución rectangular.

$$U_{\text{res}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289$$

$$U_{\text{icad}} = \frac{0,5}{2} = 0,25$$

Y la incertidumbre correspondiente al P_s será:

$$U_{P_s} = \sqrt{(0,0690)^2 + (0,0289)^2 + (0,25)^2} = 0,2609$$

La incertidumbre de la presión de vapor en kPa es:

$$U_{P_s} = 25,5855$$

VIII.7.3.2 Incertidumbre de la presión absoluta del vapor

El valor de presión empleado para obtener la entalpía del vapor es el de presión absoluta, por lo tanto se tiene que combinar con el valor de incertidumbre de la presión barométrica el cual ha sido calculado en el punto VIII.6.3.3. La incertidumbre de la presión absoluta del vapor quedará como:

$$P_{\text{abs}} = P_s + P_{\text{barométrica}}$$

$$U_{P_{\text{abs}}} = f(P_s, P_{\text{barométrica}})$$

$$U_{P_{\text{abs}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\text{abs}}}{\partial P_s}\right)^2 U_{P_s}^2 + \left(\frac{\partial P_{\text{abs}}}{\partial P_{\text{barométrica}}}\right)^2 U_{P_{\text{barométrica}}}^2}$$

Ambos coeficientes de sensibilidad tiene el valor unitario puesto que se están sumando. La incertidumbre de la presión absoluta será:

$$U_{P_{\text{abs}}} = \sqrt{(1)^2 (25,5855)^2 + (1)^2 (0,5000)^2}$$

$$U_{P_{\text{abs}}} = 25,5904$$

Con la incertidumbre de la presión absoluta y el coeficiente de sensibilidad se encuentra la incertidumbre de la entalpía de vapor:

$$U_{h_v}^2 = \left(\frac{\Delta h_x}{\Delta P_x}\right)^2 * U_{P_s}^2$$

$$U_{h_s} = \sqrt{(0,0064)^2 * (25,5904)^2} = 0,1638$$

$$U_{h_s} = 0,1638$$

VIII.7.4 Incertidumbre combinada de la eficiencia

Las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad para la eficiencia quedarán como sigue:

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{se}} = \frac{(h_s - h_w)}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 = \frac{(2792,0 - 86,59)}{43899 * 0,1275 + 23,4284} * 100 = 48,1342$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial h_s} = \frac{W_{se}}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 = \frac{1,6762}{43899 * 0,1275 + 23,4284} * 100 = 0,0298$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial h_w} = -\frac{W_{se}}{H_f * W_{fe} + B_e} * 100 = -\frac{1,6762}{43899 * 0,1275 + 23,4284} * 100 = -0,0298$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial H_f} = \left\{ \frac{W_{se} * (h_s - h_w) * (-1) * (W_{fe})}{(H_f * W_{fe} + B_e)^2} * 100 \right\} = -\frac{1,6762 * (2792,0 - 86,59) * 0,1275}{(43899 * 0,1275 + 23,4284)^2} * 100$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial H_f} = -1,8302 \times 10^{-3}$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{fe}} = \left\{ \frac{W_{se} * (h_s - h_w) * (-1) * (H_f)}{(H_f * W_{fe} + B_e)^2} * 100 \right\} = -\frac{1,6762 * (2792,0 - 86,59) * 43899}{(43899 * 0,1275 + 23,4284)^2} * 100$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{fe}} = -630,1672$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial B_e} = \left\{ \frac{W_{se} * (h_s - h_w) * (-1) * (1)}{(H_f * W_{fe} + B_e)^2} * 100 \right\} = -\frac{1,6762 * (2792,0 - 86,59)}{(43899 * 0,1275 + 23,4284)^2} * 100$$

$$\frac{\partial \eta_g}{\partial B_e} = -0,0143$$

Y la incertidumbre combinada quedará como sigue:

$$U_{ng}^2 = \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{se}}\right)^2 U_{W_{se}}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial h_s}\right)^2 U_{h_s}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial h_w}\right)^2 U_{h_w}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial H_f}\right)^2 U_{H_f}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial W_{fe}}\right)^2 U_{W_{fe}}^2 + \left(\frac{\partial \eta_g}{\partial B_c}\right)^2 U_{B_c}^2$$

$$U_{ng} = \sqrt{(48,1342)^2 (4,9393 \times 10^{-3})^2 + (0,0298)^2 (0,1638)^2 + (-0,0298)^2 (4,8156)^2 + (-1,8302 \times 10^{-3})^2 (21,9495)^2 + (-630,1672)^2 (3,2470 \times 10^{-4})^2 + (-0,0143)^2 (0,9615)^2}$$

$$U_{ng} = 0,3476 \%$$

Por lo tanto

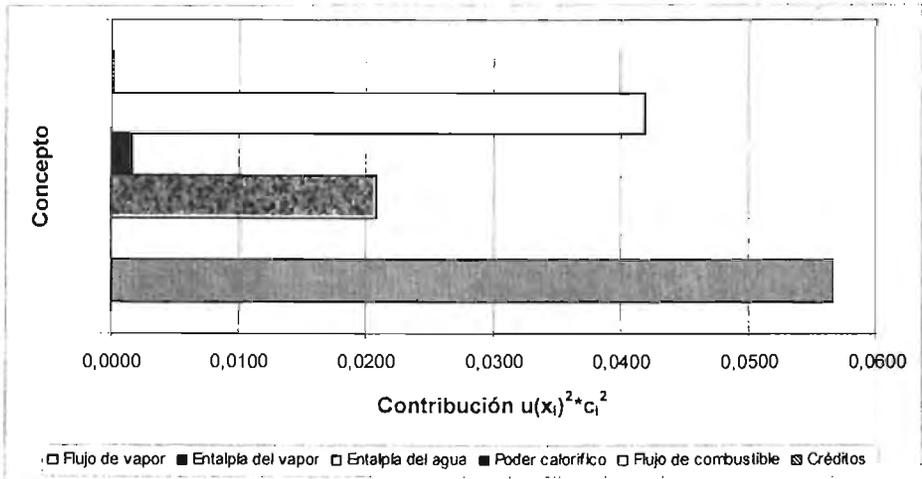
$$\eta_g = (80,68 \pm 0,35) \%$$

El resumen de la información requerida para el cálculo de la eficiencia y la contribución a su incertidumbre se encuentra en la tabla VIII.8

Tabla VIII.8 Parámetros para el cálculo de la eficiencia y contribución a su incertidumbre

Concepto	Valor	Incertidumbre	Coefficiente de sensibilidad	Contribución $u(x_i)^2 c_i^2$
Flujo de vapor	1,6762 kg/s	$4,9393 \times 10^{-3}$ kg/s	48,1342 s/kg	0,0565
Entalpía del vapor	2792,0 kJ/kg	0,1638 kJ/kg	0,0298 kg/kJ	$2,3826 \times 10^{-5}$
Entalpía del agua	86,59 kJ/kg	4,8156 kJ/kg	-0,0298 kg/kJ	0,0206
Poder calorífico superior	43 899 kJ/kg	21,9495 kJ/kg	$-1,8302 \times 10^{-3}$ kg/kJ	$1,6138 \times 10^{-3}$
Flujo de combustible	0,1275 kg/s	$3,2470 \times 10^{-4}$ kg/s	-630,1672 s/kg	0,0419
Créditos	23,4284 kJ/s	0,9615 kJ/s	-0,0143 s/kJ	$1,8905 \times 10^{-4}$
Eficiencia	80,68 %	0,3476 %		

Figura VIII.1 Contribución a la eficiencia



Nota: Puesto que, las unidades de la contribución de cada término quedan como porcentaje al cuadrado se han omitido en la figura, ya que estas no son en realidad dimensiones.

Tanto en la tabla VIII.8 como en la figura VIII.1 se puede observar claramente que los parámetros que contribuyen a la incertidumbre de manera significativa son: el flujo de vapor; la entalpía del agua y el flujo de combustible. Sin embargo, al ser el de mayor contribución el flujo de vapor, se pueden enfocar los esfuerzos a la disminución de este término. Para conseguirlo es necesario observar a todos los términos involucrados para su cálculo.

Si se observa cada uno de los términos involucrados en el cálculo de la incertidumbre del flujo de vapor tenemos: directamente la masa de vapor y el tiempo, enfocándonos en la masa que es la que presenta una incertidumbre mayor tenemos que en la tabla VIII.5 la desviación estándar obtenida para las mediciones es grande por tanto está podría ser un punto de disminución. Por ejemplo, si se logra reducir la desviación estándar a la mitad es decir 11,5660 la incertidumbre del flujo de vapor sería $2,4272 \times 10^{-3}$ y la contribución a la incertidumbre de la eficiencia sería 0,0136. Lo anterior quiere decir, que se disminuiría la incertidumbre de la eficiencia a 0,2792 que en porcentaje representaría el 80 % del valor obtenido inicialmente y por tanto una disminución del 20 % de la incertidumbre.

Para el flujo de combustible se podría probar algo similar, aunque en este caso la disminución en la incertidumbre de la eficiencia sería menor.

Una conclusión importante que se puede obtener de estos resultados es que si se cuenta con buenos instrumentos de medición y que además estos instrumentos se encuentran como parte de un Sistema de Aseguramiento de Mediciones en el cual cada uno de ellos es calibrado en los periodos establecidos para ello y que a su vez las calibraciones se realizan con patrones trazables al CENAM, se obtendrán incertidumbres aceptables tanto en cada uno de los equipos de medición como en aquellas mediciones indirectas, que es el caso de la eficiencia en la Unidad de Generación de Vapor.

Por otro lado si las mediciones tienen desviaciones considerables entre las lecturas tomadas, se debe de buscar la manera de disminuirlas, ya que de no ser así estas pueden influenciar el resultado final. La forma de disminuir estas discrepancias entre las medidas, en este caso de la masa de vapor, es mantener el funcionamiento de la Unidad de Generación de Vapor en condiciones régimen estacionario, lo cual se puede lograr manteniendo los consumos de vapor constantes para evitar cambios o variaciones. También se debe de verificar la manera en que se esta tomando la medición, que el personal este capacitado para realizar lecturas y todo aquel factor que pueda estar ocasionando las discrepancias.

IX. EVALUACIÓN DE LA NORMA

La norma ISO-10012 (Sistema de Control de Medición) se puede evaluar desde dos puntos de vista diferentes; en primer lugar el de aquella organización que no cuenta con algún tipo de sistema de gestión y que por tanto realiza sus actividades de acuerdo con sus necesidades diarias o de acuerdo con los requisitos de normatividad existente, y en segundo lugar como aquella organización que cuenta con un sistema de gestión bien definido (ya sea sistema de gestión de calidad, sistema de gestión ambiental o cualquier otro sistema).

En el primer caso: si la organización desea implementar un sistema de este tipo para asegurar sus mediciones, deberá trabajar bastante, pues necesita crear un ambiente adecuado entre el personal involucrado y mostrar las ventajas que se tendrían al implementar el sistema. Los esfuerzos requeridos para lograrlo serían muchos y la cantidad de obstáculos a librar lo sería aun más, sin embargo, si todo el personal se compromete así como la organización se podría conseguir resultados prácticamente desde el momento en que se acepte el proyecto.

En el segundo caso: si la organización cuenta con un sistema de gestión funcionando o en un mejor caso certificado o acreditado, el proyecto sería fácilmente realizado puesto que solamente se deberían de adaptar los puntos de la norma a los ya existentes, siendo necesario aumentar el punto de la realización del sistema de control de medición y todo lo que implica.

Esta distinción se ha hecho debido a que para una organización resulta difícil pensar en implementar un sistema si no conocen alguno, caso contrario a lo que sucedería a la organización si está cuenta con un sistema de la familia ISO por ejemplo.

El hecho de contar con un sistema ISO favorece la implementación del programa de Aseguramiento de Mediciones debido a la gran compatibilidad existente entre estas normas, por lo que la organización se preocuparía solamente por la parte referente a la confirmación metrológica, proceso de medición y realización de la medición. La ISO 10012 abarca ampliamente los aspectos administrativos manejados en la familia ISO por lo que la organización deberá de buscar abarcar todo lo referente a la medición y medios para llevarla a cabo (incluidos todos los aspectos técnicos de importancia) en los puntos antes

mencionados.

Desde el punto de vista de quienes requieren de las mediciones para poder garantizar el funcionamiento o control del servicio que brindan mediante estos, es de vital importancia la realización del sistema de control de medición, pues en el se encontrara la información referente a las exigencias metroológicas del usuario y las características del equipo de medición que serán fundamentales par realizar el proceso de medición con los equipos adecuados y cumpliendo con los límites previamente establecidos. El proceso de confirmación que no es otra cosa que comparar las características del equipo de medición con las exigencias que se requieren por el usuario (de un servicio, de un estándar o de un producto) es clave para el funcionamiento del sistema de control de medición ya que nos permite evaluar si tenemos la capacidad para nuevos procesos de medición o para mejorar los existentes. Por todo lo anterior la ISO 10012 debería ser propuesta como complemento de la ISO 9001, ISO 14001 o ISO 17025 para aquellas organizaciones que requieren de diversos tipos de medición.

La ISO 10012 presenta ventajas y desventajas entre las que puedo mencionar;

Ventajas:

- El hecho de no ser una norma que se certifique o acredite la hace flexible para todas las organizaciones que por iniciativa propia la quieran aprovechar.
- Al ser implantada por iniciativa propia como sistema, puede ser evaluada continuamente para hacerla eficiente, es decir, después de su implantación inicial se pueden encontrar las deficiencias y mejorar a la vez que se eliminan y justifican cuestiones innecesarias.

Desventajas:

- El hecho de no ser una norma que se certifique o acredite la hace poco atractiva para las organizaciones ya que no se ve el beneficio que se puede alcanzar.
- La estructura debería ser enfocada al cumplimiento de aspectos técnicos, dando pautas para cumplir con las necesidades de medir de cada organización, ya que el enfoque es más bien desde el punto de vista administrativo.

Pasando a los resultados que se obtuvieron de la evaluación de la eficiencia se puede decir que el Sistema funciona de manera adecuada, ya que ha cumplido su propósito de garantizar la calidad de las mediciones, al permitir que se pudiera realizar la confirmación metrológica de los equipos de medición cumpliéndose así con los requisitos de medición y que finalmente se ve reflejado en el valor de incertidumbre que se encontró para la eficiencia. Al realizarse la confirmación metrológica, se cumple además con la calibración de equipos y por ende a conocer la incertidumbre y trazabilidad de cada uno de ellos.

La mejora del Sistema se presenta en los resultados de la evaluación de la eficiencia, ya que se han encontrado oportunidades de mejora para disminuir la incertidumbre encontrada; como son la variabilidad de los flujos de vapor y de combustible. La evaluación de la eficiencia en la Unidad puede ser empleada como una verificación del funcionamiento del sistema ya que por medio de ella se puede determinar si los equipos se encuentran en condiciones y si la Unidad mantiene un funcionamiento aceptable.

La mejora del Sistema se presenta también en el diario accionar de la Unidad, puesto que si se encuentra fuera de las condiciones normales de operación, mediante el monitoreo continuo se puede corregir y verificar esta situación, con la certeza de que las variaciones presentados son debidas a su funcionamiento y no al equipo de medición.

Por lo anterior se debe concluir que la norma debería de ser reorientada de forma tal que se busque cumplir más con las necesidades técnicas de medición, siguiendo para ello la figura presentada para el proceso de confirmación metrológica, y proponiéndola como complemento de las otras normas de la familia ISO con lo que se lograría la aceptación de las organizaciones. Además al ser aceptada representaría una herramienta muy potente para poder llevar a cabo la mejora continua de los sistemas.

X. CONCLUSIONES

La hipótesis planteada para este trabajo pudo ser verificada satisfactoriamente, ya que, se estableció el programa de aseguramiento de mediciones y se aplicó a un caso particular para una Unidad de Generación de Vapor, garantizándose con el programa que las mediciones son confiables para evaluar la eficiencia de la Unidad. Al ser evaluada la eficiencia mediante mediciones incluidas en el Sistema, se garantizó que los instrumentos contarán con trazabilidad hacia patrones nacionales y que a su vez contará con la información de incertidumbre concerniente. El valor de eficiencia encontrado fue $\eta_g = (80,68 \pm 0,35) \%$ cuya incertidumbre es bastante aceptable puesto que no llega al punto porcentual de eficiencia. Además se encontraron oportunidades de mejora concernientes a la variabilidad de las mediciones del flujo de vapor y de combustible, las cuales se podrían disminuir manteniendo los consumos de vapor de manera constante.

En cuanto al objetivo planteado todas las actividades planeadas fueron realizadas satisfactoriamente ya que: se diseñó el programa de aseguramiento de mediciones; se identificaron las fuentes de incertidumbre y se evaluaron; se describieron las cartas de trazabilidad de las mediciones involucradas en la Unidad; así mismo se evaluó la eficiencia para un caso particular en el que se simuló el comportamiento de una Unidad y se realizaron algunos comentarios referentes a la norma ISO 10012.

El conocimiento de la metrología (a través del Sistema de Aseguramiento de Mediciones) llevó a determinar el proceso de medición, contar con el instrumento adecuado, garantizar la confiabilidad del instrumento, e implementar los medios para verificar periódicamente que se está realizando la medición correctamente. También como parte del trabajo las Auditorías permitirán detectar las oportunidades de mejora y mediante el apoyo del personal o usuarios encontrar los aspectos que realmente son funcionales y aquellos que no para poder aprovecharlos al máximo o en su defecto eliminarlos.

El Aseguramiento de Mediciones no solo servirá para cumplir con las necesidades de medición, sino que además el contar con el programa permitirá adaptarlo a cualquier otro sistema incluido aquellos de la familia ISO. En caso de contar con un sistema de gestión establecido previamente, se puede adaptar el programa de Aseguramiento al sistema existente debido a la compatibilidad que existe entre la familia ISO y de esta forma

se podrán obtener resultados de inmediato. El punto indispensable para quienes desean realizar mediciones de calidad será el punto V.4 Realización del sistema de control de medición.

Al establecerse el Sistema se cuenta con una herramienta muy potente, que puede ser usada en el control estadístico de procesos, pues si una gráfica nos muestra los cambios que ocurren en el proceso en forma cronológica, nosotros aseguramos mediante el Sistema que los cambios sean debidos en efecto al proceso y que no sean atribuidos a la medición.

La aplicación de un Sistema de Control de mediciones a un equipo que involucra mediciones de diferentes tipos, como lo es el caso de la Unidad de Generación de Vapor, presenta grandes ventajas: por ejemplo estas se pueden emplear en otros equipos de igual o mayor complejidad con la ventaja de tener el conocimiento de cómo evaluar los instrumentos, como calcular las incertidumbres y como garantizar la trazabilidad de las mediciones.

El trabajo buscó cumplir con un Sistema que pudiera generalizarse a otras Unidades de Generación de Vapor, pero, aunque se realiza para una Unidad de dimensiones pequeñas se han abarcado todos los instrumentos importantes que pueden estar en Unidades de mayor tamaño, con la diferencia de que pueden incluir instrumentos basados en otros principios diferentes a los instrumentos involucrados (como en la medición de flujo para la cual existen placas de orificio, medidores de tipo ventury y toberas) y con una mayor proporción de los mismos. Lo importante es que se presenta la forma en que puede ser evaluado un instrumento en el sistema para cumplir con los requisitos y como obtener su incertidumbre para de esta manera garantizar su función.

Finalmente debo concluir que la norma debería de ser reorientada de forma tal que se busque cumplir más con las necesidades técnicas de medición, siguiendo para ello la figura presentada para el proceso de confirmación metrológica, y proponiéndola como complemento de las otras normas de la familia ISO con lo que se lograría la aceptación de las organizaciones. Además al ser aceptada representaría una herramienta muy potente para poder llevar a cabo la mejora continua de los sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Carl D. Shield; Calderas Tipos Características y sus Funciones; Cia. Editorial Continental, 1982
- (2) Gonzalo Rodríguez Guerrero; Operación de calderas industriales, Tratado práctico operacional; Santa fe de Bogotá Colombia; 2000
- (3) Sheppard T. Powell, Acondicionamiento de aguas para la industria, ed. Limusa México 1974
- (4) Harold E. Soisson; Instrumentación industrial; Ed. Limusa Noriega; 1994
- (5) ISO-VIM (1993) International vocabulary of basic and general terms in metrology, 2nd edn. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland; ISBN-92-67-01075-1
- (6) Ma. de los Ángeles Olvera Treviño; Apuntes de Metrología de la Maestría de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Química, UNAM, 2003
- (7) CENAM Centro Nacional de Metrología, www.cenam.mx; 15 de enero de 2004
- (8) Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT); Garantía de calidad y control de calidad en química analítica, SERIE PONENCIAS; Ed. CIEMAT, Madrid 1996
- (9) Jorge C. Torres Guzmán, Daniel A. Ramírez Ahedo; Aseguramiento de la calidad en las mediciones de fuerza; Memorias del XV Seminario Nacional de Metrología; CENAM, Querétaro, México 1999
- (10) ISO 10012, Measurement control system, International Organization for Standardization (ISO), 2000
- (11) The American Society of Mechanical Engineers; Steam Generating Units, Power Test Codes 4; ASME; 1991
- (12) NORMA Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2002, Recipientes sujetos a presión y calderas-Funcionamiento-Condiciones de seguridad.
- (13) Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR); Calderas, parte 2 "Instalación, Ensayos, Mantenimiento y Revisión"; segunda edición; 1993. Calderas de vapor (características del agua), UNE 9-075-92; imprime y edita: Asociación Española de Normalización y certificación; Madrid, España, 1992

-
- (14) ISO; Guide to the expresión of uncertainty in measurement" (guía para la expresión de la incertidumbre en medición) (GUM); 1995
- (15) Wolfgang A. Schmid y Ruben J. Lazos Martínez; Guía para estimar la incertidumbre de la medición; CENAM; Qro., México, 2004.
- (16) NMX-CC-SAA-19011-IMNC-2002; Directrices para la auditoría de los sistemas de gestión de la calidad y/o ambiental; IMNC; 2002
- (17) Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR); Calderas, parte 2 "Instalación, Ensayos, Mantenimiento y Revisión"; segunda edición; 1993. Ensayos de Recepción de Calderas desde 1 000 th/h hasta 25 000 th/h de producción, UNE 9-200-85; imprime y edita: Asociación Española de Normalización y certificación; Madrid, España, 1985
- (18) Michael J. Moran, Howard N. Shapiro; Fundamentals of Engineering Thermodynamics; Second edition; InteliPro, inc. 1992
- (19) David M. Himmelblau; Basic Principles and calculations in Chemical Engineering; Prentice Hall International, 6ª edición; Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences; 1996
- (20) R.C. Reid, J. M. Prausnitz y T. K. Sherwood; The Properties of Gases and Liquids; Apendice A; Mc Graw-Hill, 3ª ed.; New York 1977
- (21) Olaf A. Hougen, Kennet M. Watson y Roland A. Ragatz; Chemical Process Principles- part I Material and Energy Balances; Edit John and Wiley sons; 1964
- (22) Davia S. Dickey; Practical Formulas Calculate Water Properties, part 2; Chemical Engineering; November 1991
- (23) IUPAC; <http://www.chem.qmu.ac.uk/iupac/atwt/>; marzo 2004
- (24) NIST; <http://physics.nist.gov/cuu/Reference/unitconversions.html>; Agosto 2004
- (25) BIPM; http://www.1.bipm.org/en/si/derived_units/, Agosto 2004
- (26) UNAM; <http://www.fisica.unam.mx/fisexp/jmiranda/EVALINCERT-2003.pdf>; diciembre 2004
- (27) METAS; <http://www.metas.com.mx/presion.html>; Agosto 2004
- (28) NIST; <http://physics.nist.gov/constants>; Septiembre 2004
- (29) SECOFI; Ley Federal Sobre Metrología y Normalización; Subsecretaría de Normatividad y Servicios a la Industria y al Comercio Exterior; Julio 1997

- (30)** <http://www.indutecnica.cl/inicio.htm>; Agosto 2004
- (31)** Base conceptual del análisis de incertidumbre; http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/A1_Conceptual_ES.pdf; diciembre 2004
- (32)** S L R Ellison, M Rosslein, A Williams; Quantifying uncertainty in analytical measurement; EURACHEM CITAC GUIDE CG 4; 2000
- (33)** CIEMAT; Garantía de calidad y control de calidad en química analítica; Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas; Madrid 1996

ANEXO

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	P-ER-001
	Procedimiento: "Identificación de documentos"	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de x
<p>1.- OBJETIVO: Establecer un procedimiento que facilite la identificación de los documentos generados en el SCM de la UGV.</p> <p>2.- ALCANCE: Aplica, a todos los documentos involucrados en el SCM de la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>3.- DEFINICIONES</p> <p>3.1.- Documento: Es toda aquella información disponible en cualquier medio, que disciplina los procesos de la organización</p> <p>3.2.- SCM: Sistema de Control de Mediciones.</p> <p>3.3.- UGV: Unidad de Generación de Vapor</p> <p>4.- DESCRIPCIÓN:</p> <p>4.1.- Los documentos elaborados como parte del SCM de la Unidad de Generación de Vapor pueden ser identificados de manera única mediante su clave irrepetible establecida en el Código presentado a continuación. A-BB-### Donde: A: Es la clave del tipo de documento Tipos de documentos: Los tipos de documentos manejados en el SCM son:</p>			
Clave	Tipo	Características	
P	Procedimiento	Documento donde se establecen las actividades y responsabilidades del SCM.	
I	Instructivo	Documento en que se describe de manera específica las actividades necesarias para la ejecución de un trabajo.	

F	Formatos	Documento para el registro de información derivado de realizar una actividad.
C	Catálogos	Documentos que pueden incluir especificaciones, informe de calibración, e información general especialmente de los instrumentos de medición.
BB: Clave del área responsable del documento, según la tabla siguiente:		
Clave del área		Área
ER		Entidad responsable
MA		Mantenimiento
FO		Fogoneros
SE		Servicios externos
<p>###: Número consecutivo de tres dígitos del documento, de acuerdo al tipo, y área</p> <p>4.2.- Los documentos además deben de contar con una identificación, que permita al usuario saber si el documento es controlado o no, lo que se puede conseguir con un sello que incluya la leyenda correspondiente.</p>		
5.- DOCUMENTOS DE APOYO		
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Norma ISO 10012 Sistema de control de medición ➤ I-ER-001 Elaboración de documentos del SCM 		
Control de cambios en el documento		
Resumen del cambio:		
Elaboró	Revisó	Aprobó
Firma Nombre Puesto	Firma Nombre Puesto	Firma Nombre Puesto

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	P-ER-002
	Procedimiento: "Almacenamiento de documentos y archivos"	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de x
<p>1.- OBJETIVO:</p> <p>Establecer un procedimiento que facilite el almacenamiento de los documentos y archivos generados en el SCM de la UGV.</p>			
<p>2.- ALCANCE:</p> <p>Aplica, a todos los documentos y archivos involucrados en el SCM de la Unidad de Generación de Vapor.</p>			
<p>3.- DEFINICIONES</p> <p>3.1.- SCM: Sistema de Control de Mediciones para la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>3.2.- UGV: Unidad de Generación de Vapor</p>			
<p>4.- DESCRIPCIÓN:</p> <p>4.1.- Los documentos y archivos generados en el SCM de la UGV se almacenan de la siguiente forma:</p> <p>4.1.1.- Archivo electrónico del documento, uno guardado en el disco duro del equipo de cómputo en que se disponga se use para almacenamiento y un segundo archivo almacenado en un dispositivo extraíble de la computadora (disco flexible o disco compacto). El archivo electrónico servirá para la actualización de los documentos y control de las modificaciones.</p> <p>4.1.2.- Documento impreso del archivo electrónico mencionado en el párrafo anterior del cual se generan las copias controladas requeridas por los usuarios. Este documento se encontrará almacenado en el archivo correspondiente a la documentación del SCM, y podrá ser solicitado al personal asignado para este propósito.</p> <p>4.2.- Archivos y documentos serán resguardados por una o dos personas que serán designados por la entidad responsable, preferentemente serán personas involucradas en el sistema de control de mediciones o que tengan el conocimiento del sistema. La</p>			

<p>función de ellas será la del resguardo, modificación y actualización de la documentación para mantener vigente la información. Así mismo se encargarán de que las actualizaciones de la documentación controlada se realicen de manera oportuna y de recuperar estas copias controladas, para evitar su uso no intencionado.</p>		
<p>5.- DOCUMENTOS DE APOYO</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Norma ISO 10012 Sistema de control de medición ➤ P-ER-001 Identificación de documentos 		
<p>Control de cambios en el documento</p>		
<p>Resumen del cambio:</p>		
<p> </p>		
<p> </p>		
<p> </p>		
<p>Elaboró</p>	<p>Revisó</p>	<p>Aprobó</p>
<p>Firma Nombre Puesto</p>	<p>Firma Nombre Puesto</p>	<p>Firma Nombre Puesto</p>

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	P-ER-003
	Procedimiento: "Tiempo de retención y disposición de archivos"	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de x
<p>1.- OBJETIVO:</p> <p>Establecer un procedimiento para asegurar que los archivos sean almacenados, después de haber sido retirados del uso, el tiempo establecido para ello y que después de este tiempo se dispondrá de ellos para su destino final.</p> <p>2.- ALCANCE:</p> <p>Aplica, a todos los documentos y archivos que hayan sido retirados del uso en el SCM de la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>3.- DEFINICIONES</p> <p>3.1.- SCM: Sistema de Control de Mediciones para la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>3.2.- UGV: Unidad de Generación de Vapor</p> <p>4.- DESCRIPCIÓN:</p> <p>4.1.- Los documentos y archivos que han sido sustituidos por una nueva versión serán retirados del uso del SCM de la UGV.</p> <p>4.2.- Los documentos se almacenarán en un archivo muerto por un periodo de tiempo de tres años (por lo menos los documentos originales y los que se encuentren en forma electrónica –discos flexibles y discos compactos). Las copias controladas pueden ser dispuestas de manera similar a como lo es el archivo muerto, sin necesidad de conservarlas.</p> <p>4.3.- El almacenamiento de la documentación en el archivo muerto será perfectamente identificado y sellado. La información mínima necesaria, visible en el archivo muerto, es la fecha de retiro, los documentos contenidos (incluyendo el código) y cualquier información que se considere relevante.</p> <p>4.4.- Pasado el periodo de tiempo de almacenamiento en el archivo muerto, se dispondrá de esta información destruyéndola. Los medios de la destrucción podrán ser alguno de los siguientes:</p>			

4.4.1.- Para los archivos en papel se podrá proceder mediante incineración o cortado de los documentos.

4.2.2.- Para la información almacenada en dispositivos electrónicos se pueden romper los disquetes o discos o incinerar.

Nota: Es importante tener presente que los archivos generados en las calibraciones de los equipos de medición no serán obsoletos al llevarse a cabo una nueva calibración, sino que por el contrario la información de las calibraciones servirá para validar el cambio de los periodos de calibración o para la caracterización de un equipo determinado.

5.- DOCUMENTOS DE APOYO

- Norma ISO 10012 Sistema de control de medición
- Todo aquel documento que sea retirado de uso

Control de cambios en el documento

Resumen del cambio:

Elaboró	Revisó	Aprobó
Firma	Firma	Firma
Nombre	Nombre	Nombre
Puesto	Puesto	Puesto

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	P-ER-004
	Procedimiento: "Intervalos de confirmación"	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de x
<p>1.- OBJETIVO: Establecer un procedimiento para determinar o cambiar los intervalos de confirmación de los instrumentos de medición involucrados en el SCM de la UGV.</p> <p>2.- ALCANCE: Aplica, a todos los instrumentos involucrados en el funcionamiento de la Unidad de Generación de Vapor; para definir los intervalos, sus revisiones y su ajuste.</p> <p>3.- DEFINICIONES 3.1.- SCM: Sistema de Control de Mediciones para la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>4.- DESCRIPCIÓN: 4.1.- Los intervalos de confirmación se realizarán de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del equipo de medición. 4.2.- Los intervalos pueden ampliarse, si se cuenta con evidencia respaldada en el historial de las calibraciones del equipo de medición que demuestren que la incertidumbre no se vera afectada. 4.3.- Los intervalos de confirmación iniciales de los equipos de medición serán de seis meses y podrán ser cambiados de acuerdo con el comportamiento del equipo. El equipo deberá ser confirmado fuera de la fecha establecida en el intervalo, si el fogonero detecta situaciones anormales como alguna de las siguientes: 4.3.1.- Equipo detectado como averiado 4.3.2.- Equipo con sellos rotos 4.3.3.- Falseo de mediciones 4.4.- Si los requisitos del usuario no cambian con el paso del tiempo y los resultados de las calibraciones del equipo demuestran que sus características metrológicas se mantienen sin cambios significativos se pueden ampliar los intervalos tanto, de calibración como de confirmación. Los casos en que se debe de considerar cambiar los</p>			

intervalos de confirmación serán cuando existan modificaciones, de los requisitos metrológicos del usuario o del equipo de medición (por reemplazo de equipo, reparaciones o ajustes).

5.- DOCUMENTOS DE APOYO

- Norma ISO 10012 Sistema de control de medición
- Documentos proporcionados por el fabricante del equipo
- F-MA-001 Formato de recepción de equipo de medición

Control de cambios en el documento

Resumen del cambio:

Elaboró	Revisó	Aprobó
Firma	Firma	Firma
Nombre	Nombre	Nombre
Puesto	Puesto	Puesto

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor				
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	I-MA-001	
	Instructivo:	Fecha	dd/mm/aa	
	"Recepción de equipo de medición y despacho"	Revisión	0	
		Página	1 de x	
<p>1.- OBJETIVO: Establecer las instrucciones necesarias para llevar a cabo la recepción y despacho del equipo medición nuevo.</p> <p>2.- ALCANCE: Aplica, a todo aquel equipo de medición que sea adquirido por la entidad responsable para el SCM de la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>3.- DEFINICIONES 3.1.- SCM: Sistema de Control de Mediciones para la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>4.- DESCRIPCIÓN: Todos los equipos de medición adquiridos por la entidad responsable para el SCM deben ser evaluados antes de formar parte integral del sistema.</p> <p>4.1.- Para recibir un equipo de medición nuevo el área de mantenimiento se encargara de revisar lo siguiente:</p> <p>4.1.1.- El equipo cumple con los requerimientos especificados por los solicitantes del mismo.</p> <p>4.1.2.- El equipo cuenta con las piezas y partes indicadas en el empaque. Además se encuentran en buen estado las partes del equipo, es decir no se presentan partes rotas.</p> <p>4.2.- Después de la inspección se procede al registro del equipo de medición. La información a ser registrada en el formato F-MA-001 son: Nombre, número de serie, características del equipo de medición (incluyendo aquellas como el alcance, división mínima, restricciones de uso, etc.), medición asignada e identificación asignada del instrumento.</p> <p>4.3.- Si el equipo de medición es requerido para su uso inmediato se procede a programar la fecha de calibración lo más pronto posible. Si se mantendrá almacenado,</p>				

entonces, se programa la calibración de acuerdo al orden de espera si es que existen otros instrumentos (con la finalidad de mantenerlo calibrado y listo para su uso así como para verificar el funcionamiento y sus características).

4.4.- El instrumento es enviado al almacén o a calibración según sea el caso. Posterior a la calibración y confirmación se deben colocar los sellos e identificaciones necesarios o para resguardar e identificar el instrumento.

4.5.- Se genera un archivo para mantener la información referente al equipo. En éste se incluirán los resultados de las calibraciones futuras, la información otorgada por el fabricante como son los instructivos de uso y manejo del equipo y las reparaciones o ajustes futuros del mismo.

4.6.- Se informa al solicitante del equipo de medición que ha sido recibido su equipo.

4.7.- Para despachar un equipo de medición el almacén y el solicitante se encargaran de revisar que el equipo cumple con los requerimientos especificados.

4.8.- Después de la inspección se procede a la entrega del equipo de medición, para lo cual se requiere que la persona llene el formato correspondiente el cual incluye la firma de quien esta retirando el equipo del almacén, la fecha y cualquier nota referente al estado del equipo incluyendo inconformidades.

5.- DOCUMENTOS DE APOYO

- Norma ISO 10012 Sistema de control de medición
- Documentos proporcionados por el fabricante del equipo
- F-MA-001 formato de recepción de equipo de medición
- F-MA-002 formato de entrega de equipo de medición

Control de cambios en el documento

Resumen del cambio:

Elaboró	Revisó	Aprobó
Firma	Firma	Firma
Nombre	Nombre	Nombre
Puesto	Puesto	Puesto

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	I-MA-002
	Instructivo: "Manejo y transporte del equipo de medición"	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de x
<p>1.- OBJETIVO: Establecer las instrucciones para llevar a cabo el manejo y transporte del equipo de medición del SCM.</p> <p>2.- ALCANCE: Aplica, a todo aquel equipo de medición perteneciente a la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>3.- DEFINICIONES 3.1.- SCM: Sistema de Control de Mediciones para la Unidad de Generación de Vapor.</p> <p>4.- DESCRIPCIÓN: El manejo y transporte de los equipos de medición pertenecientes al SCM debe cumplir con las siguientes condiciones de seguridad:</p> <p>4.1.- Si el equipo de medición requerido no se encuentra instalado en la Unidad de Generación de Vapor de manera permanente, este deberá de ser transportado en su estuche, para evitar posibles golpes o caídas.</p> <p>4.2.- Si el equipo de medición debe ser sustituido de la Unidad por otro equipo similar, este debe previamente haber sido confirmado. Cuando se proceda a cambiar el equipo, este debe ser manejado y transportado por el personal autorizado el cual lo podrá solicitar en el almacén. La persona que recoja el equipo en el almacén revisará que el equipo se encuentre en buenas condiciones y que cuenta con los sellos e identificación correspondientes (I-MA-001).</p> <p>4.3.- Cuando el equipo de medición no pueda ser manejado por una sola persona se deberá de contar con el apoyo por parte del personal del almacén y del área involucrada. Si es necesario se debe de utilizar algún medio de transporte que permita el traslado seguro.</p> <p>4.4.- En cualquiera que sea el caso, deberá ser empleado el manual o instructivo del</p>			

<p>equipo de medición para su manejo adecuado.</p> <p>4.5.- Al instalarse un nuevo equipo de medición debe ser dado de alta para que el archivo correspondiente a el este disponible.</p>		
<p>5.- DOCUMENTOS DE APOYO</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Norma ISO 10012 Sistema de control de medición ➤ Documentos proporcionados por el fabricante del equipo ➤ Instructivos o manuales del equipo de medición 		
Control de cambios en el documento		
Resumen del cambio:		
Elaboró	Revisó	Aprobó
Firma	Firma	Firma
Nombre	Nombre	Nombre
Puesto	Puesto	Puesto

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	F-MA-001
	Formato: "Recepción de equipo de medición "	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de 1
Nombre del Instrumento:			
Marca:			
Número de serie:			
Alcance:			
División mínima:			
Incertidumbre:			
Fecha de calibración:			
Fecha de confirmación:			
Medición asignada:			
Identificación asignada:			
Observaciones:			
Responsable de la recepción:			
Firma:			

Sistema de Control de Mediciones: Unidad de Generación de Vapor			
LOGOTIPO DE LA ORGANIZACIÓN	Nombre del documento	Clave	F-MA-002
	Formato: “Entrega de equipo de medición ”	Fecha	dd/mm/aa
		Revisión	0
		Página	1 de 1
Instrumento			
Nombre del Instrumento:			
Marca:			
Número de serie:			
Alcance:			
División mínima:			
Incertidumbre:			
Fecha de calibración:			
Fecha de confirmación:			
Medición asignada:			
Identificación asignada:			
Persona que recibe			
Nombre:			
Firma			
Observaciones:			
Responsable de la entrega:			
Firma:			